

ผลของอุณหภูมิการผสมที่ลดลงต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

นางสาวพัชรีภรณ์ สอนเฒ่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF REDUCED MIXING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER
MODIFIED ASPHALT CONCRETE

Miss Patchareeporn Sontao



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิการผสมที่ลดลงต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โพรพิลีนไดออกไซด์/โพรพิลีนไกลีคอล
โดย	นางสาวพัชรีภรณ์ สอนเฒ่า
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี แจ่มศิริเลิศ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พงศ์ชาติ บุรณะประเสริฐสุข)

พัชรีภรณ์ สอนเฒ่า : ผลของอุณหภูมิการผสมที่ลดลงต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์
 โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต (EFFECT OF REDUCED MIXING TEMPERATURE ON
 MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MODIFIED ASPHALT CONCRETE) อ.ที่
 ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วรินทร์ ขวศิริ, 106 หน้า.

ปัจจุบันเทคนิคแอสฟัลต์ผสมอุ่นได้รับความนิยมในสหรัฐอเมริกา ยุโรปและบางประเทศใน
 เอเชีย จึงมีความจำเป็นในการประเมินแอสฟัลต์ผสมอุ่นเพื่อนำมาประยุกต์ในประเทศไทย ในงานวิจัย
 นี้ได้ใช้เทคนิคต่างๆ ในห้องปฏิบัติการได้แก่ ความแข็งแรง การแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ การเกิดร่องล้อ
 และการเสียดทานจากความชื้นในการประเมินประสิทธิภาพของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น
 ที่ได้จากการเติมสารเติมแต่ง นอกจากนี้ได้ศึกษาการบดอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ร้อยละของปริมาณ
 ช่องว่างอากาศที่ต้องการที่อุณหภูมิต่ำลง จากการศึกษาพบว่า การเติมสารเติมแต่งในพอลิเมอร์
 โมดิฟายด์แอสฟัลต์สามารถปรับปรุงการใช้งานและทำให้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสม
 อุ่นมีความแข็งแรง การต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ และการต้านทานการเกิดร่องล้อสูงกว่า
 พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ส่วนการเสียดทานจากความชื้นให้ผลการทดสอบที่ไม่แตกต่าง
 กันระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งสองชนิด เมื่อพิจารณาการบดอัดพบว่าสามารถบดอัดเพื่อให้ได้ร้อยละ
 ของปริมาณช่องว่างอากาศโดยใช้อุณหภูมิการบดอัดต่ำลง 30 องศาเซลเซียส



สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5772407723 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLYMER MODIFIED ASPHALT / WARM MIXED ASPHALT / COMPATIBILITY

PATCHAREEPORN SONTAO: EFFECT OF REDUCED MIXING TEMPERATURE ON
MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MODIFIED ASPHALT CONCRETE.

ADVISOR: ASST. PROF. WARINTHORN CHAVASIRI, Ph.D., 106 pp.

As warm asphalt has been gaining popularity in recent years in the United States, Europe and some countries in Asia, there is a need for the research to evaluate the applicability of warm mixed asphalt in Thailand. In this study, a wide range of laboratory tests, namely, dynamic modulus, low-temperature cracking, rutting and moisture damage was conducted to evaluate the performance of polymer modified asphalt using warm mixed additives. In addition, the compatibility of mixtures was investigated to determine whether the mixture can reach the desired air void at lower temperature. It was found that the mixture modified with warm mixed additives can improve workability and the mechanical properties as better stiffness modulus, low temperature cracking, rutting potential, and equally well moisture damage compared with the control mixture. The measurement of the compatibility shows that reduce temperature to compact the mixture to desired air void 30°C below compaction temperature.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ ชวศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต และ ดร.พงษ์ชาติ บุรณะประเสริฐสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของบริษัท ทิปโก้แอสฟัลท์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกการใช้เครื่องมือในการทดลอง ห้องปฏิบัติการและตัวอย่างสำหรับการทดลอง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ในการประสานงานต่างๆ ที่ทำให้การนำเสนองานวิทยานิพนธ์นี้เป็นไปอย่างราบรื่น

สุดท้ายนี้กราบขอบคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจช่วยเหลือ และให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	4
บทที่ 1	6
บทนำ.....	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	6
1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย.....	7
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	7
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย (โดยละเอียด)	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2	9
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 แอสฟัลต์ (asphalt).....	9
2.1.1 แบบจำลององค์ประกอบโมเลกุลของวัสดุแอสฟัลต์.....	10
2.2 ประเภทของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง	12
2.2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (asphalt cement)	12
2.2.2 แอสฟัลต์ชนิดเหลว (liquid asphalt).....	13
2.3 พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (polymer modified asphalt, PMA).....	14
2.4 แอสฟัลต์ผสมอุ่น (warm mix asphalt).....	17

2.4.1 สมบัติเชิงกล	17
2.4.2 สิ่งแวดล้อม	17
2.5 การทดสอบแบบไดนามิกเชียร์รีโอมิเตอร์ (dynamic shear rheometer, DSR)	19
2.6 การทดสอบแบบเบนด์ง์บีมรีโอมิเตอร์ (bending beam rheometer, BBR)	21
2.7 วัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน (hot mix asphalt, HMA)	22
2.7.1 การเสีรูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	24
2.7.2 องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	28
2.7.3 สมบัติของแอสฟัลต์ที่เหมาะสม.....	30
2.8 การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	31
2.9 การบดอัดก้อนตัวอย่างด้วยเครื่อง superpave gyratory compaction (SGC)	33
2.10 การทดสอบโดย indirect tensile test	34
2.11 การทดสอบแบบ repetitive uniaxial compression test	34
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
บทที่ 3	39
เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	39
3.1 การผลิตพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น	39
3.2 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน	41
3.2.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานพื้นฐาน	41
3.2.2 การทดสอบสมบัติการไหลของวัสดุเชื่อมประสาน	42
3.3 การเตรียมและทดสอบสมบัติของวัสดุผสมรวม	43
3.4 ขนาดคละของวัสดุผสมรวม (gradation)	44
3.5 การเตรียมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่าง	45
3.5.1 การเตรียมแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล.....	46

3.5.2 การเตรียมแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างด้วยเครื่อง gyratory compactor	47
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต	48
3.6.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile stiffness modulus test).....	48
3.6.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (permanent deformation).....	49
3.6.3 การทดสอบการเกิดร่องล้อ.....	50
3.7 แนวทางในการดำเนินการศึกษา.....	52
บทที่ 4.....	54
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	54
4.1 ปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่ง	54
4.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน	57
4.2.1 การทดสอบเพนิเทรชัน (penetration)	57
4.2.2 การทดสอบจุดอ่อนตัว (softening point)	58
4.2.3 การทดสอบการดึงยืด (ductility) และการยืดหยุ่นตัวกลับ (elastic recovery).....	58
4.2.4 การทดสอบความหนืดแบบ Brookfield	60
4.3 การทดสอบสมบัติการไหล (rheological properties).....	61
4.3.1 การทดสอบโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อน (complex shear modulus).....	61
4.3.2 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (fatigue test).....	64
4.3.3 การทดสอบการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ (low-temperature cracking test).....	65
4.4 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวม (Aggregate).....	67
4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	69
4.5.1 การเลือกอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิการบดอัดของวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวม.....	69

4.5.2 การหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum asphalt content).....	70
4.5.3 ผลทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	74
4.5.4 ผลการทดสอบ stiffness modulus ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีแรงดึง ทางอ้อม.....	75
4.5.5 ผลการทดสอบการยุบตัวแบบถาวร (dynamic creep test).....	76
4.5.6 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อ (Hamburg wheel tracking method)	78
บทที่ 5.....	81
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	81
5.1 สรุปผลการทดลอง	81
5.1.1 วัสดุเชื่อมประสาน	81
5.1.2 ส่วนผสมพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
รายการอ้างอิง.....	87
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก.....	91
การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง.....	91
ภาคผนวก ข.....	95
ข้อมูลผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน.....	95
ภาคผนวก ค.....	103
ข้อมูลผลการทดสอบพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	106

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบโครงสร้างของวัสดุแอสฟัลต์.....	10
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ประเภทอีลาสโตเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง.....	15
ภาพที่ 2.3 อุณหภูมิและปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต.....	18
ภาพที่ 2.4 พฤติกรรมแบบหนืดยืดหยุ่นของแอสฟัลต์.....	20
ภาพที่ 2.5 หลักการของเครื่องเบนดิงปีมรีโอมิเตอร์.....	21
ภาพที่ 2.6 วิธีหาค่าความแข็งตึงต้านการคืบ.....	22
ภาพที่ 2.7 วิธีหาค่าอัตราการคืบ.....	22
ภาพที่ 2.8 รอยร่องล้อที่เกิดจากชั้นดินเดิมอ่อนแอ.....	26
ภาพที่ 2.9 รอยร่องล้อที่เกิดจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนแอ.....	26
ภาพที่ 2.10 การแตกร้าวเนื่องจากความล้ามีลักษณะแบบหนังจระเข้.....	27
ภาพที่ 2.11 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ.....	28
ภาพที่ 2.12 ความถ่วงจำเพาะแบบทั้งก้อน ปรากฏและประสิทธิผล รวมทั้งปริมาณแอสฟัลต์ ประสิทธิผลในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว.....	29
ภาพที่ 2.13 เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	32
ภาพที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล.....	32
ภาพที่ 2.15 ลักษณะการทำงานของเครื่อง superpave gyratory compaction	34
ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสะสมกับจำนวนรอบที่น้ำหนักมากระทำ	35
ภาพที่ 3.1 เครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง.....	40
ภาพที่ 3.2 ก) SBS พอลิเมอร์และ ข) สารเติมแต่งผสมอ่อน.....	40
ภาพที่ 3.3 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุมวลรวม.....	45
ภาพที่ 3.4 แสดงการเตรียมแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างที่อุณหภูมิการผสมและอุณหภูมิการบดอัด... ..	45
ภาพที่ 3.5 เครื่อง marshall compactor	46
ภาพที่ 3.6 เครื่อง gyratory compactor	47
ภาพที่ 3.7 การจัดวางก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม.....	48

ภาพที่ 3.8 ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวร..	49
ภาพที่ 3.9 แบบหล่ออะคริลิกและขนาดก้อนตัวอย่าง.....	50
ภาพที่ 3.10 การประกอบก้อนตัวอย่างเข้ากับแบบหล่อและจัดวางเข้ากับเครื่องทดสอบ.....	51
ภาพที่ 3.11 แสดงการทดสอบการเกิดร่องล้อด้วยล้อแอสตันเลส.....	51
ภาพที่ 3.12 แผนผังแสดงการทดสอบส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน.....	52
ภาพที่ 3.13 แผนผังแสดงการทดสอบส่วนที่เป็นแอสฟัลต์คอนกรีต	53
ภาพที่ 4.1 ค่าการยึดติงก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควคคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน.....	59
ภาพที่ 4.2 ค่าร้อยละการคืนตัวกลับก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควคคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน.....	59
ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานก่อนการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT	62
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานหลังการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT	62
ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานการเกิดร่องล้อและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานก่อนการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT	63
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานการเกิดร่องล้อและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานหลังการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT	64
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานการแตกร้าวและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสาน.....	65
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงของวัสดุเชื่อมประสานกับอุณหภูมิ.....	66
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการคลายแรงของวัสดุเชื่อมประสานกับอุณหภูมิ. 66	
ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของวัสดุเชื่อมประสานกับอุณหภูมิ.....	70
ภาพที่ 4.11 กราฟข้อมูลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควคคุมที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล.....	72
ภาพที่ 4.12 กราฟข้อมูลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล	73
ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเครียดสะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตและจำนวนรอบ.....	77
ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตกับจำนวนรอบ.....	79

ภาพที่ 4.15 แอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบการเกิดร่องล้อในสภาวะเปียก..... 80



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์คอนกรีต.....	16
ตารางที่ 3.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	42
ตารางที่ 3.2 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบ.....	43
ตารางที่ 3.3 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด.....	43
ตารางที่ 3.4 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม.....	44
ตารางที่ 4.1 สูตรผลิตพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์.....	55
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน.....	56
ตารางที่ 4.3 ค่าความเหน็ด Brookfield ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	60
ตารางที่ 4.4 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมของวัสดุมวลรวม.....	68
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวม.....	68
ตารางที่ 4.6 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม.....	69
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลที่จุด optimum binder content.	75
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ stiffness modulus โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม.....	76
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อในสภาวะแห้งและเปียก.....	79
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการทดสอบเพนิเทรชันและร้อยละของเพนิเทรชันเดิม.....	95
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการทดสอบจุดอ่อนตัว.....	95
ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการทดสอบการตั้งยัดที่อุณหภูมิ 13 °C ก่อนและหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT.....	96
ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการทดสอบความยืดหยุ่นกลับที่อุณหภูมิ 25 °C ก่อนและหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT.....	96
ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการทดสอบความหนืดบรูคฟิลด์.....	97
ตารางที่ ข.6 ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่น.....	97

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลการทดสอบจุดวาบไฟ.....	98
ตารางที่ ข.8 ข้อมูลการทดสอบการละลายในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน.....	98
ตารางที่ ข.9 ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน.....	99
ตารางที่ ข.10 ข้อมูลการทดสอบโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและการต้านทานการเกิดร่องล้อ.....	100
ตารางที่ ข.11 ข้อมูลการทดสอบโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและการต้านทานการเกิดร่องล้อหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT	101
ตารางที่ ข.12 ข้อมูลการทดสอบการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT และ PAV.....	102
ตารางที่ ค.1 ทดสอบความเหนียวบรูกฟิลด์ของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น.....	103
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลการทดสอบมาร์แชลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส.....	104
ตารางที่ ค.3 ข้อมูลการทดสอบมาร์แชลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียส.....	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (polymer modified asphalt) คือ ยางแอสฟัลต์เกรดพิเศษได้จากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ (asphalt cement) กับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เช่น SBS SBR EVA PE เป็นต้น เมื่อนำมาผสมเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (hot mix) จะให้สมบัติที่เหนือกว่าผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไปคือ มีความต้านทานต่อการล้า ต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร ต่อการบิตตัวระหว่างวัสดุมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน ต่อการหลุดลอก ความยืดหยุ่นสูงทั้งในอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำที่ดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ อีกทั้งไม่มีการไหลเยิ้มของวัสดุเชื่อมประสาน ดังนั้นยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์จึงถูกใช้ในการก่อสร้างผิวทางที่ต้องได้รับแรงกระทำสูงๆ เช่น สนามบิน สนามแข่งรถ บริเวณแยกที่มีการจราจรหนาแน่น เป็นต้น

พอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำมาผสมกับแอสฟัลต์ คือ SBS เนื่องจากสามารถผสมให้เข้ากับแอสฟัลต์ได้ดีกว่าพอลิเมอร์ตัวอื่น มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า แต่การใช้ SBS ก็มีข้อเสียเนื่องจากจุดหลอมเหลวของ SBS มีค่าสูงถึง 180 องศาเซลเซียส ทำให้ในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์และกระบวนการผสมระหว่างพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวมต้องใช้อุณหภูมิถึง 175-185 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะทำให้ยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์เกิดกลิ่นและควันเป็นจำนวนมาก ทำให้ผู้ผลิตและผู้รับเหมาก่อสร้างได้รับข้อร้องเรียนจากชุมชนใกล้เคียงในเรื่องกลิ่นและควันที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นการใช้อุณหภูมิในการผลิตและการผสมที่สูงนี้จะทำให้ต้องใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้นด้วย หากสามารถลดอุณหภูมิในการผลิตและอุณหภูมิผสมของยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ได้ จะทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องการเกิดควันและลดปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงได้ ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของสารเติมแต่งที่สามารถลดอุณหภูมิในการผลิตและอุณหภูมิผสมของยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ การหาปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่งที่จะทำใหยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์อยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตนั้น

1.2 วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

ศึกษาผลของการลดอุณหภูมิในกระบวนการผสมระหว่างพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์และวัสดุมวลรวมต่อสมบัติเชิงกล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

เตรียมยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์แบบผสมอ่อน โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของยางมะตอย พอลิเมอร์ และสารเติมแต่งเพื่อให้ได้สูตรผลิตที่เหมาะสมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย (โดยละเอียด)

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมวัสดุ สารเคมีได้แก่วัสดุมวลรวมหินแกรนิต (aggregate) ยางมะตอยเกรด 60/70 พอลิเมอร์ สารเติมแต่ง และอุปกรณ์การทดลอง
3. ผลิตยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์แบบผสมอ่อน โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของยางมะตอย พอลิเมอร์ และสารเติมแต่งเพื่อให้ได้สูตรผลิตที่เหมาะสม
4. ทดสอบสมบัติของยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์แบบผสมอ่อนตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
5. ทดสอบสมบัติการไหลของยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์แบบผสมอ่อน (rheological properties) โดยใช้เครื่องมือ dynamic shear rheometer (DSR) และ bending beam rheometer (BBR)
6. ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต (การผสมร่อนระหว่างมวลรวมกับพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์) แบบผสมอ่อน
 - เตรียมตัวอย่างพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมอ่อน และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์แอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 150 และ 180 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยใช้ปริมาณยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ร้อยละ 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 โดยน้ำหนัก

- ทดสอบเสถียรภาพและการไหล (stability และ flow ability) โดยวิธีการทดสอบมาร์แชล (marshall) เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์
- ทดสอบการต้านทานแรงดึงทางอ้อม (indirect tensile stiffness modulus test)
- ทดสอบการยุบตัวแบบไดนามิก (dynamic creep test)
- ทดสอบการต้านทานการเกิดร่องล้อ โดยเครื่อง hamburg wheel tracking test
- เปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งหมดระหว่างพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมอุ่น และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์แอสฟัลต์คอนกรีต

7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์แบบผสมอุ่นที่มีอุณหภูมิใช้งานในช่วง 150–160 องศาเซลเซียส และมีสมบัติเชิงกลตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แอสฟัลต์ (asphalt) [1]

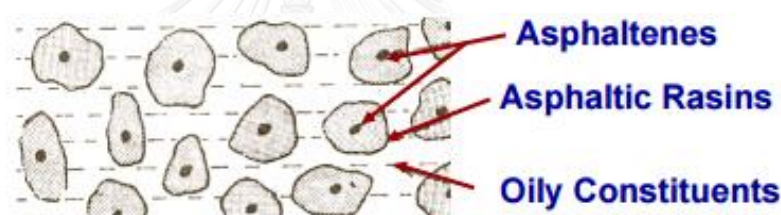
แอสฟัลต์ คือ วัสดุเชื่อมประสาน (binder) สีนํ้าตาลเข้มถึงดำ มีบิทูเมน (bitumen) เป็นส่วนประกอบหลัก เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ บิทูเมนเป็นสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300-5,000 หน่วย มีคุณสมบัติยึดประสาน มีสภาพเป็นของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือเหนียวหนืด มีสีดำหรือค่อนข้างดำ สามารถละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) และนอกจากโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนแล้ว แอสฟัลต์ยังมีองค์ประกอบของธาตุอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์และนิกเกิล สัดส่วนของส่วนประกอบเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามแหล่งน้ำมันดิบ ทำให้สมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์แตกต่างกัน แอสฟัลต์สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือได้จากการผลิตแอสฟัลต์จึงจัดเป็นวัสดุปิโตรมิเนส ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิปกติ เมื่อให้ความร้อนจะมีลักษณะอ่อนและไหลได้ จึงสามารถจัดแอสฟัลต์ว่าเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก และเมื่อนำมาผสมกับวัสดุมวลรวมที่สถานะของเหลวและปล่อยให้เย็นตัวลง จะมีลักษณะแข็งและยึดมวลรวมไว้ด้วยกัน เกิดเป็นชั้นผิวจราจรของผิวทาง ดังนั้นจึงนิยมใช้แอสฟัลต์เป็นวัสดุปูผิวทาง

มีการนำแอสฟัลต์มาใช้งานครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1802 โดยชาวฝรั่งเศสนำแอสฟัลต์หินซึ่งเป็นแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมาทำผิวทางเดิน จนถึงปี ค.ศ. 1870 มีการนำแอสฟัลต์มาใช้ในการก่อสร้างผิวทางเป็นครั้งแรกในเมืองนิวยอร์ก รัฐนิวยอร์ก ต่อมาในปี ค.ศ. 1876 ได้ใช้แผ่นแอสฟัลต์ผสมร้อนกับทรายละเอียดเป็นวัสดุก่อสร้างผิวทางในกรุงวอชิงตันดีซี จนกระทั่งปี ค.ศ. 1902 ได้มีการกลั่นแอสฟัลต์จากน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเรียกว่า “แอสฟัลต์ซีเมนต์” นำไปสู่การพัฒนาทางอุตสาหกรรมแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับใช้ในการก่อสร้าง

2.1.1 แบบจำลององค์ประกอบโมเลกุลของวัสดุแอสฟัลต์

ปัจจุบันมีแบบจำลองที่ใช้อธิบายองค์ประกอบโมเลกุลของแอสฟัลต์อยู่ 2 แบบจำลอง แบบจำลองแรกเรียกว่า แบบจำลอง micellar เข้าใจกันว่าเมื่อวิเคราะห์ทางกายภาพ แอสฟัลต์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ แอสฟัลทีน เรซินและน้ำมัน ทำให้แบบจำลองนี้ได้รับการยอมรับในการใช้อธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์มาเป็นเวลานาน จนกระทั่งคณะวิจัยของ strategic highway research program (SHRP) ของรัฐบาลกลางอเมริกันได้วิจัยพบแบบจำลองที่สามารถเข้าใจและอธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์ได้ชัดเจนมากขึ้น เรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลอง SHRP

แบบจำลอง micellar อธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์ว่าประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ แอสฟัลทีน เรซินและน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบโครงสร้างของวัสดุแอสฟัลต์ [2]

- แอสฟัลทีนมีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลจนถึงดำ เมื่อถูกความร้อนจะไม่หลอมเหลว แต่จะติดไฟได้เมื่อได้รับความร้อนสูง ไม่ละลายในเฮปเทน อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจนมากกว่า 0.8
- เรซินมีลักษณะแข็งเปราะ ที่อุณหภูมิต่ำสามารถบดให้ละเอียดได้ จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ละลายได้เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 93.3°C มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจนระหว่าง 0.6-0.8
- น้ำมันเป็นส่วนที่เหลือจากการแอสฟัลทีนและเรซินมีลักษณะเป็นของเหลวข้นเหมือนน้ำมันหล่อลื่น มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงสีน้ำตาลปนแดง มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจนน้อยกว่า 0.6

แอสฟัลต์จะเป็นส่วนประกอบหลักของแอสฟัลต์ทุกชนิด อยู่ในรูปของสารแขวนลอย และกระจายอยู่ในน้ำมันซึ่งเป็นตัวกลาง โดยมีเรซินเป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้แอสฟัลต์จับตัวเป็นก้อน จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติด้านการยึดเกาะและการยึดตัว ส่วนประกอบของน้ำมันจะมีผลต่อความแข็งหรืออ่อนของแอสฟัลต์ จึงเป็นตัวที่กำหนดความหนืดและการไหลของแอสฟัลต์ โดยทั่วไปวัสดุแอสฟัลต์จะมีความหนาแน่นระหว่าง $1.01-1.04 \text{ g/cm}^3$ และค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 0.95-1.05

แบบจำลอง SHRP ได้เสนอว่า แอสฟัลต์ประกอบด้วยส่วนผสมที่กลมกลืนของหลายโมเลกุลที่แตกต่างกัน อาจแยกได้เป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ โมเลกุลที่มีขี้ผึ้งและโมเลกุลที่ไม่มีขี้ผึ้ง โครงข่ายของโมเลกุลที่มีขี้ผึ้งจะยึดกันอยู่อย่างไม่แข็งแรง ทำให้วัสดุแอสฟัลต์มีลักษณะยืดหยุ่น (elastic property) โมเลกุลที่มีขี้ผึ้งจะกระจายอยู่ทั่วไปในแอสฟัลต์ เมื่อถูกทำให้ร้อน แรงยึดเกาะที่อ่อนแออยู่แล้วจะถูกทำลายลง ทำให้แอสฟัลต์มีลักษณะเป็นของไหล ณ อุณหภูมิสูง แอสฟัลต์ที่ดีต้องมีการถ่วงดุลที่เหมาะสมระหว่างโมเลกุลที่มีขี้ผึ้งกับโมเลกุลไม่มีขี้ผึ้ง นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลที่แท้จริงของโมเลกุลไม่มีขี้ผึ้งยังมีความสำคัญต่อพฤติกรรมของวัสดุแอสฟัลต์ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับแอสฟัลต์ที่มีโมเลกุลที่มีขี้ผึ้งมากเกินไปจะแข็งเปราะง่าย จึงเกิดปัญหาการแตกร้าว ในขณะที่เดียวกันหากแอสฟัลต์มีโมเลกุลที่ไม่มีขี้ผึ้งมากเกินไปหรือมีโมเลกุลที่ไม่มีขี้ผึ้งที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกินไป ก็จะเกิดปัญหาการอ่อนตัวของแอสฟัลต์หรือนำไปสู่ปัญหาการเกิดร่องล้อ (rutting) บนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ปัจจุบันมีการนำแอสฟัลต์มาใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติที่สำคัญ 6 ประการ ดังนี้

- สมบัติในการยึดและประสาน (cementing)
- สมบัติการป้องกันการซึมของน้ำ (water proofing)
- สมบัติที่เปลี่ยนเป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อถูกความเย็น
- สมบัติในการคงทนต่อสภาวะแวดล้อม (durability) เช่น กรดและด่างอ่อนๆ
- สมบัติด้านการเป็นฉนวน (non-conducting)
- สมบัติด้านการยืดหยุ่น (elasticity)

จากสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำแอสฟัลต์มาใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง โดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นตัวประสานหรือยึดเกาะวัสดุต่างๆ ในการทำผิวทาง นอกจากนี้ยังใช้แอสฟัลต์ในการ

ลาดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ผิวหน้าเขื่อนดินเพื่อป้องกันการซึม และยังใช้ในวงการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ทำสีกันสนิม กระจาดกันซึม กระจับปุยยาง เคลือบภายในท่อน้ำ เป็นต้น

2.2 ประเภทของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง

2.2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (asphalt cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นสารหรือผลิตภัณฑ์พื้นฐานหลักที่เหลือจากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ เนื่องจากไม่ระเหย มีลักษณะกึ่งอ่อนกึ่งแข็งที่อุณหภูมิปกติ มีสีดำหรือสีน้ำตาลปนดำ ในการนำไปใช้งานจะต้องต้มให้เหลวโดยใช้อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์ซีเมนต์แบ่งเกรดต่างๆ ได้ 3 ชนิด ดังนี้

- เกรดเพนิเทรชัน (penetration grade) จะแบ่งเกรดตามความแข็งของแอสฟัลต์ซีเมนต์ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการแบ่งเกรดแอสฟัลต์ซีเมนต์ เช่น 40/50 (แข็ง), 60/70 (ปานกลาง), 80/100 (อ่อน) เป็นต้น เพื่อให้สามารถเลือกใช้ได้เหมาะสมกับงานและสภาพอากาศของแต่ละพื้นที่ เช่น ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน ควรใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เกรดค่อนข้างต่ำ คือ 60/70 โดยค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ซีเมนต์ คือ จำนวนหน่วยของระยะ (1 หน่วย = 0.1 มิลลิเมตร) ที่เข็มมาตรฐานซึ่งถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัม จมลงในแอสฟัลต์เป็นเวลา 5 วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- เกรดความหนืด (viscosity grade) แบ่งเกรดแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 60°C มี 2 ชุด คือแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20 และ AC-40 ค่าตัวเลขแสดงถึงความหนืดที่เป็นร้อยละของพอยส์ (poise) และแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000 และ AR-16000 ค่าตัวเลขแสดงถึงความหนืดในหน่วยพอยส์หลังการทดลอง thin film oven test (TFOT)
- เพอร์ฟอร์แมนซ์เกรด (performance grade, PG) เป็นการแบ่งเกรดตามวิธีของ SHRP เพื่อเลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ให้เหมาะสมกับสภาพภูมิศาสตร์ ภูมิอากาศและอุณหภูมิผิวทาง การกำหนดเกรดของ SHRP เป็นการจำลองขั้นตอนวิกฤต 3 ขั้นตอนตลอดอายุการใช้ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ขั้นตอนแรกเป็นการจำลองสภาวะการขนส่งและการจัดเก็บ โดย

ทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์หลังผ่านการทำ TFOT ขั้นตอนที่สองเป็นการจำลองสภาวะการผสมกับวัสดุมวลรวม โดยทดสอบสมบัติหลังการทำ rolling thin film oven test (RTFOT) ขั้นตอนที่สามเป็นการจำลองอายุการใช้งานในช่วง 5-10 ปี โดยทดสอบสมบัติหลังการทำ RTFOT และ pressure aging vessel (PAV) การแบ่งเกรดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ของ performance grade เช่น PG 70-22 ตัวเลข 70 คืออุณหภูมิสูงสุดที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีสมบัติทางกายภาพที่เพียงพอต่อการใช้งาน ส่วนตัวเลข -22 คืออุณหภูมิต่ำสุดที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีสมบัติทางกายภาพที่เพียงพอต่อการใช้งานได้เช่นกัน

2.2.2 แอสฟัลต์ชนิดเหลว (liquid asphalt)

2.2.2.1 คัทแบคแอสฟัลต์ (cutback asphalt) เป็นการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ไปละลายในตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำมันต่างๆ น้ำมันที่ใช้เป็นสารละลายนี้เรียกรวมว่า culter stock แอสฟัลต์ชนิดนี้มีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิธรรมดา แต่จะข้นหรือเหนียวขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดแอสฟัลต์ และ culter stock ตลอดจนสัดส่วนระหว่างแอสฟัลต์กับ culter stock การใช้งานแอสฟัลต์ชนิดนี้ เมื่อบดอัดแล้วจะปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยไป เหลือเพียงแต่แอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่ประสานวัสดุมวลรวมเข้าด้วยกัน โดยคัทแบคแอสฟัลต์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ตามชนิดตัวทำละลายคือ

- ชนิดแข็งตัวเร็ว (rapid curing, RC) ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลายที่ระเหยเร็ว ได้แก่ แนฟทา แอสฟัลต์ชนิดนี้จะแข็งตัวเร็ว ส่วนมากใช้กับงาน surface treatment
- ชนิดแข็งตัวเร็วปานกลาง (medium curing, MC) ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลายที่ระเหยเร็วปานกลาง ได้แก่ คีโรซีน จะมีการแข็งตัวช้ากว่าชนิด RC การใช้งานต้องใช้เวลาในการบ่มตัวนาน ส่วนมากใช้กับงาน prime coat และ tack coat เพื่อให้ MC มีโอกาสซึมลงไปได้ผิวชั้นรองผิวทาง (base course) มากขึ้น
- ชนิดแข็งตัวช้า (slow curing, SC) ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับน้ำมันที่ระเหยช้า ได้แก่ road oil ส่วนมากใช้ในงานซ่อม (patching) แต่ไม่นิยมใช้ในประเทศไทย

2.2.2.2 อิมัลชันแอสฟัลต์ (emulsion asphalt) คือแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายอยู่ในน้ำที่มีสารอิมัลชัน (emulsifier) ผสมอยู่เล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.25-2 โดยน้ำหนัก สารอิมัลชันเป็นตัวกำหนดสมบัติของอิมัลชันแอสฟัลต์ตามชนิดประจุ คือ ชนิดประจุไฟฟ้าลบ (anionic) ชนิดประจุไฟฟ้าบวก (cationic) แต่ในการก่อสร้างจะใช้ชนิดประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบ ส่วนในงานสร้างถนนนิยมใช้ชนิดประจุไฟฟ้าบวก เนื่องจากหินที่ใช้ในการก่อสร้างถนนมีประจุที่ผิวเป็นประจุลบ เนื่องจากแอสฟัลต์ชนิดนี้มีน้ำเป็นส่วนผสม จึงสามารถนำไปใช้งานโดยผสมกับส่วนอื่นที่เป็นน้ำได้ และยังสามารถทำงานในขณะที่ยังสดๆ เปียกน้ำได้ โดยอิมัลชันแอสฟัลต์สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ

- ชนิดก่อตัวเร็ว (rapid setting, RS และ CRS)
- ชนิดก่อตัวปานกลาง (medium setting, MS และ CMS)
- ชนิดก่อตัวช้า (slow setting, SS และ CSS)

อักษรตัว C ข้างหน้าของแต่ละชนิด หมายถึงอิมัลชันแอสฟัลต์ชนิดประจุบวก ถ้าไม่มีตัวอักษร C หมายถึงอิมัลชันแอสฟัลต์ประจุลบ

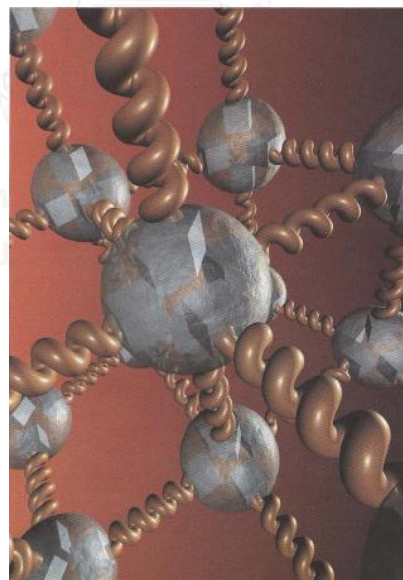
2.3 พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (polymer modified asphalt, PMA) [3]

เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมสารพอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูงเพื่อให้พอลิเมอร์กระจายตัวและคงสภาพอยู่ในแอสฟัลต์ พอลิเมอร์คือสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มวลโมเลกุลสูงเกิดจากการรวมตัวของสารโมเลกุลเล็กๆ ที่เรียกว่ามอนอเมอร์จำนวนมากเกิดพันธะเชื่อมต่อกัน โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์สามารถแยกออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์และพลาสติกอีลาสโตเมอร์

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomer) หมายถึง วัสดุที่แสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นตัวได้ นั่นคือที่อุณหภูมิห้องวัสดุดังกล่าวสามารถรองรับการยืดตัวได้อย่างน้อยสองเท่าของความยาวเดิมด้วยแรงกระทำที่ต่ำและสามารถปรับตัวสู่สภาพเดิมได้เองเมื่อปลดปล่อยแรงกระทำ ได้แก่ SBR SIS SBES และ SBS โดย SBS เป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งได้มาจากการก่อตัวขึ้นของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีน (styrene) และบิวทาไดอีน (butadiene) โดยทั่วไปจะมี 2 ขั้นตอนเกิดใน

กระบวนการโดยขั้นตอนแรกสไตรีนจะเกิดพอลิเมอร์เพื่อก่อตัวเป็น พอลิสไตรีนบล็อก (polystyrene block) ที่มีมวลโมเลกุลที่ต้องการ ขั้นตอนที่สอง บิวทาไดอินจะเกิดพอลิเมอร์เพื่อก่อตัวขึ้นเป็นพอลิบิวทาไดอินบล็อก (polybutadiene block) ที่มีมวลโมเลกุลตามต้องการ จากนั้นทั้งสองบล็อกจะเกิดพอลิเมอร์รวมกันอีกครั้งหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 2.2 การผลิต SBS หากได้รับการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ อย่างเหมาะสม ผู้ผลิตสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ผสมพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ที่มีสมบัติทางกายภาพที่เป็นที่ต้องการคือ มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำค่อนข้างคงที่และไม่สูงเกินค่าวิกฤติที่จะเกิดการแตกกร้าว (thermal cracking) ส่วนที่อุณหภูมิสูงก็มีความยืดหยุ่นเพียงพอที่สามารถป้องกันการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (permanent deformation)

พลาสติกเมอร์ (plastomer) เป็นวัสดุออร์แกนิกที่มีมวลโมเลกุลสูงที่สามารถได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ นอกจากนี้พลาสติกเมอร์ยังสามารถก่อตัวโครงข่ายสามมิติที่แข็งแกร่งทนทานต่อการอ่อนตัวได้และมีกำลังสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรกภายใต้การรับน้ำหนัก



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ประเภทพลาสติกเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง [4]

ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

พอลิเมอร์	ข้อดี	ข้อเสีย
พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE)	-ด้านทานที่อุณหภูมิสูง -ด้านทานการเสื่อมสภาพ -ค่าโมดูลัสสูง -ราคาถูก	-การกระจายตัวในแอสฟัลต์ต่ำ -ต้องใช้ปริมาณพอลิเมอร์สูงเพื่อให้ได้สมบัติที่ดี -ไม่ช่วยในเรื่องความยืดหยุ่น
พอลิพโรพิลีน (polypropylene, PP)	-ไม่ทำให้ความหนืดสูงขึ้นมาก -เพิ่มจุดอ่อนตัวของยาง	-แยกตัวออกจากแอสฟัลต์ -ไม่ช่วยในเรื่องความยืดหยุ่น -เกิดการแตกที่อุณหภูมิต่ำ
เอทิลไวนิลอะซิเตต (ethylene-vinyl-acetate, EVA)	-เข้ากับแอสฟัลต์ได้ -ไม่ทำให้ความหนืดสูงขึ้นมาก -มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิทั้งในการจัดเก็บและการผลิต	-ไม่ช่วยในเรื่องความยืดหยุ่น
สไตรีนบิวทาไดอีน (styrene-butadiene, SBS)	-ด้านทานการไหลและการเสียด รูปที่อุณหภูมิสูง -ด้านทานการเกิดร่องล้อ -เพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มความยืดหยุ่น -เข้ากันกับแอสฟัลต์ได้ดี	-ราคาสูง -ทำให้แอสฟัลต์มีความหนืดสูงขึ้น -ด้านทานความร้อนได้ต่ำและเกิดออกซิเดชันได้ง่ายกว่าโพลีโอเลฟิน -เหมาะกับแอสฟัลต์ที่มีส่วนประกอบของอะโรมาติกสูงแอสฟัลต์ที่ต่ำ
ยางธรรมชาติ (natural rubber)	-ป้องกันการเกิดร่องล้อ -มีค่าการดึงยึดและความยืดหยุ่นสูง	-แยกตัวออกจากแอสฟัลต์ -ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ง่าย

2.4 แอสฟัลต์ผสมอุ่น (warm mix asphalt) [5]

แอสฟัลต์ผสมอุ่นคือชื่อโดยทั่วไปของเทคโนโลยีใดก็ตามที่สามารถลดอุณหภูมิผสมและการก่อสร้างผิวทางแบบผสมร้อน โดยสามารถลดอุณหภูมิลงมาได้ประมาณ 20 – 50 องศาเซลเซียส จุดประสงค์ของเทคโนโลยีแอสฟัลต์ผสมอุ่น คือการลดความเหนียวของแอสฟัลต์แต่ยังคงสามารถเคลือบหินได้อย่างดีที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า และแอสฟัลต์ผสมอุ่นสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการบดอัดได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุต่ำกว่าประสิทธิภาพการกั้นน้ำซึมดีขึ้น ลดการเสื่อมสภาพของยางและช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น การต้านทานการเกิดรอยแตกร้าว การพังทลายเนื่องจากน้ำ เป็นต้น

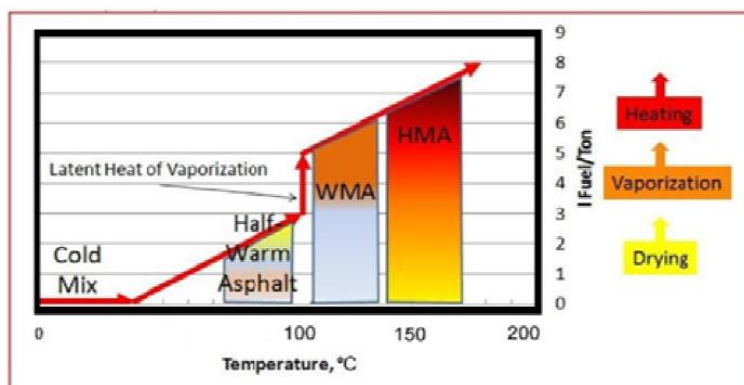
ประโยชน์ของการใช้แอสฟัลต์ผสมอุ่นแบ่งออกเป็น 2 ด้าน คือ

2.4.1 สมบัติเชิงกล

- ปริมาณโพรงอากาศ (void content) ลดลง 1 % และยิ่งช่วยให้ทนการหลุดล่อนจากน้ำได้ดีกว่า
- การผลิตที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ลดการเสื่อมสภาพเนื่องจาก short term aging ยืดอายุการใช้งานทำให้สมบัติต่างๆ คงอยู่ได้นานขึ้น
- สามารถต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีเทียบเท่าแอสฟัลต์ผสมร้อน
- สามารถทำงานได้มากขึ้น เพราะไม่ต้องกังวลเรื่องอุณหภูมิลดลงจากระยะทางขนส่งที่ไกล เนื่องจากการสูญเสียความร้อนของส่วนผสมที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะช้ากว่าการสูญเสียความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า และมีเวลาสำหรับบดทับมากขึ้น
- สามารถบดทับได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแอสฟัลต์ผสมอุ่นมีความเหนียวลดลงเนื่องการเติมสารผสมเพิ่ม หรือการใช้เทคนิคของแอสฟัลต์ผสมอุ่น

2.4.2 สิ่งแวดล้อม

- ผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ลดการใช้เชื้อเพลิงได้ 1-2 ลิตร/ตัน โดยแอสฟัลต์ผสมอุ่นใช้เชื้อเพลิงในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต 5-6 ลิตร/ตัน ส่วนแอสฟัลต์ผสมร้อนใช้เชื้อเพลิงในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต 6-8 ลิตร/ตัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 อุณหภูมิและปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

- สามารถลดการปล่อยก๊าซ CO₂, CO, NO_x, SO₂ เป็นต้น ซึ่งเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นก๊าซเรือนกระจก
 - ลดการรับมลพิษของเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานและชุมชนรอบข้าง (ลดควันและกลิ่นต่างๆเพราะใช้อุณหภูมิต่ำ)
 - ลดการสึกหรอของโรงผสม เนื่องจากใช้ความร้อนต่ำลง
 - เปิดการจราจรได้เร็วขึ้น เนื่องจากทำการบดอัดที่อุณหภูมิต่ำ

เทคนิคหรือกระบวนการหลักๆ ของแอสฟัลต์ผสมอุ่นมี 4 ประเภท ดังนี้ [6]

- organic additives สารอินทรีย์เหล่านี้รู้จักกันในนามของ “ตัวช่วยให้ยางไหล” ใช้เพื่อลดความหนืดของยางมะตอย ได้แก่ SASOBIT, ASPHALTAN, LICOMONT BS 100, REDISSET WMX
- สารตัวเติมทางเคมี (chemical additives) เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้เพื่อลดความตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสของหินกับยางมะตอย เป็นตัวหล่อลื่นหรือลดความเสียดทานภายใน ใช้ในอัตรา 0.2 – 0.75 โดยน้ำหนักของยางมะตอย สามารถลดอุณหภูมิได้ 28 – 50 องศาเซลเซียส ได้แก่ CECABASE®RT, EVOTHERM 3G, EVOTHEM ET, REVIX, ECOMAC, CWM
- foaming techniques การผลิตโฟมแอสฟัลต์ ทำได้โดยการพ่นน้ำปริมาณเล็กน้อยเข้าไปในแอสฟัลต์ที่ร้อน โดยใช้หัวฉีดหรือวัสดุที่อมน้ำ เช่น หินพูน zeolite เมื่อน้ำระเหยจะมีการขยายตัวถึง 1,670 เท่า เมื่อน้ำถูกพ่นกระจายในวัสดุผสมร้อนที่มี

อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ จึงทำให้น้ำกลายเป็นไอและเกิดการขยายตัวของน้ำในยางร้อนๆ ส่งผลให้ความหนืดของยางลดลง ตัวอย่างของสารเติมแต่งประเภทนี้คือ ASPHA-MIN, ADVERA, EVOTHERM DAT โดยจะผสมสารเหล่านี้ในหินก่อนแล้วจึงเติมแอสฟัลต์ทีหลัง

- hybrid technologies เป็นการผสมตั้งแต่ 2 เทคโนโลยีขึ้นไป เช่น เทคนิค LEA (low energy asphalt) โดยเทคนิคนี้จะใช้ additive และใช้ foaming techniques ร่วมกัน หลักการคือ หินขนาดใหญ่จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120-150 องศาเซลเซียส แล้วนำไปผสมกับยางที่มีการเติมสารเติมแต่ง จนยางสามารถเคลือบหินได้ทั้งหมดแล้วจึงนำหินใหญ่ไปผสมกับหินฝุ่นที่เปียก เมื่อน้ำสัมผัสกับหินขนาดใหญ่ที่เคลือบด้วยยางที่มีอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดไอน้ำและโฟมแอสฟัลต์ และเคลือบหินฝุ่นไปด้วย ผลที่ได้จะทำให้สามารถลดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

2.5 การทดสอบแบบไดนามิกเชียร์รีโอมิเตอร์ (dynamic shear rheometer, DSR) [1]

เครื่องไดนามิกเชียร์รีโอมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้หาสมบัติเกี่ยวกับพฤติกรรมหนืดและยืดหยุ่นของวัสดุเชื่อมประสาน โดยทำการวัดค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อน (complex shear modulus, G^*) และค่ามุมเฟส (phase angle, δ)

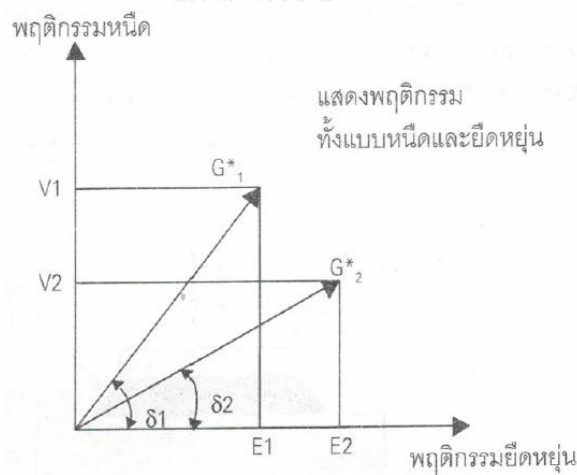
ค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อน คือค่าความต้านทานรวมของวัสดุที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับแรงเฉือนกระทำซ้ำๆ ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่ยืดหยุ่นซึ่งสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ และอีกส่วนคือส่วนที่หนืด ซึ่งไม่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิม

ค่ามุมเฟส คือดัชนีของปริมาณสัมพัทธ์ของการเปลี่ยนแปลงทั้งที่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้และที่ไม่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิม

ค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและค่ามุมเฟสเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ ที่อุณหภูมิสูงๆ วัสดุเชื่อมประสานมีพฤติกรรมเหมือนของไหลหนืด ซึ่งไม่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ ค่ามุมเฟสเท่ากับ 90 องศา แต่ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ค่ามุมเฟสเท่ากับ 0 องศา ซึ่งวัสดุเชื่อมประสานจะมี

พฤติกรรมเหมือนของแข็งยืดหยุ่น ซึ่งสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ภายใต้อุณหภูมิผิวทางปกติวัสดุเชื่อมประสานจะมีพฤติกรรมเป็นทั้งของเหลวหนืดและของแข็งยืดหยุ่น จึงจัดเป็นวัสดุประเภทหนืดยืดหยุ่น (viscoelastic material) ด้วยเหตุนี้การศึกษาพฤติกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์จึงควรพิจารณาทั้งค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและค่ามุมเฟส

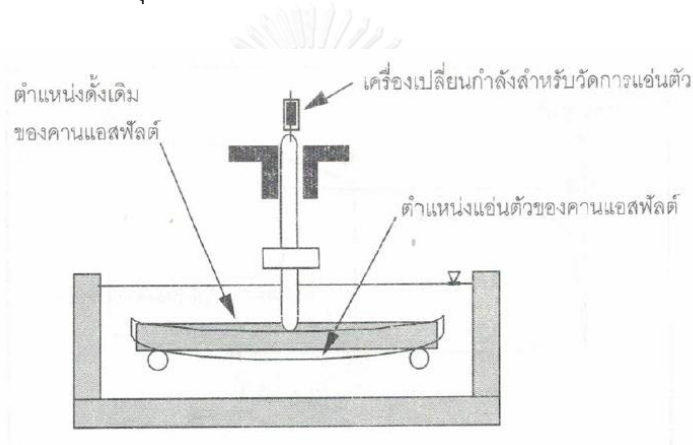
จากรูปที่ 2.4 ค่า G^*_1 และ G^*_2 ตามความยาวลูกศรแสดงค่าโมดูลัสเชิงซ้อนของวัสดุเชื่อมประสานชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าวัสดุเชื่อมประสานทั้งสองชนิดจะมีค่าโมดูลัสเชิงซ้อนเท่ากัน เนื่องจากความยาวลูกศรเท่ากัน แต่มีค่ามุมเฟสต่างกัน จึงทำให้วัสดุเชื่อมประสานชนิดที่สองซึ่งมีค่ามุมเฟสน้อยกว่า สามารถยืดหยุ่นได้มากกว่าวัสดุเชื่อมประสานชนิดที่ 1



รูป 2.4 พฤติกรรมแบบหนืดยืดหยุ่นของแอสฟัลต์

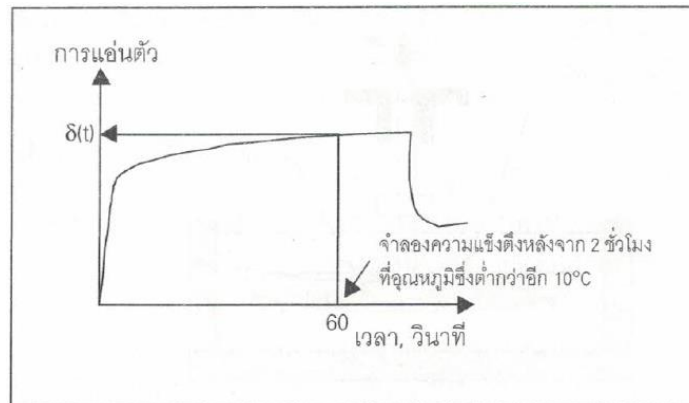
2.6 การทดสอบแบบเบนด์ง์บีร์โอมิเตอร์ (bending beam rheometer, BBR) [1]

การทดสอบแบบเบนด์ง์บีร์โอมิเตอร์ ใช้ในการวัดค่าความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่ำ การทดสอบนี้จะวัดความแข็งของวัสดุเชื่อมประสานโดยเตรียมตัวอย่างเป็นรูปคานขนาดเล็กภายใต้แรงคืบที่ค่อยๆ กระทำ การใช้แรงคืบเพื่อจำลองสภาพหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่เล็กน้อยในผิวทางเมื่ออุณหภูมิลดลง หลักการทำงานของเครื่องแสดงในรูปที่ 2.5 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินความแข็งตึงที่อุณหภูมิต่ำ ได้แก่ คือความแข็งตึงด้านการคืบ (creep stiffness, S) เป็นค่าที่วัดความต้านทานของแอสฟัลต์ที่มีต่อแรงกระทำคงที่ และค่าอัตราการคืบ (m) เป็นค่าที่วัดการเปลี่ยนแปลงความแข็งของวัสดุเชื่อมประสานเมื่อมีแรงมากระทำ

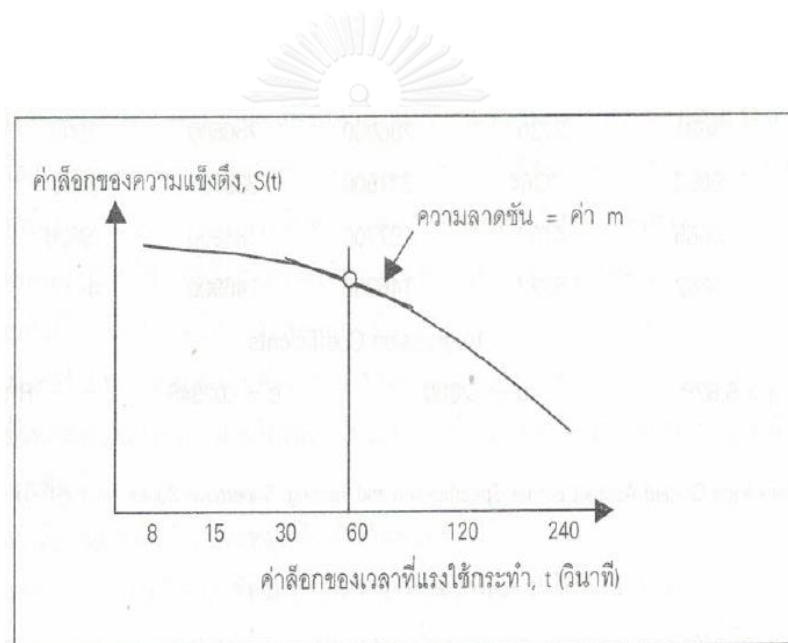


รูปที่ 2.5 หลักการของเครื่องเบนด์ง์บีร์โอมิเตอร์

ในการทดสอบจะให้แรงกระทำ 980 มิลลินิวตันกับตัวอย่างวัสดุเชื่อมประสานเป็นเวลา 240 วินาที ทำการวัดการแอนตัวของตัวอย่าง และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแอนตัวของตัวอย่างกับเวลา ดังแสดงในรูป 2.6 เพื่อหาค่าความแข็งตึงด้านการคืบ ในการหาค่าอัตราการคืบจะทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งตึงด้านการคืบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ค่าความแข็งตึงด้านการคืบที่ต้องการคือ ค่าที่ได้เมื่อให้แรงกระทำต่อวัสดุเชื่อมประสานเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้ในการออกแบบผิวทาง อย่างไรก็ตามนักวิจัยของ SHRP พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบอีก 10 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความแข็งตึงด้านการคืบที่เท่ากันได้โดยใช้เวลาในการทดสอบเพียง 60 วินาที ซึ่งทำให้สามารถลดเวลาในการทดสอบได้



รูปที่ 2.6 วิธีหาค่าความแข็งตึงด้านการคืบ



รูปที่ 2.7 วิธีหาค่าอัตราการคืบ

2.7 วัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน (hot mix asphalt, HMA) [7]

แอสฟัลต์คอนกรีตคือ วัสดุที่ใช้ปูผิวถนนซึ่งประกอบด้วยวัสดุเชื่อมประสานประเภทแอสฟัลต์ (binder) และมวลรวม (aggregate) วัสดุประสานเชื่อมประเภทแอสฟัลต์ จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเพื่อยึดอนุภาคของมวลรวมทั้งหลายให้อยู่รวมกันเป็นก้อนอัดแน่นและทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันน้ำไม่ให้ซึมผ่านส่วนผสมด้วย เมื่อมวลรวมยึดกันแน่นก็จะทำหน้าที่เป็นโครงหินที่แข็งแรง

เพื่อให้กำลัง และความเหนียวแน่นแก่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต สมรรถภาพของส่วนผสมจะขึ้นอยู่กับสมบัติของส่วนประกอบแต่ละอย่าง และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นร่วมกันขององค์ประกอบในส่วนผสมนั้น

คุณสมบัติ 3 ประการของวัสดุเชื่อมประสานที่มีความสำคัญต่อสมรรถภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ ความไวต่ออุณหภูมิ ความหนืดยืดหยุ่น และความเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน

ความไวต่ออุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานคือ วัสดุเชื่อมประสานจะมีความแข็งตึงกว่าเมื่ออุณหภูมิเย็นกว่า ซึ่งเป็นเหตุผลที่ต้องทำการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามอุณหภูมิตดสอบที่ระบุไว้ ถ้าปราศจากอุณหภูมิตดสอบที่ระบุไว้ ก็ไม่สามารถแปล

ความหมายของผลการทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุผลอย่างเดียวกันพฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานขึ้นอยู่กับเวลาที่แรงมากระทำ นั่นคือวัสดุเชื่อมประสานจะแข็งตึงกว่าเมื่อมีแรงมากระทำในเวลาที่ยาวกว่า พฤติกรรมของวัสดุเชื่อมประสานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และช่วงเวลาของแรงที่กระทำ หมายความว่าองค์ประกอบสองอย่างนี้สามารถนำมาใช้แทนกันได้ เช่นอัตราการให้แรงกระทำอย่างช้าๆ สามารถเลียนแบบได้ด้วยการใช้อุณหภูมิสูงๆ และอัตราการให้แรงกระทำอย่างรวดเร็ว สามารถเลียนแบบได้ด้วยการใช้อุณหภูมิต่ำๆ

วัสดุเชื่อมประสานเป็นวัสดุหนืดยืดหยุ่น (viscoelastic material) เพราะสามารถแสดงคุณสมบัติได้ทั้งความหนืด และความยืดหยุ่นในเวลาเดียวกัน ที่อุณหภูมิสูงๆ เช่นที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C วัสดุเชื่อมประสานจะปฏิบัติตัวเกือบเหมือนของเหลวหนืด ซึ่งแสดงความข้นเหลวของตัวหล่อลื่นดังเช่นน้ำมันเครื่อง แต่ที่อุณหภูมิต่ำ เช่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C แอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งยืดหยุ่นสามารถคืนรูปร่างเดิมได้ หลังจากที่เอาแรงกระทำออกแล้ว ส่วนที่อุณหภูมิปานกลางซึ่งพบกันในโครงสร้างถนนทั่วไป วัสดุเชื่อมประสานจะมีคุณสมบัติเป็นทั้งของเหลวหนืดและของแข็งยืดหยุ่น

เนื่องจากวัสดุเชื่อมประสานเป็นสารอินทรีย์จึงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และส่วนประกอบของโมเลกุลแอสฟัลต์ ออกซิเดชันทำให้แอสฟัลต์เปราะง่ายกว่าเดิม และนำไปสู่สภาพแข็งกระด้างหรือการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน ออกซิเดชันจะเกิดได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น การแข็งกระด้าง

มักเกิดขึ้นมากในช่วงเวลาการผลิตวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน ในขณะที่วัสดุเชื่อมประสานได้รับความร้อน เพื่อสะดวกต่อการผสม และการบดทับ ซึ่งเหตุผลที่ต้องพิจารณาออกซิเดชันให้มากขึ้น เมื่อนำวัสดุเชื่อมประสานไปใช้ในสภาพอุณหภูมิอากาศที่ร้อน และแห้งแล้ง

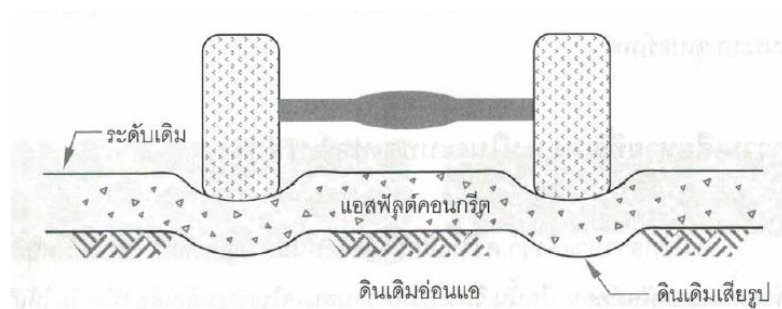
2.7.1 การเสียรูปของแอสฟัลต์คอนกรีต

หน่วยแรงหลัก 2 ประการจะส่งผ่านไปยังวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน เมื่อมีน้ำหนักจากล้อบรรทุก มากระทำต่อโครงสร้างถนน ได้แก่ หน่วยแรงอัดแนวตั้งภายในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต และหน่วยแรงดึงแนวราบที่ด้านล่างชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้นวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน จะต้องแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ เพื่อต้านทานหน่วยแรงอัดและป้องกันการเสียรูปอย่างถาวรภายในส่วนผสม ทำนองเดียวกันวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานหน่วยแรงดึงที่ฐานของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต และต้องยืดหยุ่นเพียงพอที่จะต้านทานแรงต่างๆ ที่มากระทำโดยปราศจากรอยแตกร้าว เนื่องจากความล้า นอกจากนี้วัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อนยังต้องต้านทานหน่วยแรงที่เกิดจากการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วและอุณหภูมิที่หนาวจัดอย่างรุนแรง แม้ว่าคุณสมบัติส่วนตัวของส่วนประกอบแต่ละอย่างในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญ แต่พฤติกรรมของส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตจะอธิบายได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาถึงกิริยาแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมที่กระทำต่อกันในส่วนผสมนั้น วิธีที่จะเข้าใจพฤติกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตคือ การพิจารณาประเภทความเสียหายหลักของโครงสร้างถนนที่วิศวกรต้องหลีกเลี่ยง ได้แก่ การเสียรูปอย่างถาวร การแตกร้าว เนื่องจากความล้า และการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ

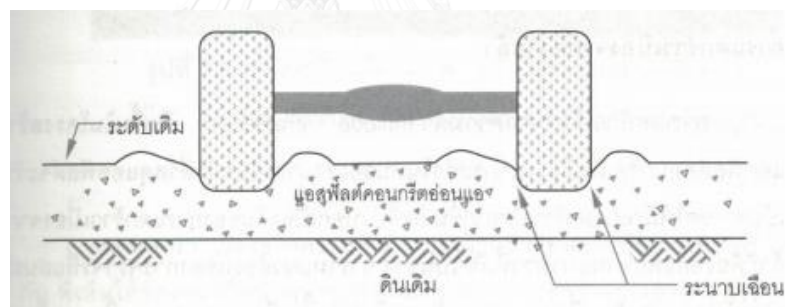
2.7.1.1 การเสียรูปอย่างถาวร (permanent deformation) คือลักษณะการเสียรูปอย่างหนึ่งทำให้ผิวของรูปตัดขวางของถนนเปลี่ยนแปลงจากรูปร่างเดิมที่ออกแบบไว้ สาเหตุที่เรียกว่าการเสียรูปอย่างถาวรระ ก็เพราะว่าเป็นการเสียหายที่สะสมจากปริมาณน้อยๆ ของการเสียรูปที่ไม่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ ซึ่งเกิดขึ้นในแต่ละครั้งที่มีการกระทำต่อถนน ลักษณะทั่วไปของการเสียรูปอย่างถาวร ได้แก่ รอยร่องล้อ (rutting) ที่มีแหล่งกำเนิดตามที่แตกต่างกัน เช่น ชั้นล่างที่รองรับวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน อ่อนแอเสียหายจากความชื้น การสึกหรอจากการขัดสีจากการจราจรปริมาณสูง ซึ่งโดยมากมักมาจากสาเหตุหลัก 2 กรณี กรณีแรกคือมีสาเหตุมาจาก

หน่วยแรงที่กระทำซ้ำซากต่อชั้นดินเดิมหรือชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทาง ซึ่งรองรับอยู่ใต้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยที่แรงมากระทำมีปริมาณมากเกินไป ดังแสดงในรูป 2.8 ถึงแม้ว่าวัสดุแข็งตั้งในโครงสร้างถนนจะช่วยลดความเสียหายประเภทนี้ได้บ้างก็เป็นปัญหาที่ต้องคำนึงถึงในด้านโครงสร้างไม่ใช่ปัญหาทางด้านวัสดุ สิ่งสำคัญก็คือกำลังหรือความหนาของโครงสร้างมีไม่เพียงพอที่จะลดหน่วยแรงที่มากระทำให้เหลือน้อยลงในระดับที่ทนได้นั่นเอง นอกจากนี้ยังมีสาเหตุจากชั้นโครงสร้างถนนที่ได้รับความเสียหายอย่างไม่ได้คาดคิดมาก่อนจากปริมาณความชื้นที่แทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างถนน ความเสียหายชนิดนี้เกิดขึ้นในชั้นล่างมากกว่าที่จะเกิดในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต รอยร่องล้อที่เกี่ยวข้องกับผู้ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นประเภทที่เกิดการเสียหายรูปในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต รอยร่องล้อชนิดนี้เกิดจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่มีกำลังเหนียวมากเพียงพอสำหรับต้านทานแรงกระทำหนักที่มากระทำซ้ำซากได้ ดังแสดงในรูป 2.9 ส่วนผสมที่อ่อนแอจะสะสมการเสียหายรูปปริมาณน้อยแต่ถาวรทุกครั้งที่รถบรรทุกแต่ละคันแล่นผ่านทำให้เกิดรอยร่องล้อยุบลงไปได้ล้อและเคลื่อนตัวทะลักออกทางด้านข้างของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต รอยร่องล้อจึงอาจเกิดจากชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนแอเอง หรืออาจเกิดจากชั้นรองใต้แอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนแอก็ได้ รอยร่องล้อที่เกิดจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนแอ มักจะเกิดในช่วงฤดูร้อนภายใต้อุณหภูมิโครงสร้างถนนที่สูงมาก ถึงแม้ว่าอาจพิจารณาเป็นเพียงปัญหาเฉพาะแอสฟัลต์ซีเมนต์ แต่ในทางที่ถูกต้องแล้วควรพิจารณาความต้านทานรวมของมวลรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วย เนื่องจากรอยร่องล้อเป็นการสะสมของการเสียหายอย่างถาวรปริมาณน้อยๆ เข้าไว้ดังนั้นวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มกำลังเหนียวของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก็คือใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดที่ไม่ใช่เพียงแต่แข็งตั้งแต่จะต้องมีพฤติกรรมที่เป็นของแข็งซึ่งยึดหยุ่นได้ดีด้วยที่อุณหภูมิสูงๆ เพราะเมื่อมีแรงมากระทำแอสฟัลต์ซีเมนต์จะได้ปฏิบัติตัวเหมือนแท่งยางลบและสปริงตัวกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้โดยไม่เสียหาย อีกวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มกำลังเหนียวของวัสดุแอสฟัลต์ผสมร้อน คือการเลือกใช้มวลรวมที่มีแรงเสียดทานภายในสูง ซึ่งได้แก่มวลรวมเหลี่ยมเนื้อผิวหยาบและคัดขนาดละเอียดให้เกิดการสัมผัสเกาะกันดีระหว่างอนุภาคกับอนุภาค เมื่อมีแรงกระทำต่อส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก็ช่วยให้อนุภาค

ต่างๆ ของมวลรวมเกาะยึดกันอย่างแน่นหนาและทำหน้าที่เหมือนหินก้อนใหญ่ก้อนเดียวที่ยึดหยุ่นได้ ในขณะที่มวลรวมมีแอสฟัลต์ยึดอยู่ก็จะประพฤติตัวเหมือนแท่งยางลบและสปริงตัวกลับสู่รูปร่างเดิมเมื่อเอาแรงที่มากกระทำออกไป ในวิธีนี้ก็จะมี การระสมการเสียรูปอย่างถาวร



รูปที่ 2.8 รอยร่องล้อที่เกิดจากชั้นดินเดิมอ่อนแอ



รูปที่ 2.9 รอยร่องล้อที่เกิดจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนแอ

2.7.1.2 การแตกร้าวเนื่องจากความล้า (fatigue cracking) เกิดขึ้นในโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อมีแรงมากกระทำในหน่วยแรงมากเกินกว่าที่วัสดุแอสฟัลต์จะรับได้จึงเป็นสาเหตุให้มีรอยแตกร้าวปรากฏขึ้น สิ่งที่บ่งบอกเบื้องต้นของการแตกร้าวเนื่องจากความล้าก็คือรอยแตกตามแนวยาวที่เกิดเป็นช่วงๆ ตามแนวล้อรถของการจราจรที่แล่นผ่านบนถนนนั้น การแตกร้าวเนื่องจากความล้าจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการแตกเริ่มแรกที่จุดต่างๆ จะเข้ามารวมกันทำให้รอยแตกก่อตัวมากขึ้น ขั้นตอนต่อไปของการแตกร้าวเนื่องจากความล้าเนื่องจากการแตกร้าวแบบหนังจระเข้ (alligator cracking) ซึ่งมีลักษณะเป็นรอยแตกตามขวางมา

เชื่อมต่อรอยแตกตามแนวยาว ดังแสดงในรูป 2.10 ในขั้นตอนรุนแรงที่สุดก็จะเกิดเป็นหลุมบ่อ (potholes) เมื่อมีชั้นส่วนของโครงสร้างถนนหลุดกระเด็นออกไป เนื่องจากการจราจรที่มากกระทำต่อโครงสร้างถนนนั้น การแตกร้าวเนื่องจากความล้า มีสาเหตุจากปัจจัยหลายประการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ที่เห็นได้ชัดเจนก็คือน้ำหนักบรรทุกหลายๆ มากกระทำซ้ำๆ หลายๆ ครั้งอยู่เสมอ โครงสร้างถนนบางๆ หรือชั้นรองรับข้างล่างอ่อนแอมีแนวโน้มที่จะแอ่นตัวมาก ภายใต้แรงกระทำจากน้ำหนักล้อบรรทุกหนัก การแอ่นตัวมากนำไปสู่การเพิ่มหน่วยแรงดึงตามแนวราบที่ด้านล่างของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งก่อให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าตามมา การระบายน้ำที่ไม่ดีรวมถึงการก่อสร้างกับการออกแบบที่ไม่ดีก็มีส่วนให้เกิดปัญหาดังกล่าวนี้ได้เช่นกัน วิธีที่ดีที่สุดที่จะไม่ให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าก็คือ ในการออกแบบต้องใช้ค่าแรงกระทำจากการจราจรหนักให้มีค่าเพียงพอ รักษาชั้นดินเดิมให้แห้ง ใช้โครงสร้างถนนที่มีความหนามากขึ้น ใช้วัสดุที่ไม่อ่อนแอเกินไปเมื่อได้รับความชื้น และใช้ HMA ที่มียึดหยุ่นเพียงพอที่จะต้านทานการแอ่นตัวตามปกติได้



รูปที่ 2.10 การแตกร้าวเนื่องจากความล้ามีลักษณะแบบหนังจระเข้ [8]

2.7.1.3 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature cracking) มีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อมที่เป็นปฏิปักษ์มากกว่าแรงกระทำจากการจราจร มีลักษณะเป็นรอยแตกตามยาวและตามขวางเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูป 2.11 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำเกิดขึ้น เมื่อชั้นโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตหดตัวในสภาวะภูมิอากาศเย็น เมื่อโครงสร้างถนนหดตัวจะก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงภายในชั้น

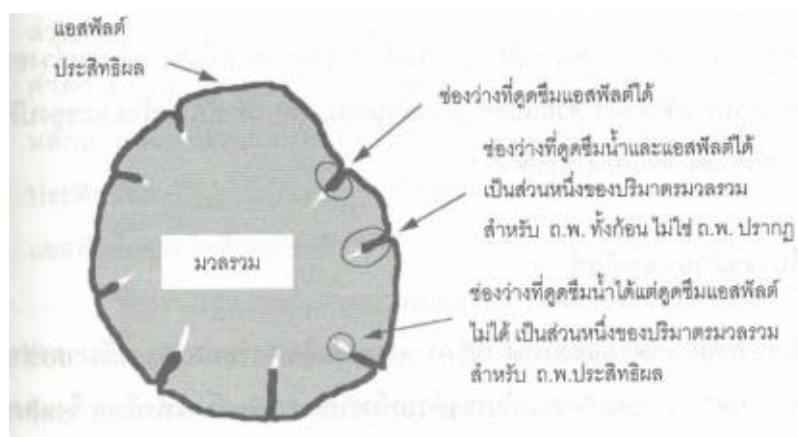
แอสฟัลต์คอนกรีต ถ้าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของแอสฟัลต์คอนกรีตก็จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแตกร้าว วัสดุประสานประเภทแอสฟัลต์มีบทบาทสำคัญในเรื่องการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ โดยแอสฟัลต์แข็งมีแนวโน้มที่จะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำได้ง่ายกว่าแอสฟัลต์อ่อน แอสฟัลต์ที่เสื่อมสภาพมากแล้วเพราะมีออกซิเดชันมากเกินไปหรือมีช่องว่างอากาศ (air voids) ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมากเกินไป จะมีแนวโน้มที่เกิดการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำได้ง่าย



รูปที่ 2.11 การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ [8]

2.7.2 องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต [7]

วัสดุมวลรวมส่วนใหญ่มีรูพรุน ดูดซึมน้ำและวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน อัตราส่วนของการดูดซึมน้ำจะเปลี่ยนตามชนิดของวัสดุมวลรวม การวัดค่าความถ่วงจำเพาะ มี 3 วิธี ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อน (bulk specific density) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (apparent specific gravity) และความถ่วงจำเพาะประสิทธิภาพ (effective specific gravity) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความถ่วงจำเพาะแบบทั้งก้อน ปรากรูและประสิทธิภาพ รวมทั้งปริมาณแอสฟัลต์ ประสิทธิภาพในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว

- ความหนาแน่น (density) ผิวทางแอสฟัลต์ที่มีความหนาแน่นมากพอจะทำให้อายุการใช้งานยืดยาว แต่อย่างไรก็ตามการบดอัดที่ทำในสนามไม่สามารถที่จะทำให้แน่นได้เท่ากับที่ทำการทดลองในห้องทดลอง กรมทางหลวงจึงกำหนดค่าการบดอัดในสนามให้มีความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 98% ของความหนาแน่นที่ทดสอบได้จากห้องทดลอง
- ช่องว่างอากาศ (air void) ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีช่องว่างอากาศที่เพียงพอ ทั้งนี้เมื่อพื้นทางที่ได้ทำการบดอัดแล้วเมื่อเปิดการจราจรให้รถได้ใช้เส้นทาง รถที่แล่นบนผิวทางที่การบดอัดจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแน่นกว่าเดิม ทำให้ช่องว่างอากาศลดลง นอกจากนั้นช่องว่างอากาศยังช่วยในการขยายตัวของวัสดุเชื่อมประสานเมื่ออยู่ในสภาวะอากาศที่ร้อน แต่ช่องว่างอากาศก็มีผลต่อความคงทน (durability) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต กล่าวคือปริมาณช่องว่างอากาศยิ่งน้อยเท่าใด น้ำและอากาศก็จะซึมผ่านเข้าไปทำลายวัสดุเชื่อมประสานและการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสานได้ยากขึ้น
- ช่องว่างในวัสดุมวลรวม (void in the mineral aggregate; VMA) คือปริมาณช่องว่างสำหรับปริมาณของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพรวมกับช่องว่างอากาศ ถ้าหากออกแบบส่วนผสมให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากัน แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่าช่องว่างในวัสดุมวลรวมสูงกว่าจะมีความคงทนต่อการใช้งานนานกว่า การที่วัสดุมวลรวมที่มีค่าช่องว่างในวัสดุมวลรวมสูง หมายถึงแอสฟัลต์นั้นมีปริมาณช่องว่างสำหรับใส่แอสฟัลต์ได้มาก ทำให้ได้แอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มผิววัสดุมวลรวมหนา ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทน อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

- ช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ (void filled with binder, VFB) หมายถึง ค่าร้อยละของปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาคต่างๆ ของวัสดุมวลรวมที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ
- ปริมาณแอสฟัลต์ (asphalt content) ปริมาณที่ใส่ลงไปผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีผลต่อสมบัติของแอสฟัลต์เป็นอย่างมาก ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุมวลรวม ได้แก่ขนาดคละและสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์

2.7.3 สมบัติของแอสฟัลต์ที่เหมาะสม [6]

- เสถียรภาพ (stability) เสถียรภาพของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตคือ ความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรโดยไม่เกิดร่องล้อ หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะอื่นๆ เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือ ความเสียดทานภายใน (internal friction) ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติของวัสดุมวลรวม เช่นรูปร่างของเม็ดวัสดุ ลักษณะความเรียบ หยาบ หรือขรุขระของผิว และแรงยึดเกาะ (cohesion) ระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวม ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถยึดเม็ดวัสดุมวลรวมให้ติดกันได้ดีเพียงใด ผลรวมของความเสียดทานภายในและแรงยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมจะช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุมวลรวมเกิดการเคลื่อนที่ผ่านกันและกันเมื่อน้ำหนักมากระทำ โดยปกติวัสดุมวลรวมมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบ ขรุขระจะให้เสถียรภาพสูง ส่วนแรงยึดเกาะจะมีมากถ้าแอสฟัลต์มีความหนืดสูง การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมจะทำให้แรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มถึงจุดหนึ่งจะทำให้แอสฟัลต์เคลือบเม็ดวัสดุมวลรวมมากเกินไป ทำให้ความเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมลดลง เสถียรภาพลดลง
- ความคงทน (durability) หมายถึงความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ปัจจัยที่ทำให้วัสดุเชื่อมประสานเสื่อมสภาพอาจเป็นผลมาจากภูมิอากาศ สภาพการจราจร เนื่องจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันและออกซิเดชัน วัสดุมวลรวมเสื่อมสภาพจนเกิดการแตกตัว (disintegration) และฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบวัสดุมวลรวมหลุดออก (stripping)
- ความยืดหยุ่น (elasticity) หมายถึงแอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถหลุดตัว แอ่นตัวหรือเคลื่อนตัวโดยปราศจากการแตกร้าว การยุบตัวในแอสฟัลต์คอนกรีตที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักจากการจราจรที่เคลื่อนไปตามถนน ผิวทางจะถูกกดลงไปชั่วขณะหนึ่งเกิดแรงอัดที่ผิวด้านบนและเกิดแรง

ดิ่งที่ผิวด้านล่าง ซึ่งความเค้นดึงจะมีค่ามากกว่าความเค้นอัด ทำให้เกิดการเสียรูปของผิวทางได้ ถ้าความหย่นตัวของผิวทางไม่ดีพอ

- ความง่ายในการปูและการบดอัด (workability) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปูและบดอัดยากอาจมีผลต่อความหนาแน่น ซึ่งจะกลายเป็นสาเหตุของความเสียหายต่างๆ ได้
- ความต้านทานต่อการล้า (fatigue resistance) คือความสามารถในการต้านทานการดัดโค้งแบบซ้ำซาก (repeated bending) ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดจากน้ำหนักล้อมากระทำกับปริมาตรช่องว่างอากาศ และความหนืดของแอสฟัลต์ที่มีผลต่อความต้านทานต่อการล้า กล่าวคือแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาตรช่องว่างอากาศมากจะทำให้ความต้านทานการล้าลดลง
- ความต้านทานต่อการลื่น (skid resistance) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะผิวทาง เช่นวัสดุผสมรวมถูกขัดสีจนเรียบ หรือแอสฟัลต์ที่มีความหนืดต่ำจะมีผลทำให้เกิดการไหลเยิ้ม (bleeding) ขึ้นที่ด้านบนได้เมื่ออุณหภูมิผิวทางสูง

2.8 การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล [9]

แนวคิดมูลฐานของวิธีมาร์แชลในการออกแบบวัสดุส่วนผสมสำหรับถนนแอสฟัลต์ กำหนดขึ้นโดยนายบรูซ มาร์แชล วิศวกรของกรมทางหลวงรัฐมิสซิสซิปปี ต่อมา the U.S. Corps of Engineers ได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมแล้วปรับปรุงวิธีการและพัฒนาหลักเกณฑ์ในการออกแบบส่วนผสมจนกระทั่งวิธีทดสอบให้ได้มาตรฐาน และได้กำหนดเป็นมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1559 และ AASHTO T245 ขึ้น

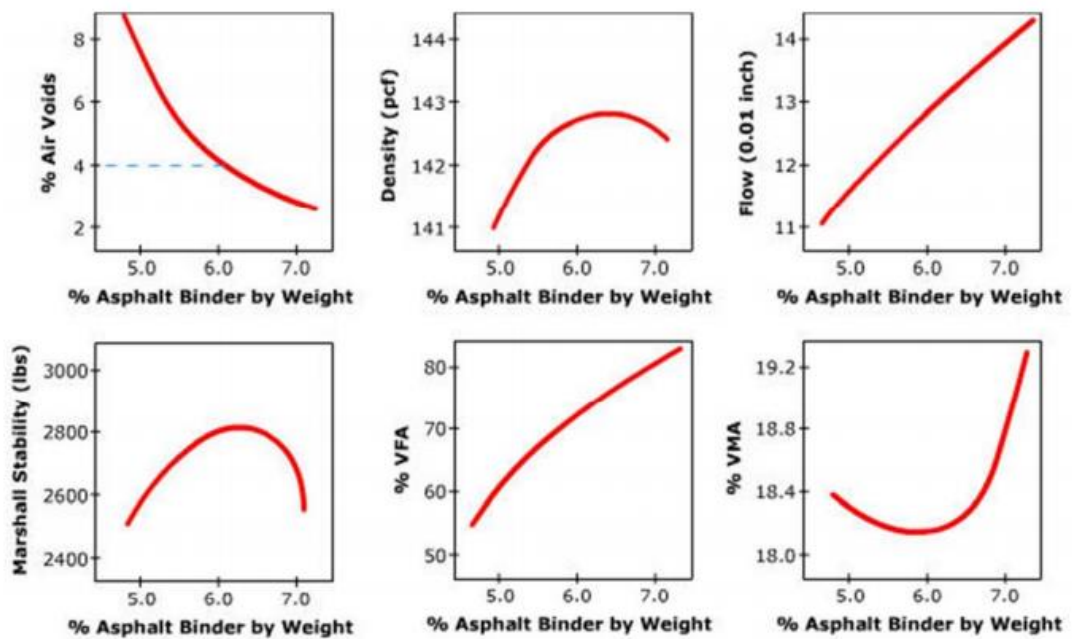
วิธีมาร์แชลนี้ใช้กับถนนแอสฟัลต์ที่ผสมแบบร้อน ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมที่มีการจัดขนาดคละที่มีขนาดมวลรวมโตสุด 25 มิลลิเมตรหรือน้อยกว่า วิธีการนี้ใช้ได้ทั้งการออกแบบในห้องปฏิบัติการและการควบคุมในสนาม

การทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล เป็นวิธีการหาค่าสมบัติต่างๆ ได้แก่ เสถียรภาพ การไหล ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม และค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ ในส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวมชนิดต่างๆ เพื่อนำค่าไปหา ร้อยละของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม (optimum asphalt content) ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 4 โดยเครื่องทดสอบเสถียรภาพและการไหลแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ
ต่อไปนี้ ดังรูป 2.14

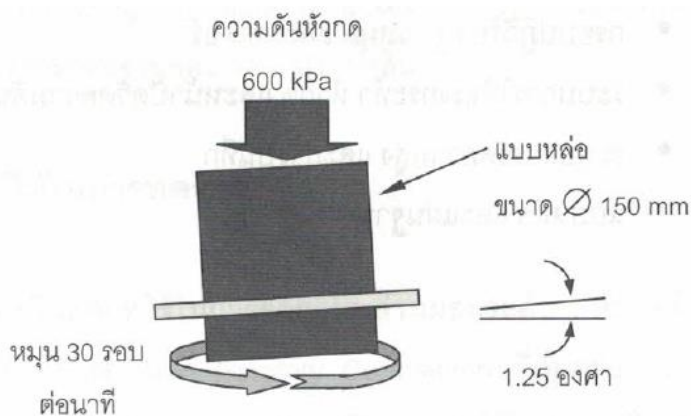


รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล

- ค่าร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตกับร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าการไหลมาร�แซลกับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าเสถียรภาพมาร�แซลกับร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมกับค่าร้อยละแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

2.9 การบดอัดก้อนตัวอย่างด้วยเครื่อง superpave gyratory compaction (SGC) [7]

เครื่อง SGC เป็นเครื่องมือกลกึ่งอัตโนมัติที่สามารถควบคุมการให้น้ำหนักกดที่คงที่ โดยกระบวนการบดอัดจะเริ่มขึ้นเมื่อนำส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะทำการบดอัดบรรจุลงในแบบหล่อ (mold) ซึ่งมีทั้งขนาด 100 และ 150 มิลลิเมตร จากนั้นนำแบบหล่อดังกล่าวเข้าติดตั้งกับส่วนฐานรองรับตัวอย่าง (rotation base) ซึ่งส่วนฐานนี้จะหมุนในอัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที ทำมุมเอียง 0.82 องศากับหัวกดสำหรับแบบหล่อขนาด 100 มิลลิเมตร และมุมเอียง 1.25 องศาสำหรับแบบหล่อขนาด 150 มิลลิเมตร ความดันที่กดลงบนวัสดุในแบบหล่อด้วยความดันคงที่ 600 kPa เพื่อทำการบดอัดวัสดุในการหมุนแต่ละรอบ และมีระบบการวัดความสูงก้อนตัวอย่างขณะทำการบดอัดและบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ดังแสดงในรูป 2.15 การบดอัดดังกล่าวเป็นการลอกเลียนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากสภาพจริงในสนามที่ล้อเหล็กของรถบดอัดทำกับผิวถนนขณะทำการบดอัด



รูปที่ 2.15 ลักษณะการทำงานของเครื่อง superpave gyratory compaction

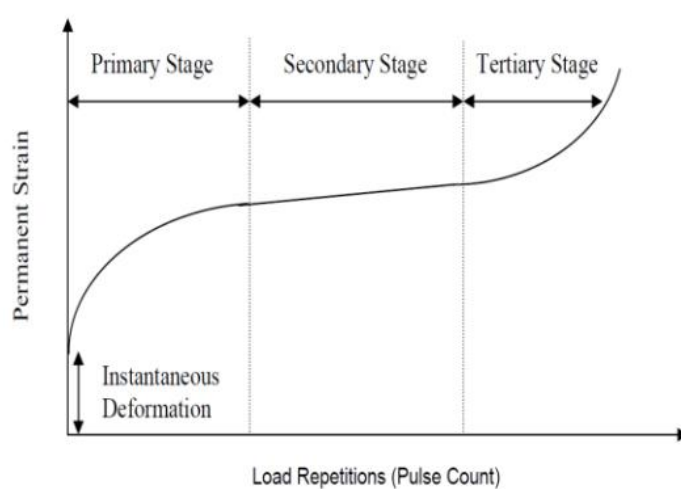
2.10 การทดสอบโดย indirect tensile test [10]

การทดสอบแบบ indirect tensile test เป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักที่เป็น compression load ซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้งแบบ static หรือแบบ repeated/dynamic load ก็ได้แล้วแต่กรณี โดยให้แรงกระทำในแนวขนานตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวตั้งของก้อนตัวอย่างทดสอบ การให้แรงกระทำต้องกระทำผ่านแท่งก้นน้ำหนัที่เป็นเหล็กสแตนเลสที่มีขนาดแนะนำให้ใช้ดังนี้ สำหรับกรณีก้อนตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร หรือใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตร ส่วนที่สัมผัสก้อนตัวอย่างทดสอบของแท่งก้นดังกล่าวต้องเป็นส่วนโค้งให้สามารถแนบกันได้สนิทพอดี เพื่อประโยชน์ในการกระจายน้ำหนัก การให้แรงกระทำในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความเค้นแรงดึง (tensile stress) ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการให้แรงหรือแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้ง ทำให้ก้อนวัสดุทดสอบเกิดการแตกขึ้นตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยที่บริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่างทดสอบความเค้นแรงอัด (compressive stress) ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่าของความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นในแนวราบ

2.11 การทดสอบแบบ repetitive uniaxial compression test [11]

เป็นการทดสอบที่ใช้ในการประเมินความเสียหายจากการเกิดร่องล้อ และการยุบตัวอย่างถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้เสมือนการจำลองน้ำหนักจริงในสนาม โดยใช้ระยะเวลาในการ

ทดสอบน้อย ลักษณะของการป้อนน้ำหนักเป็นรูปแบบ square pulse ใช้เวลา 2 วินาทีต่อ 1 รอบ การให้น้ำหนัก ด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที แบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.5 วินาที และช่วงเวลาพัก 1.5 วินาที ปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดเกณฑ์ในการทดสอบ คือความสูงของก้อนตัวอย่าง ระดับการป้อนน้ำหนัก ลักษณะการบดอัด ผลการทดสอบได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสะสม (accumulated permanent axial strain) กับจำนวนรอบที่น้ำหนักมากระทำ แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดสะสมกับจำนวนรอบที่น้ำหนักมากระทำ

จากรูปที่ 2.16 แสดงช่วงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ 3 ช่วงคือ

- ช่วงแรก (primary) ช่วงนี้ก้อนตัวอย่างทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีอัตราการยุบตัวสูงมาก ความเครียดสะสมจะเพิ่มสูงมากขึ้นภายในระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากก้อนตัวอย่างจะเริ่มแน่นอย่างรวดเร็วเพราะน้ำหนักที่มากกระทำ วัสดุมวลรวมภายในจะมีการเคลื่อนตัว และจัดเรียงตัวกันใหม่ขึ้น ข้อมูลในช่วงแรกนี้ยังไม่สามารถประเมินสมบัติการยุบตัวของตัวอย่างได้
- ช่วงที่ 2 (secondary) หลังจากทีตัวอย่างแน่นขึ้นและการเคลื่อนตัวของมวลรวมลดลง อัตราการเพิ่มของค่าความเครียดสะสมจะเริ่มคงที่ ค่าความชันของกราฟในช่วงนี้เป็นค่าคงที่การยุบตัวหรือการเกิดร่องล้อของผิวทาง ถ้าค่าความชันมาก การยุบตัวจะเกิดขึ้นได้มาก

- ช่วงที่ 3 (tertiary) ช่วงนี้เป็นช่วงสุดท้ายของการทดสอบ โดยค่าความเครียดสะสมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดอย่างฉับพลันจนนำไปสู่การแตกเสียหาย ปัจจัยที่มีผลทำให้ก้อนตัวอย่างเสียหายก่อนกำหนด คือความเป็นเนื้อเดียวกันของก้อนตัวอย่าง ความเอียงของแผ่นเหล็กที่รองรับน้ำหนักที่กระทำบนตัวอย่าง และความไม่สม่ำเสมอบนผิวหน้าของก้อนตัวอย่าง

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Marcelo และคณะ [12] ได้ศึกษาการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำและการเสียหายจากความชื้นของแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Aspha-min® และ Sasobit® โดยใช้เทคนิค thermal stress restrained specimen test (TSRST) และ third-scale model mobile loading simulator (MMLS3) ตามลำดับ พบว่าแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Sasobit® เกิดการเสียหายจากความชื้นได้มากกว่าแอสฟัลต์ควบคุม และแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดจะเกิดการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำได้มากกว่าแอสฟัลต์ควบคุม

Gandhi และคณะ [13] ทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น ที่ผ่านการทำให้เสื่อมสภาพ (aging) จาก rolling thin film oven test (RTFOT) และไม่ผ่านการอบด้วยวิธี RTFOT จากการศึกษาโดยเทคนิค indirect tensile strength ratio (ITS) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Aspha-min® และ Sasobit® ที่ไม่ผ่านการอบด้วยวิธี RTFOT มีการเสียหายจากความชื้นได้น้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตควบคุม แต่ในแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างที่ผ่านการการอบด้วยวิธี RTFOT พบว่าการเสียหายจากความชื้นของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นทั้งสองชนิดมีค่าไม่แตกต่างจากแอสฟัลต์คอนกรีตควบคุม ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (resilient modulus) ของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Aspha-min® มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นอื่นทุกอุณหภูมิการทดสอบ แต่ก็พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านการจำลองการการอบด้วยวิธี RTFOT มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการการอบด้วยวิธี RTFOT เมื่อพิจารณาการเกิดร่องล้อโดยเทคนิค asphalt pavement analyser (APA) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Sasobit® มีค่าการเกิดร่องล้อน้อยกว่าตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตอื่น และ

พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านการอบด้วยวิธี RTFOT มีค่าไม่แตกต่างจากแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผ่านการอบด้วยวิธี RTFOT

Gandhi และคณะ [14] ได้ศึกษาผลของความหนืด การต้านทานการเกิดร่องล้อ การต้านทานความล้าและการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำโดยเทคนิค SHRP ของแอสฟัลต์ผสมอุ่น ที่ผ่านการทำให้เสื่อมสภาพ (aging) จาก rolling thin film oven test (RTFOT) ซึ่งเป็นการจำลองการเสื่อมสภาพทางความร้อนของแอสฟัลต์ที่เกิดจากการผสมกับวัสดุผสมรวม โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิของการทดสอบ RTFOT (อุณหภูมิการผสม) ที่ 163 และ 130 องศาเซลเซียส พบว่าความหนืดของแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Aspha-min® มีค่าสูงขึ้นและความหนืดของแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Sasobit® มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งให้ผลการทดลองเหมือนกันทั้งการผสมที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ การความต้านทานการเกิดร่องล้อมีค่าไม่แตกต่างกันถึงแม้จะใช้อุณหภูมิในการผสมไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่เกิดจากการเติม Aspha-min® และ Sasobit® ให้ค่าการต้านทานการเกิดร่องล้อที่สูงกว่าแอสฟัลต์ควบคุม ผลการทดสอบการต้านทานความล้า พบว่าแอสฟัลต์ผสมอุ่นมีค่าความต้านทานความล้าที่ไม่แตกต่างกับแอสฟัลต์ทั่วไป และการผสมที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน การทดสอบการต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำพบว่าแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Sasobit® มีแนวโน้มที่จะส่งเสริมการแตกร้าวมากขึ้น ทั้งการผสมที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ส่วนแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Aspha-min® จะส่งเสริมการแตกร้าวเมื่อทำการผสมที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าลดอุณหภูมิการผสมลงจะช่วยทำให้ต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำได้

Hossain และคณะ [15] ได้ศึกษาสมบัติการไหลของแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Sasobit® โดยอ้างอิงจากระบบ superpave พบว่าเมื่อเติม Sasobit® 1, 2, 2.5 และ 3% จะทำให้ความหนืดลดลงตามลำดับ ทำให้สามารถลดอุณหภูมิในการผสมได้ 5, 9, 9.5 และ 10 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนการทดสอบ Dynamic Shear Rheometer (DSR) พบว่าเมื่อเติม Sasobit® 0, 1, 2, 2.5 และ 3% จะทำให้ค่าอุณหภูมิ PG เพิ่มขึ้นเป็น 64.5, 67, 70, 70.2 และ 70.5 องศาเซลเซียสตามลำดับ และการเติม Sasobit® ทำให้การต้านทานต่อการล้ามีค่าสูงขึ้น แต่จะส่งเสริมให้มีการแตกร้าวจากอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของ Sasobit® จะทำให้อัตราการคลายแรง (stress relaxation) ลดลง และค่าความแข็งตึงเพิ่มขึ้น ปริมาณที่เหมาะสมของ Sasobit® คือ 1.5%

ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติการผสมลดลง 9 องศาเซลเซียส และได้ PG 68.5-22 และการลดอุณหภูมิของ RTFOT เป็น 150 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อลดลง 26% เมื่อใช้ Sasobit® 3%

Kheradmand และคณะ [16] รายงานการศึกษาสมบัติการไหลของแอสฟัลต์ผสมอุ่นที่ได้จากการเติม Sasobit® พบว่าที่อุณหภูมิปานกลางความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (temperature susceptibility) ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ Sasobit® เพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงเมื่อเพิ่มปริมาณ Sasobit® สูงขึ้นจะทำให้ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิมากขึ้น และจากการทดสอบ DSR พบว่าแอสฟัลต์ผสมอุ่นมีค่าโมดูลัสเชิงซ้อน (complex modulus) สูงขึ้น และค่ามุมเฟส (phase angle) ต่ำลง แสดงให้เห็นว่าแอสฟัลต์ผสมอุ่นมีสมบัติความยืดหยุ่นมากขึ้น

Kavussi และคณะ [17] ได้ศึกษาการเสถียรภาพจากความชื้นและการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่ได้จากเทคนิคการผลิตโฟมแอสฟัลต์ พบว่าการผสมและการบดอัดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้เสถียรภาพลดลงและการไหลเพิ่มขึ้นเนื่องจากความสามารถในการเคลือบหินลดลง ส่วนการเสถียรภาพจากความชื้นและความต้านทานการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน ซึ่งการเติมปูนขาวจะทำให้การเสถียรภาพจากความชื้นลดลงแต่ก็จะทำให้การเกิดร่องล้อสูงขึ้นด้วย

Ghabchi และคณะ [18] ได้รายงานการศึกษาโมดูลัสเชิงเกร็ง (stiffness modulus) การแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ การต้านทานความล้า การเกิดด้านการเกิดร่องล้อ และการเสถียรภาพจากความชื้นของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่ได้จากเทคโนโลยีการผสมที่แตกต่างกัน คือเทคโนโลยีการเกิดโฟมที่ใช้ zeolite เป็นสารเติมแต่ง และเทคโนโลยีการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยเทคนิคที่ใช้ศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นคือ dynamic modulus, creep compliance, four-point bending beam, Hamburg wheel tracking (HWT) และ retained tensile strength ratio (TSR) จากการศึกษาพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นทุกตัวมีค่าโมดูลัสเชิงเกร็ง ความต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ ความต้านทานการล้าน้อยกว่าแอสฟัลต์ผสมร้อน แต่มีการต้านทานการเกิดร่องล้อสูงขึ้น ส่วนการเสถียรภาพจากความชื้นให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันระหว่างเทคนิค HWT และ TSR จากเทคนิค TRS พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นสามารถต้านทานการเสถียรภาพจากความชื้น แต่เทคนิค HWT รายงานว่าความต้านทานการเสถียรภาพจากความชื้นน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

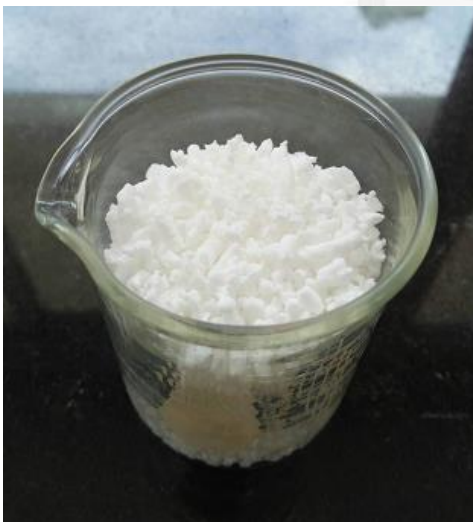
ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งวิธีการทดลองออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ประกอบด้วย การหาสูตรผลิตที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น (warm mix PMA) และการทดสอบสมบัติของวัสดุที่ใช้ศึกษา ได้แก่ วัสดุผสมรวมและวัสดุเชื่อมประสานซึ่งมี 2 ประเภท คือพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม (control PMA) และพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น จากนั้นเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการผสมวัสดุเชื่อมประสานกับขนาดคละของวัสดุผสมรวมที่เลือกไว้ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับชั้นผิวทางและบดอัดด้วยวิธีมาร์แชลและการบดอัดด้วยเครื่อง gyratory compactor สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการผสมพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น ที่อุณหภูมิ 150 และ 180 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการศึกษา ได้แก่ ค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล ค่า indirect tensile stiffness modulus (ITSM) ค่า permanent deformation ที่ได้จากเครื่อง universal testing machine (UTM) และค่าการเกิดร่องล้อที่ได้จากเครื่อง wheel tracker โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการศึกษาต่างๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

3.1 การผลิตพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น

นำวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 ที่เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง มาผสมกับพอลิเมอร์ชนิด styrene butadiene styrene (SBS) ด้วยเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง (high shear rate mechanical mixer) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิเหลือ 160 องศาเซลเซียส เติมน้ำมันเติมแต่งผสมอุ่น (warm mix additive) กวนต่ออีก 15 นาที จากนั้นกวนส่วนผสมในตู้อบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง



ก) SBS พอลิเมอร์



ข) สารเติมแต่งผสมอ่อน

รูปที่ 3.2 ก) SBS พอลิเมอร์และ ข) สารเติมแต่งผสมอ่อน

ในการศึกษานี้จะปรับเปลี่ยนปริมาณของสารเติมแต่งผสมอ่อน เพื่อหาสูตรผลิตที่สามารถผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยใช้การทดสอบเพนิเทรชันเป็นข้อกำหนดเบื้องต้นในการเลือกสูตรผลิต

3.2 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

ในการศึกษานี้จะทดสอบสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานคือพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม

3.2.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานพื้นฐาน

ในการทดสอบจะแยกออกเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ยังไม่ผ่านการอบด้วยวิธี rolling thin film oven test (RTFOT) และภาคที่เหลือจากการอบด้วยวิธี RTFOT การอบด้วยวิธี RTFOT เป็นการจำลองการเสื่อมสภาพจากความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างกระบวนการผสมวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวม วัสดุเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิดจะได้รับการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังรายละเอียดที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 851-2542

ตารางที่ 3.1 การทดสอบสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน [19]

Parameters	Unit	Method	Tolerances
Penetration at 25 °C	-	ASTM D5	55-70
Softening point, Ring and Ball	°C	ASTM D36	>70
Ductility at 13 °C	cm	ASTM D113	>55
Elastic recovery at 25 °C	%	ASTM D6084	>70
Brookfield viscosity at 135 °C	Pa.s	ASTM4402	<3.0
Density	g/cm ³	ASTM D70	1.00-1.05
Flash point	°C	ASTM D92	>220
Solubility in Trichloroethylene	%	ASTM 2204	>99.0
Rutting resistance ($G^*/\sin\delta$) at 76 °C	kPa	ASTM D7175	>1.0
Test on residue for RTFOT			
Weight loss	%	ASTM D2872	<1.0
Retained penetration	%	ASTM D5	>70
Ductility at 13 °C	cm	ASTM D113	>40
Elastic recovery at 25 °C	%	ASTM D6084	>60

3.2.2 การทดสอบสมบัติการไหลของวัสดุเชื่อมประสาน

3.2.2.1 การทดสอบ dynamic shear stiffness ทดสอบโดยใช้เครื่อง dynamic shear rheometer (DSR) อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM D7175 “Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer” ทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิสูง ได้แก่ 64 70 76 82 และ 88 องศาเซลเซียส ทั้งก่อนและหลังการอบด้วยวิธี RTFOT โดยใช้ความถี่เท่ากับ 10 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่มาตรฐานการทดสอบแนะนำว่าเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดจากปริมาณการจราจร

3.2.2.2 การทดสอบการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ (low-temperature properties) ทดสอบโดยเครื่อง bending beam rheometer (BBR) อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ AASHTO

T313 “Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer” ทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ ได้แก่ -6 -12 และ -18 องศาเซลเซียส

3.3 การเตรียมและทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวม

ทดสอบสมบัติต่างๆ ของวัสดุมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ตามตารางที่ 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 3.2 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบ

Properties	Unit	Method	Tolerances
Specific gravity	g/cm ³	ASTM C127	-
Absorption	%	ASTM C127	-
Los Angeles Abrasion	%	ASTM C 131	≤40
Soundness (sodium Sulfate)	%	ASTM C 88	≤9
Flakiness Index	-	BS 812-105-1	≤30
Coating	%	AASHTO T182	≥95

ตารางที่ 3.3 การตรวจสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด

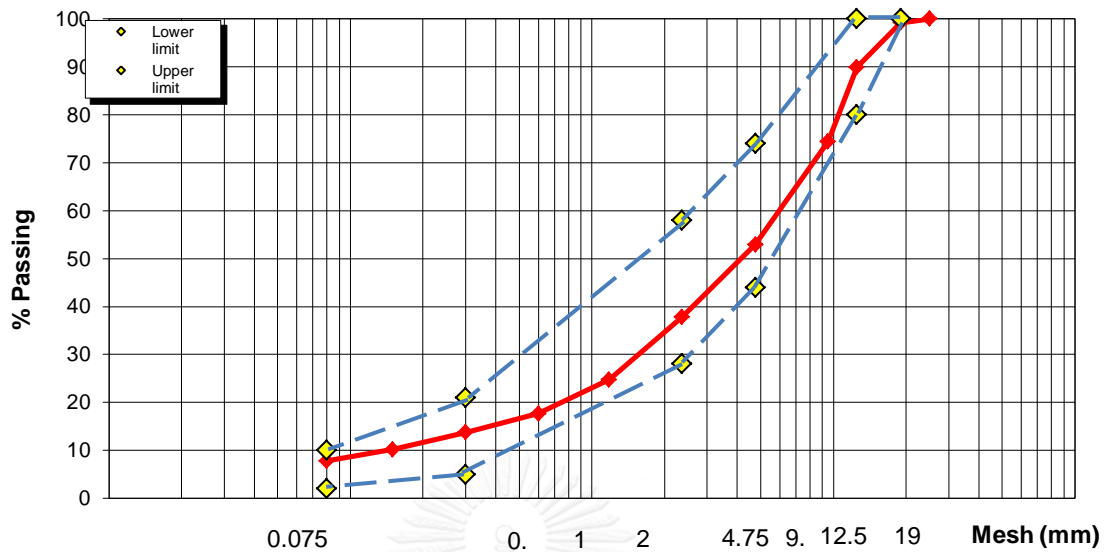
Properties	Unit	Method	Tolerances
Specific gravity	g/cm ³	ASTM C128	-
Absorption	%	ASTM C128	-
Sand equivalent	%	ASTM C 131	≥50
Soundness (sodium sulfate)	%	ASTM C 88	≤9

3.4 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม (gradation)

ขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นขนาดคละสำหรับชั้นผิวทางซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532 โดยวัสดุมวลรวมมีขนาด 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ซึ่งแสดงในตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

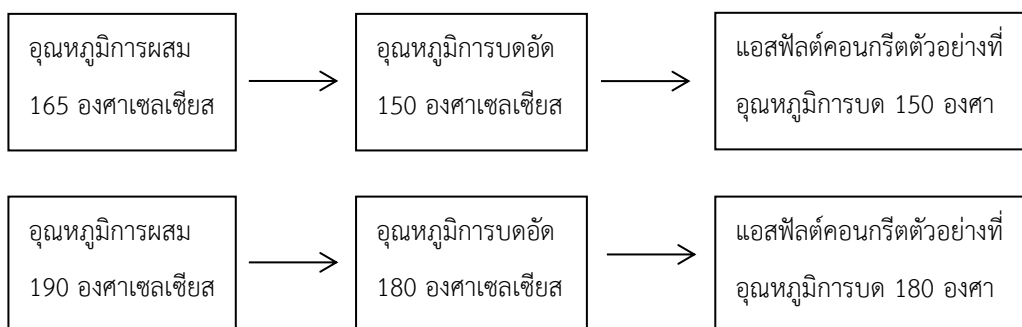
Nominal Size		DOH Specifications	
Mesh	# mm	Lower	Upper
1	25	-	-
3/4	19	-	100
1/2	12.5	80	100
3/8	9.5	-	-
4	4.75	44	74
8	2.36	28	58
16	1.18	-	-
30	0.6	-	-
50	0.3	5	21
100	0.15	-	-
200	0.08	2	10
Binder Content %		3-7	



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุมวลรวม

3.5 การเตรียมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่าง

การเตรียมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างทำการผสมวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวมที่ได้รับการทดสอบสมบัติและมีขนาดคละที่อยู่ในข้อกำหนดของกรมทางหลวง โดยผสมแบบร้อน (hot mix) เพื่อเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างที่ได้จากอุณหภูมิการผสมและอุณหภูมิการบดอัดที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในการเตรียมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่าง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงการเตรียมแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างที่อุณหภูมิการผสมและอุณหภูมิการบดอัด

3.5.1 การเตรียมแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างด้วยวิธีมาร์แชล

บดอัดส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล ทำโดยใช้เครื่อง marshall compactor ดังรูปที่ 3.5 จำนวนรอบในการบดอัดตามเกณฑ์เทียบเท่าที่ปริมาณการจราจรสูง (heavy traffic criteria) คือ 75 รอบ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ทล.-ท. 604/2517 ของกรมทางหลวง โดยใช้แบบหล่อขนาด 4 นิ้ว หรือ 101.6 มิลลิเมตร เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม (optimum binder content) ที่ค่าร้อยละช่องว่างอากาศ (% air void) เท่ากับ 4 รวมทั้งพิจารณาสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีตได้แก่ค่าเสถียรภาพมาร์แชล (marshall stability) ค่าการไหลมาร์แชล (marshall flow) ค่าสัดส่วนเสถียรภาพต่อการไหลมาร์แชล (stability/flow) ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) และค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (VFB)



รูปที่ 3.5 เครื่อง marshall compactor

การบดอัดและทดสอบสมบัติตามวิธีมาร์แชลเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม และพิจารณาว่าวัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวเมื่อนำไปเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต สามารถผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดนำไปใช้งานจริงได้ ในปัจจุบันยังคงใช้วิธีมาร์แชลนี้สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดแล้ว จะทำการบดอัดด้วยเครื่อง gyratory compactor เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไป

3.5.2 การเตรียมแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างด้วยเครื่อง gyratory compactor

หลังจากได้ทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล จะได้ค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด จากนั้นทำการบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่อง gyratory compactor ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้แบบหล่อขนาด 100 มิลลิเมตร เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยบันทึกข้อมูลทางกายภาพของก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบทุกครั้ง ได้แก่ น้ำหนัก ความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลาง



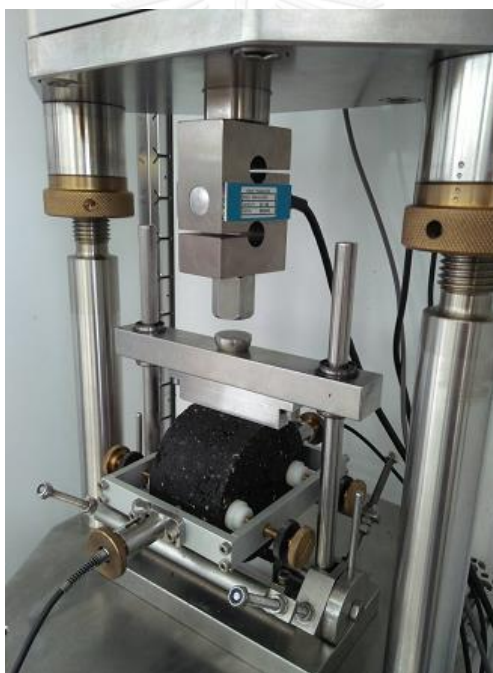
รูปที่ 3.6 เครื่อง gyratory compactor

สำหรับการทดสอบการเกิดร่อนล้อ ตามข้อกำหนด AASHTO 324 ได้กำหนดความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างเป็น 60 และ 150 มิลลิเมตรตามลำดับ ดังนั้นต้องใช้ค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง (bulk density) ที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล นำมาคำนวณหาปริมาตรของส่วนผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวม (mixture) เพื่อให้เตรียมก้อนตัวอย่างได้ตามความสูงที่กำหนด

3.6 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต

3.6.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile stiffness modulus test)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า stiffness modulus โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ EN12697-26 “Standard Test Method for Indirect Tensile Test for Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures” โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยกำหนดค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson’s ratio) เท่ากับ 0.35 ซึ่งจะใส่ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างตามค่าที่ได้จากการชั่งน้ำหนัก และกำหนดการเสียรูปทางด้านข้าง (horizontal deformation) เท่ากับ 5 ไมโครเมตร การจัดวางก้อนตัวอย่างในเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การจัดวางก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

รูปแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (repeated load) ในรูปแบบ haversine wave ทุกๆ 3 วินาที แบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการให้น้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.248 วินาที และช่วงเวลาพัก 2.752 วินาที โดยจะป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำ 200 รอบ เนื่องจากมาตรฐานการทดสอบชี้แจงว่าจำนวนครั้งดังกล่าวระดับค่าโมดูลัสจะอยู่ในช่วงคงที่ จากนั้นจะทดสอบอีก 5 ครั้ง

สุดท้ายเพื่อหาค่า indirect stiffness modulus ค่าการเปลี่ยนรูปทางด้านข้างถูกวัดโดย linear variable differential transducers (LVDTs) 2 ชุด ที่ติดตั้งอยู่ด้านข้างของก้อนตัวอย่าง เพื่อเป็นการวัดการเสียรูปทางด้านข้างของก้อนตัวอย่าง

3.6.2 การทดสอบหาค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (permanent deformation)

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร โดยทดสอบแบบ repeated uniaxial loading strain test (dynamic creep test) ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกน (axial load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อก้อนตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.8



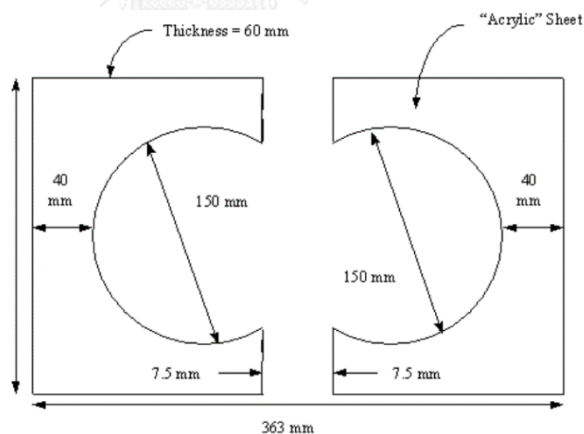
รูปที่ 3.8 ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวร

การทดสอบจะทำการป้อนน้ำหนักในรูปแบบ square wave แบบกระทำซ้ำขนาด 200 kPa ด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที แบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.5 วินาที และช่วงเวลาพัก 1.5 วินาที

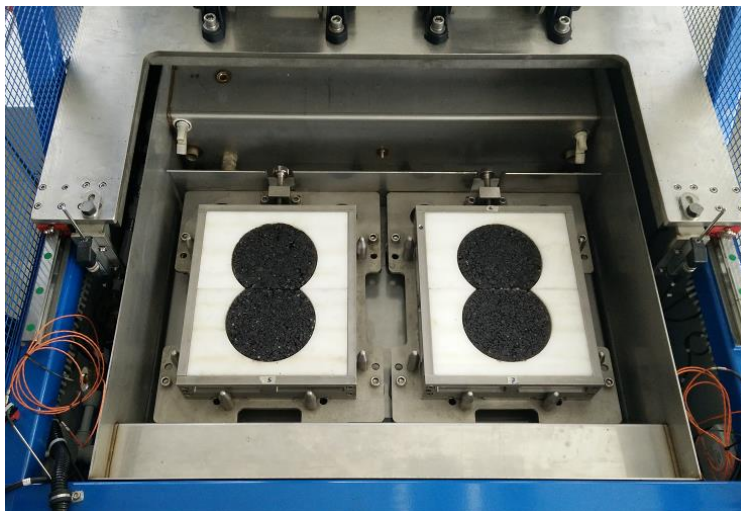
ค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนหรือค่าการยุบตัวในการทดสอบจะถูกวัดโดย linear variable differential transducers (LVDTs) 2 ชุด ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของก้อนตัวอย่าง เพื่อเป็นการวัดการยุบตัวในทิศทางเดียวกับน้ำหนักที่กระทำ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปของค่าความเครียดสะสม (accumulated strain) ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการป้อนน้ำหนัก การทดสอบจะดำเนินไปจนกระทั่งค่าความเครียดสะสม มีค่าเท่ากับ 10,000 microstrain หรือหยุดตามจำนวนรอบที่ผู้ทดสอบกำหนดไว้

3.6.3 การทดสอบการเกิดร่องล้อ

การทดสอบการเกิดร่องล้อทดสอบโดยเครื่อง hampburg wheel tracking อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ AASHTO 324 “Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt” ก้อนตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 150 และ 60 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยก้อนตัวอย่างจะเตรียมได้จากการบดอัดด้วยเครื่อง gyratory compactor จากนั้นตัดก้อนตัวอย่างให้มีขนาดพอดีกับแบบหล่อที่เป็นอะคริลิคดังแสดงในรูปที่ 3.9 จัดวางก้อนตัวอย่างในเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แบบหล่ออะคริลิคและขนาดก้อนตัวอย่าง



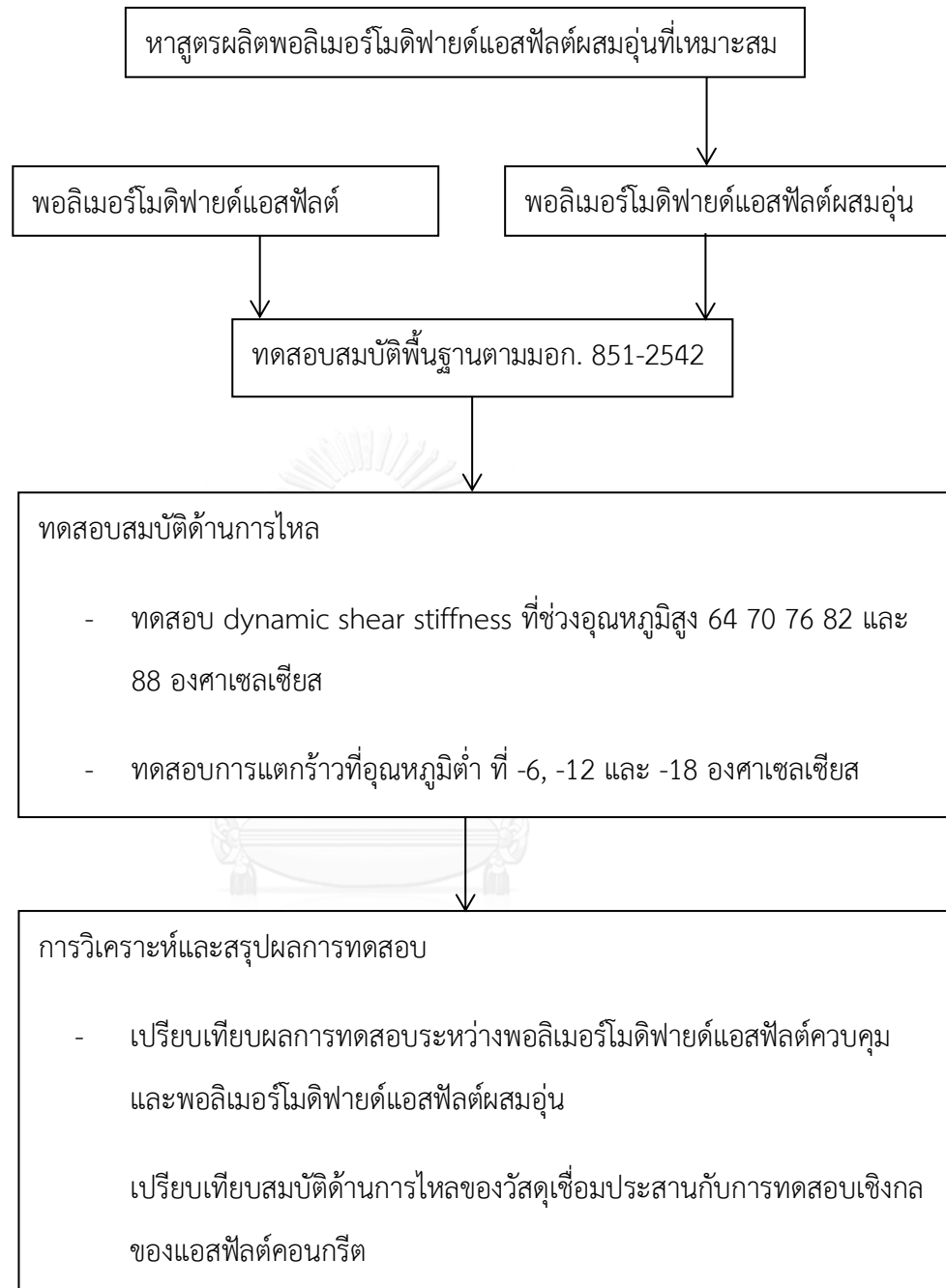
รูปที่ 3.10 การประกอบก้อนตัวอย่างเข้ากับแบบหล่อและจัดวางเข้ากับเครื่องทดสอบ

เครื่อง Hamburg wheel tracking test ใช้ล้อที่ทำจากสแตนเลส น้ำหนักที่กดลงบนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 705 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ความถี่ของการบดทับตัวอย่างเท่ากับ 26.5 รอบต่อนาที การวัดความสึกที่เกิดจากการบดทับของล้อสแตนเลสจะถูกวัดโดย linear variable differential transducers (LVDTs) 2 ชุด ที่ติดตั้งอยู่ด้านข้างของก้อนตัวอย่าง โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสทั้งสภาวะแห้งและสภาวะเปียก (dry and wet mode) การทดสอบจะดำเนินไปจนกระทั่งเกิดร่องล้อลึกเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร หรือมีจำนวนรอบเท่ากับ 15,000 รอบ

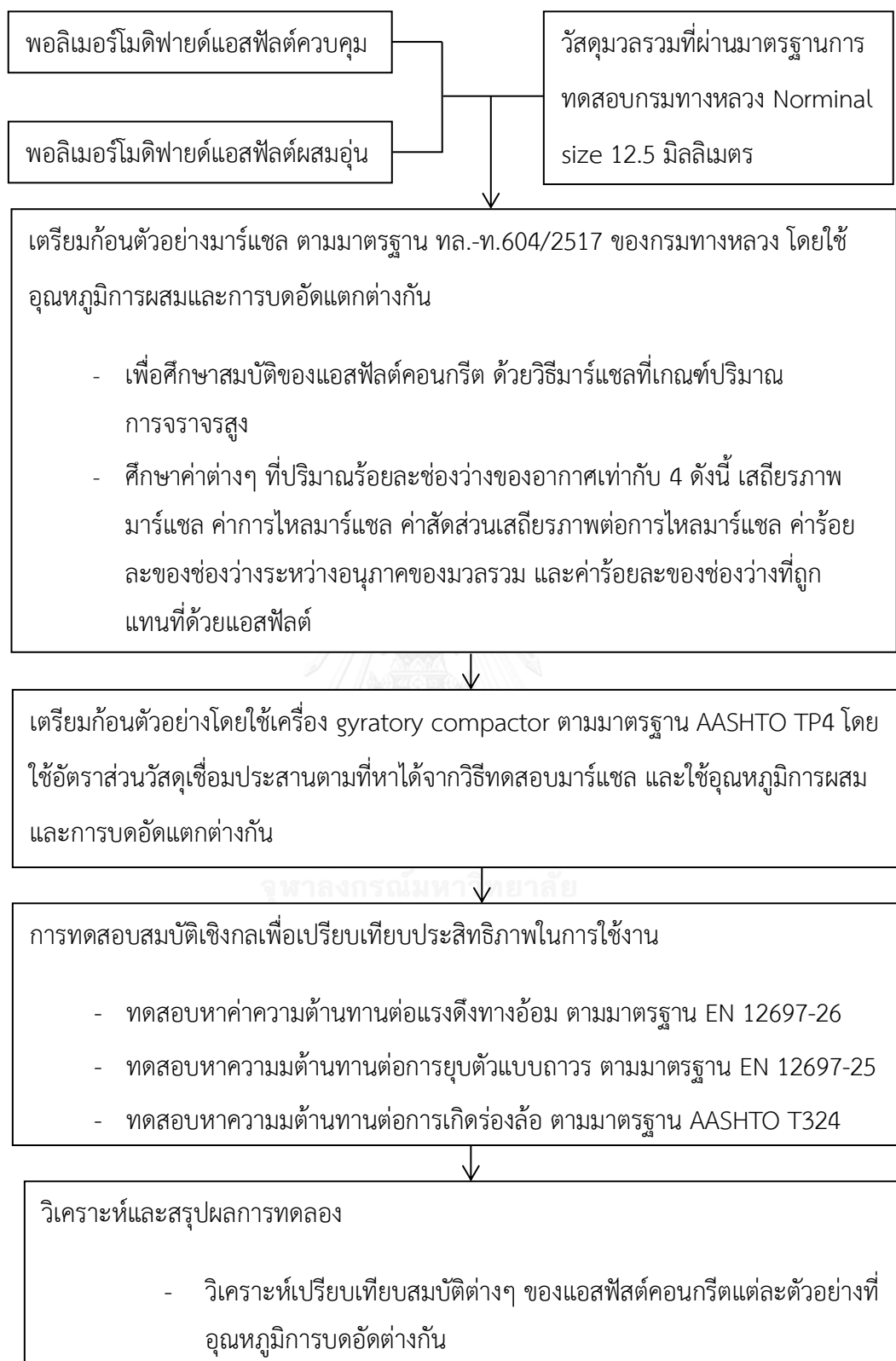


รูปที่ 3.11 แสดงการทดสอบการเกิดร่องล้อด้วยล้อสแตนเลส

3.7 แนวทางในการดำเนินการศึกษา



รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงการทดสอบส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน



รูปที่ 3.13 แผนผังแสดงการทดสอบส่วนที่เป็นแอสฟัลต์คอนกรีต

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาการเติมสารเติมแต่งเพื่อลดอุณหภูมิการใช้งานของโพลิเมอร์ โหมดิฟายด์แอสฟัลต์ โดยจะเรียกโพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่เติมสารเติมแต่งนี้ว่า โพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น (warm mix PMA) และแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานและส่วนที่เป็นแอสฟัลต์คอนกรีต ในส่วนแรกจะหาปริมาณของสารเติมแต่งที่เหมาะสมเพื่อทำให้โพลิเมอร์โหมดิฟายด์ผสมอุ่นผ่านข้อกำหนดกรมทางหลวง และสามารถนำไปผลิตได้จริงในอุตสาหกรรม จากนั้นจะทดสอบสมบัติพื้นฐานของโพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น เปรียบเทียบกับโพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ในส่วนที่สองจะทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่น และโพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่ใช้ อุณหภูมิการผสมและบดอัดต่างกัน เพื่อทดสอบว่าการลดอุณหภูมิการใช้งานของโพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตทั้งสองชนิดแสดงสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างไร

4.1 ปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่ง

ในการผลิตโพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์มีส่วนประกอบพื้นฐานคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ SBS น้ำมันและซิลเฟอร์ จากส่วนประกอบนี้จะทำให้ได้โพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา แต่มีข้อเสียคือ อุณหภูมิในการใช้งานจะสูงถึง 180 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเติมสารเติมแต่งที่สามารถช่วยลดอุณหภูมิการใช้งาน (warm mix additive) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหา

เพื่อควบคุมให้โพลิเมอร์โหมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น อยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ต้องหาปริมาณขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสูตรผลิต ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ SBS น้ำมัน ซิลเฟอร์และสารเติมแต่ง ตัวแปรที่ใช้ควบคุมคือ ค่าเพนิเทรชันที่ 25 องศาเซลเซียส ในข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดให้ค่าเพนิเทรชันอยู่ในช่วง 55-70 ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สูตรผลิตพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์

สูตรผลิตที่	ส่วนประกอบ					ค่าเพนิเทรชัน
	แอสฟัลต์ซีเมนต์	SBS	สารเติมแต่ง	น้ำมัน	ซิลเฟอร์	
1	94.2	4.3	0.0	1.5	0.05	58
2	93.5	2.8	1.2	2.5	0.05	53
3	93.0	2.8	1.2	3.0	0.05	55
4	92.5	2.8	1.2	3.5	0.05	58
5	91.0	2.8	1.2	5.0	0.05	61

ตารางที่ 4.1 แสดงสูตรผลิตพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ สูตรที่ 1 เป็นพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม (control PMA) สูตรที่ 2-5 เป็นพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน เมื่อพิจารณา ค่าเพนิเทรชันจะเห็นว่าสูตรผลิตที่เป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้แก่ สูตรที่ 3-5 แต่เนื่องจากสูตรที่ 3 มีค่าเพนิเทรชันเท่ากับ 55 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดตามข้อกำหนด สูตรนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานจริง เพราะในการกระบวนการผลิตจริงมักได้ค่าเพนิเทรชันที่แตกต่างจากการผลิตในห้องทดลองประมาณ 1-2 เพนิเทรชัน ดังนั้นสูตรผลิตที่สามารถนำไปผลิตได้คือ สูตรที่ 4 และ 5 อย่างไรก็ตามต้องมีการทดสอบตัวแปรพื้นฐานอื่นๆ ตามข้อกำหนดของมาตรฐานอุตสาหกรรม เพื่อให้มั่นใจว่าจะได้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนที่ผ่านข้อกำหนดทุกตัวแปร โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ดังแสดงในตารางที่

4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน

คุณลักษณะที่ทดสอบ	วิธีการทดสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	พอลิเมอร์ โมดิฟายด์ แอสฟัลต์ ควบคุม	Warm mix PMA สูตรที่ 4	Warm mix PMA สูตรที่ 5
เพนิเทรชันที่อุณหภูมิ 25 °C	ASTM D5	55-70	58	58	61
จุดอ่อนตัว, °C	ASTM D36	>70	87.0	85.6	80.4
การดึงยึดที่อุณหภูมิ 13 °C, cm	ASTM D113	>55	98	117	125
ความยืดหยุ่นกลับที่อุณหภูมิ 25 °C, ร้อยละ	ASTM D6084	>70	92	97	91
ความเหนียวบรูคฟิลด์ อุณหภูมิ 135 °C, Pa.s	ASTM4402	<3.0	1.33	0.74	0.68
ความหนาแน่น, g/cm ³	ASTM D70	1.00- 1.05	1.044	1.045	1.043
จุดวาบไฟ (°C)	ASTM D92	>220	338	340	326
การละลายในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน, ร้อยละ	ASTM 2204	>99.0	99.95	99.95	99.96
ความต้านทานการเกิดร่องล้อ G*/sinδ ที่อุณหภูมิ 76 °C, kPa	ASTM D7175	>1.0	1.87	1.72	1.54
ภาคที่เหลื่อจากการอบ					
น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน, ร้อยละ	ASTM D2872	<1.0	0.23	0.05	0.08
ร้อยละของเพนิเทรชันเดิม, ร้อยละ	ASTM D5	>70	75.9	81.6	78.9
การดึงยึดที่อุณหภูมิ 13 °C, cm	ASTM D113	>40	72	106	93
ความยืดหยุ่นกลับที่อุณหภูมิ 25 °C, ร้อยละ	ASTM D6084	>60	73	95	91

จากตารางที่ 4. 2 เห็นได้ว่าสมบัติพื้นฐานของสูตรผลิตที่ 4 และ 5 เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรมทุกตัวแปร แต่สูตรที่ 5 มีการใช้น้ำมันมากถึงร้อยละ 5.0 ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมที่สุดคือ สูตรที่ 4 เนื่องจากสมบัติพื้นฐานทุกตัวอยู่ในข้อกำหนดและต้นทุนในการผลิตไม่แตกต่างจากพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตในระดับอุตสาหกรรม

4.2 การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุเชื่อมประสาน

ได้ทดสอบสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของวัสดุเชื่อมประสาน (binder) ทั้ง 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน ดังที่กล่าวในบทที่ 3 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2

4.2.1 การทดสอบเพนิเทรชัน (penetration)

ค่าเพนิเทรชันเป็นค่าที่บอกความแข็งอ่อนของวัสดุเชื่อมประสาน ค่าเพนิเทรชันที่ต่ำหมายถึงวัสดุเชื่อมประสานมีความแข็ง ซึ่งจะเกิดการเสียรูปหรือการเกิดร่องล้อได้ยากกว่าวัสดุเชื่อมประสานที่มีค่าเพนิเทรชันที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามค่าเพนิเทรชันเป็นค่าที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถทราบสมบัติที่อุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำได้

เนื่องจากการหาสูตรผลิตที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน ได้ใช้ค่าเพนิเทรชันเป็นตัวควบคุมเบื้องต้น ดังนั้นค่าเพนิเทรชันของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนจึงไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าร้อยละของเพนิเทรชันเดิม (retained penetration) ซึ่งเป็นการหาค่าเปอร์เซ็นต์เพนิเทรชันคงเหลือหลังจากผ่านการอบให้ความร้อนด้วยวิธี Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) เมื่อวัสดุเชื่อมประสานถูกอบด้วยความร้อน จะมีความแข็งเปราะมากขึ้น ส่งผลให้ความยืดหยุ่นลดน้อยลง เกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น ซึ่งถ้าค่าร้อยละของเพนิเทรชันเดิมมีค่าใกล้ 100 หมายความว่า วัสดุเชื่อมประสานมีความต้านทานการถูกอบด้วยความร้อนได้มาก เนื่องจากความแตกต่างของค่าเพนิเทรชันระหว่างก่อนอบและหลังอบมีค่าน้อย จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน มีค่าร้อยละของเพนิเทรชันเดิมเท่ากับ 81.6 ซึ่งมากกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ที่มีค่าเท่ากับ 75.9 แสดงว่าสารเติมแต่งเพื่อลดอุณหภูมิการใช้งานช่วยให้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์เกิดการเสียสภาพจากการถูกอบด้วยความร้อนน้อยลง

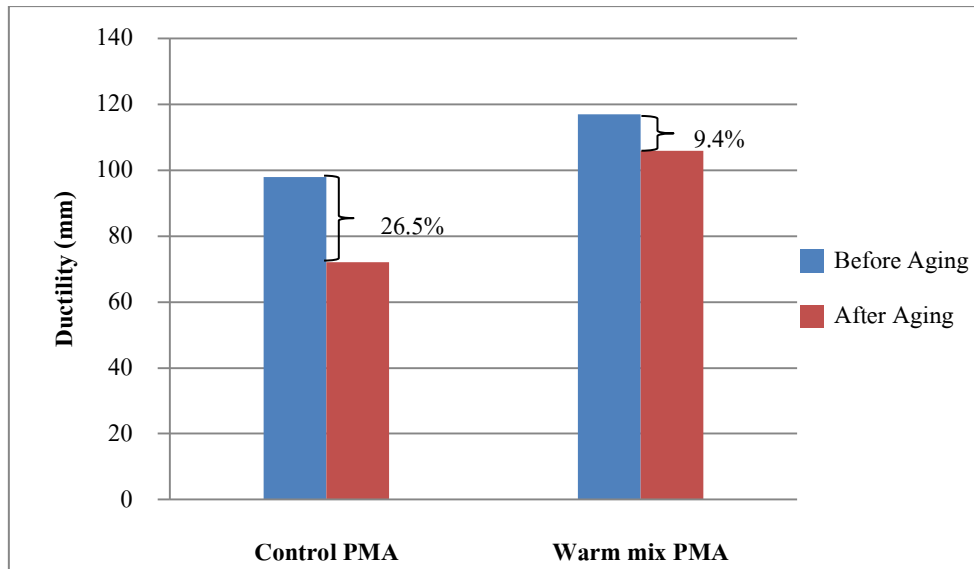
4.2.2 การทดสอบจุดอ่อนตัว (softening point)

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าจุดอ่อนตัวของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมมีค่าไม่แตกต่างกันคือ มีค่าเท่ากับ 85.6 และ 87.0 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งจุดอ่อนตัวที่สูงนี้จะทำให้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์มีการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างที่อุณหภูมิสูงได้ดีและยังป้องกันการไหลเยิ้มของวัสดุเชื่อมประสานได้

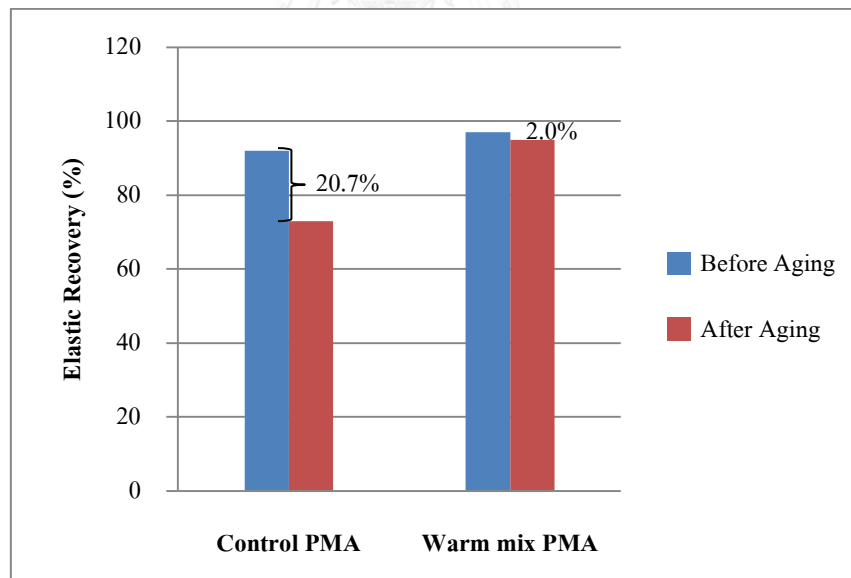
4.2.3 การทดสอบการดึงยืด (ductility) และการยืดหยุ่นตัวกลับ (elastic recovery)

การทดสอบความสามารถในการยืดดึงและการยืดหยุ่นตัวกลับของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน มีแนวโน้มผลการทดสอบเหมือนกันคือ พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน มีความสามารถในการดึงยืดและการยืดหยุ่นตัวกลับดีกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมทั้งก่อนและหลังการอบด้วยความร้อน เนื่องจากมีค่าการยืดดึงและค่าร้อยละการคืนตัวกลับมากกว่า เมื่อสังเกตลักษณะการขาดของชิ้นทดสอบการยืดดึง จะพบว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนขาดในลักษณะที่เป็นเส้นเล็กลงเรื่อยๆ จนขาด ในขณะที่พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมจะขาดทั้งที่เป็นเส้นหนาในลักษณะของการหักเนื่องจากความเปราะ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน มีความต้านทานการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม

เมื่อพิจารณาความแตกต่างก่อนการอบด้วยความร้อนและหลังการการอบด้วยความร้อนของค่าการยืดดึงและร้อยละการคืนตัวกลับ พบว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมมีความแตกต่าง 26.5 และ 20.7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนมีความแตกต่าง 9.4 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังกล่าว จะเห็นว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนมีค่าความแตกต่างต่ำเมื่อเปรียบเทียบระหว่างก่อนการอบด้วยความร้อน และหลังการอบด้วยความร้อน แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน เกิดการเสถียรภาพหลังจากการถูกอบด้วยความร้อนน้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละของเพนิเทรชันเดิมในข้อ 4.2.1



รูปที่ 4.1 ค่าการยืดดึงก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น



รูปที่ 4.2 ค่าร้อยละการคืนตัวกลับก่อนและหลังการอบด้วยความร้อนของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น

4.2.4 การทดสอบความหนืดแบบ Brookfield

ตารางที่ 4.3 เป็นตารางแสดงค่าความหนืด Brookfield ที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยความสัมพันธ์ของความหนืดและอุณหภูมิจะใช้ในการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผสมและการบดอัดของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่าง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.5.1

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืด Brookfield ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ	Brookfield Viscosity (cP)	
	Control PMA	Warm mix PMA
100	10540	18450
120	2901	2325
135	1329	742
140	1098	529
160	502	194
180	248	95
200	136	56

จากตารางจะเห็นว่าที่อุณหภูมิเริ่มต้น 100 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนจะมีความหนืดสูงกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 120 องศาเซลเซียส ความหนืดของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนจะต่ำกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม โดยการทดสอบนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Gandhi [14] ที่พบว่าการเติมสารเติมแต่ง Sasobit จะช่วยทำให้ความหนืดของวัสดุเชื่อมประสานลดลง และจากการศึกษาของ Edwards [20] พบว่าจุดเริ่มกลับแข็งตัวของ (congealing point) ของ Sasobit อยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า Sasobit จะเริ่มแข็งตัว จึงทำให้วัสดุเชื่อมประสานที่ใส่ Sasobit มีความหนืดสูงที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า

การวัดค่าความหนืดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียสเป็นการจำลองความหนืดในขณะสุบถ่าย ซึ่งตามข้อกำหนดต้องไม่เกิน 3.0 Pa.s จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าทั้งพอลิเมอร์

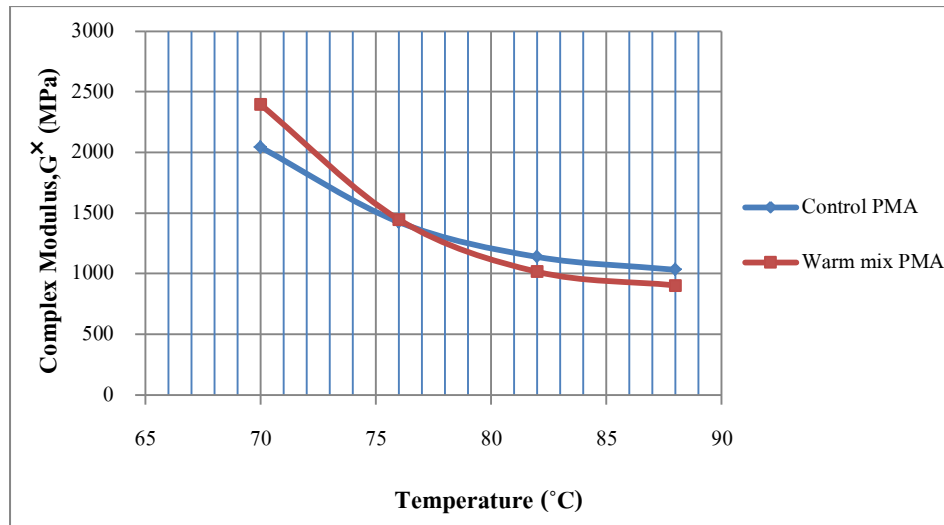
โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอยู่ในข้อกำหนด แต่พอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน มีความหนืดน้อยกว่าซึ่งจะทำให้สูบลายได้ง่าย ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูบลายสูง ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน

4.3 การทดสอบสมบัติการไหล (rheological properties)

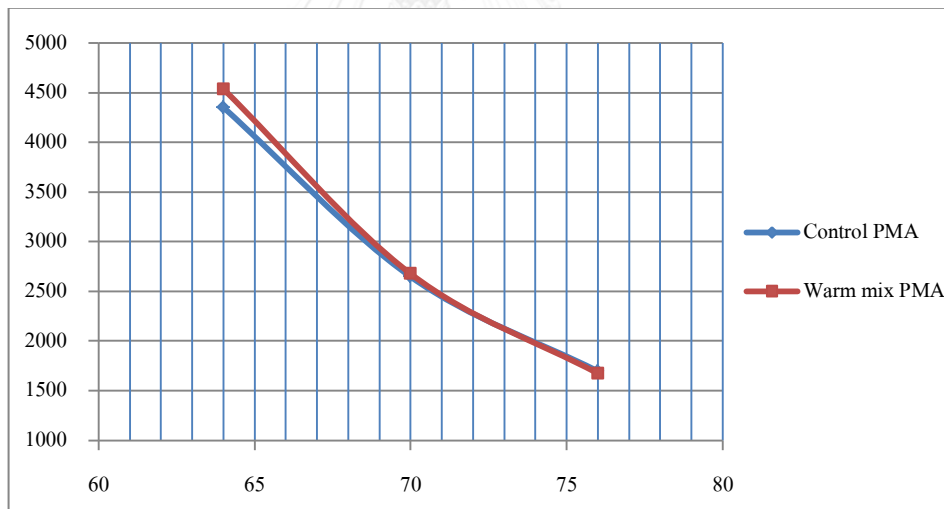
4.3.1 การทดสอบโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อน (complex shear modulus)

การทดสอบด้วยเครื่อง dynamic shear rheometer (DSR) เพื่อวัดค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อน (G^*) และค่ามุม (phase angle, δ) ของวัสดุเชื่อมประสาน ค่า G^* เป็นค่าที่บอกความแข็งแรง (stiffness) หรือแสดงความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) ของวัสดุ โดยกำหนดให้ค่า $G^*/\sin \delta$ เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการต้านทานการเกิดร่องล้อ (rutting resistance) อ้างอิงจากระบบ SHRP (strategic highway research project) วัสดุเชื่อมประสานทั่วไปต้องมีค่า $G^*/\sin \delta$ มากกว่า 1.00 kPa ส่วนวัสดุเชื่อมประสานที่ผ่านการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT ต้องมีค่า $G^*/\sin \delta$ มากกว่า 2.20 kPa จึงจะทำให้วัสดุเชื่อมประสานมีความแข็งแรงพอที่จะไม่ทำให้เกิดร่องล้อได้ที่อุณหภูมิใช้งานและใช้ข้อกำหนดนี้ในการกำหนดเกรดแบบ PG (Performance Grade) ของวัสดุเชื่อมประสานในช่วงอุณหภูมิสูง

รูปที่ 4.3 และ 4.4 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อน และอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานก่อนการอบด้วยความร้อนและหลังการอบด้วยความร้อนตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่า กราฟทั้งสองมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ พอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมจะสูงกว่าพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Gandhi [14] และ Kherandmand [16] ที่สรุปว่า การเติมสาร Sasobit ซึ่งเป็นสารที่เติมเพื่อลดอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสาน จะทำให้ค่าความแข็งแรงและค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะให้ความแข็งแรงและความต้านทานการเกิดร่องล้อลดลง



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเชิงซ้อนและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานก่อนการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT

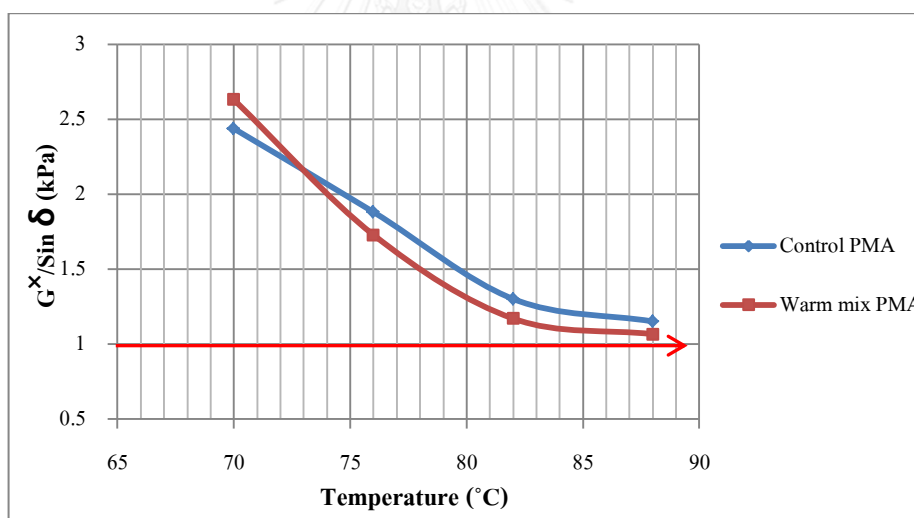


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสเชิงซ้อนและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานหลังการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT

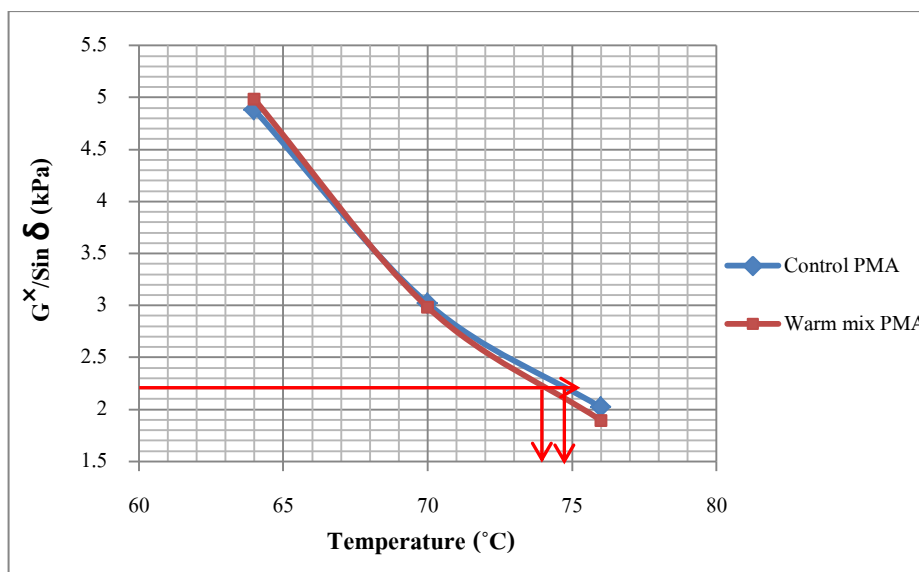
รูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานการเกิดร่องล้อและอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น มีความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การต้านทานการเกิดร่องล้อของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นต่ำกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่า

ความแข็งแรง แต่ไม่ส่งผลในแง่ประสิทธิภาพการใช้งาน เนื่องจากในการพิจารณาการเกิดร่องล้อจะทดสอบที่อุณหภูมิ 50 หรือ 60 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิผิวหน้าของถนน

เมื่อพิจารณาข้อกำหนดของระบบ SHRP ของวัสดุเชื่อมประสานก่อนการอบด้วยความร้อน ต้องมีค่า $G^*/\sin \delta$ มากกว่า 1.00 kPa พบว่าทั้งพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 88 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาค่า $G^*/\sin \delta$ ของวัสดุเชื่อมประสานหลังจากผ่านการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT ซึ่งเป็นการจำลองการเสื่อมสภาพในขั้นตอนการผสมวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวม พบว่าอุณหภูมิวิกฤติ หรืออุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานได้ของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น คือ 74.8 และ 74.0 องศาเซลเซียสตามลำดับ เมื่อทำการแบ่งเกรดแบบ PG ซึ่งจะเลือกอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ จึงทำให้เกรดแบบ PG ของวัสดุเชื่อมประสานทั้งสองชนิดจะเท่ากับ 70



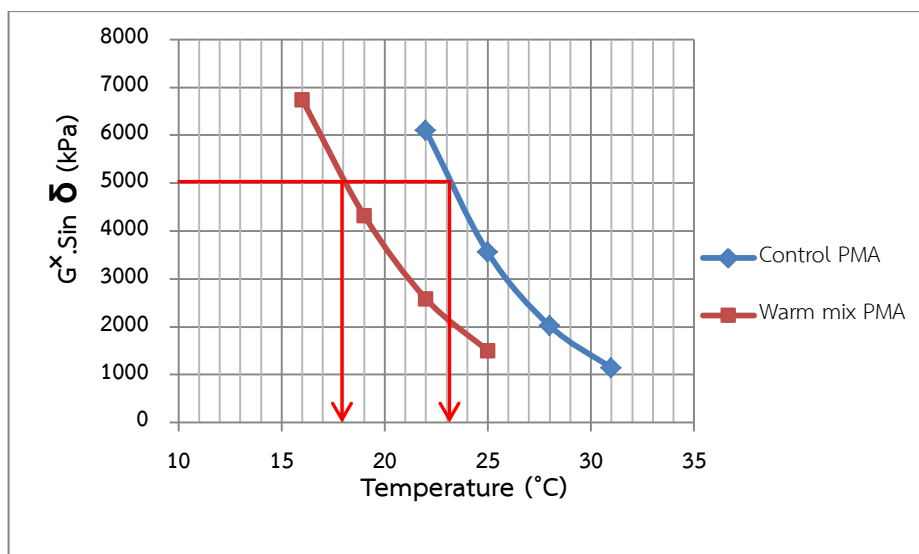
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานการเกิดร่องล้อและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานก่อนการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานการเกิดร่องล้อและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานหลังการอบด้วยความร้อนด้วยวิธี RTFOT

4.3.2 การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (fatigue test)

โดยทั่วไปการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าของผิวทางมักจะเกิดในช่วงอุณหภูมิปานกลางถึงอุณหภูมิต่ำ หลังจากผิวทางเปิดให้บริการเป็นช่วงเวลาหนึ่ง ดังนั้นตามข้อกำหนดของ SHRP จึงระบุสมบัตินี้ด้วยการใช้วัสดุเชื่อมประสานที่ผ่านการอบให้ความร้อนด้วยวิธี RTFOT และวิธี PAV (pressure aging vessel) กำหนดให้ใช้ค่าความแข็งแรงและค่ามุมในการควบคุม โดยให้ค่า $G^* \sin \delta$ เป็นค่าที่แสดงการแตกร้าวเนื่องจากความล้าของวัสดุเชื่อมประสาน วัสดุเชื่อมประสานต้องมีค่า $G^* \sin \delta$ ไม่นเกิน 5,000 kPa จึงจะสามารถทนต่อการแตกร้าวเนื่องจากได้รับแรงกระทำซ้ำๆ กันได้ จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีค่า $G^* \sin \delta$ น้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมในทุกๆ อุณหภูมิการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นเกิดการแตกร้าวได้น้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการใช้งาน ซึ่งพิจารณาจากอุณหภูมิที่ทำให้ค่า $G^* \sin \delta$ เท่ากับ 5,000 kPa จะเห็นว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้งานได้ ที่ทำให้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้คือ 18 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถใช้งานได้ของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมคือ 23.1 องศาเซลเซียส แสดงว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม



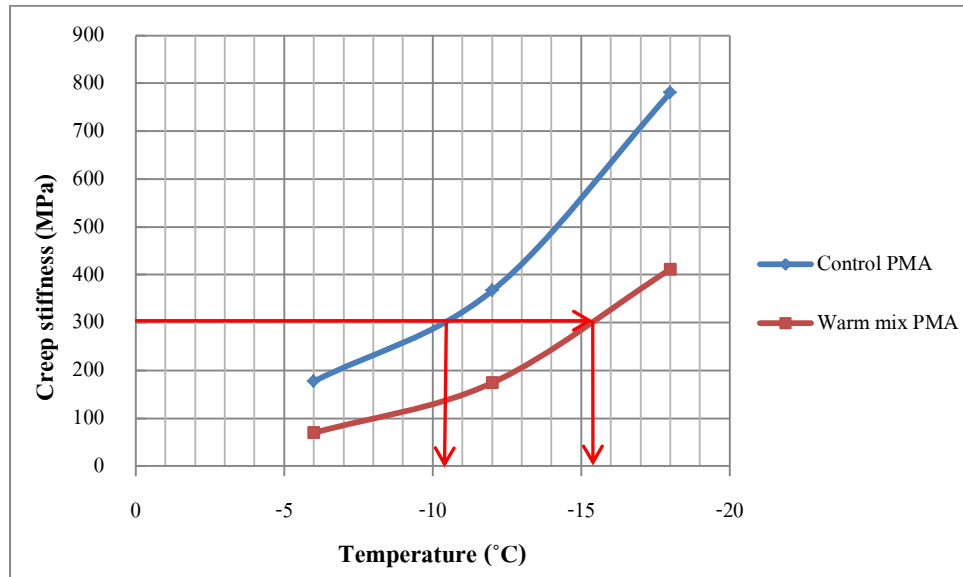
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการต้านทานการแตกร้าวและอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสาน

4.3.3 การทดสอบการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ (low-temperature cracking test)

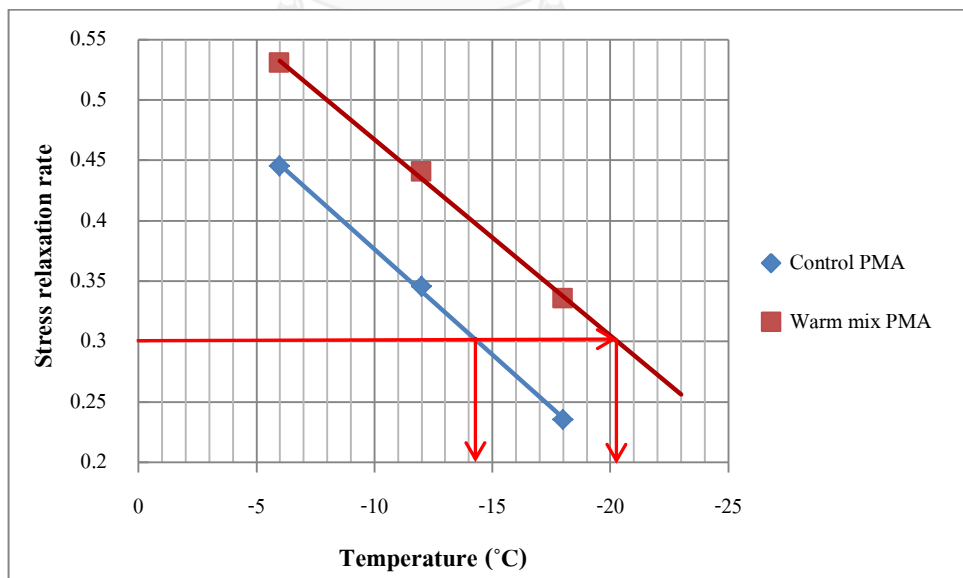
การศึกษาการต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำจะทดสอบโดยใช้เครื่อง bending beam rheometer (BBR) ค่า S-value หรือ creep stiffness เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่ำ โดยวัสดุเชื่อมประสานที่มีค่าความแข็งแรงสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวได้มากกว่าวัสดุเชื่อมประสานที่มีค่าความแข็งแรงต่ำ ส่วนค่า m-value หรือ stress relaxation rate เป็นค่าที่แสดงถึงการคลายแรงออกจากวัสดุ ซึ่งถ้าอัตราการคลายแรงสูงจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเชื่อมประสานจะลดลง

ในการทดสอบนี้ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ -6, -12 และ -18 องศาเซลเซียส ตามข้อกำหนดของการแบ่งเกรดของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่ำแบบ PG ค่าความแข็งแรงต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 300 MPa และอัตราการคลายแรงต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.30 จึงจะทำให้วัสดุเชื่อมประสานไม่แตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำใช้งาน จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าวัสดุเชื่อมประสานพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่า พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ในทุกๆ อุณหภูมิ และเมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของกราฟพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม มีแนวโน้มที่จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำ พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมมีแนวโน้มที่จะแตกร้าวมากกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น

ลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น และจากข้อกำหนดค่าความแข็งแรงแรงของระบบ SHRP พบว่า อุณหภูมิต่ำที่สุดที่สามารถใช้งานพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมได้คือ 10.5 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิต่ำที่สุดที่สามารถใช้งานได้ของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นคือ 15.5 องศา



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงแรงของวัสดุเชื่อมประสานกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าอัตราการคลายแรงของวัสดุเชื่อมประสานกับอุณหภูมิ

รูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคลายแรงและอุณหภูมิ พบว่าพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน มีค่าอัตราการคลายแรงสูงกว่าพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม และเมื่อพิจารณาข้อกำหนดอัตราการคลายแรงของระบบ SHRP พบว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ใช้งานได้ของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน คือ 14.2 และ 20.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ในการแบ่งเกรดที่อุณหภูมิต่ำแบบ PG จะพิจารณาจากอุณหภูมิวิกฤติหรืออุณหภูมิสูงที่สุดที่ใช้งานได้ พบว่าอุณหภูมิวิกฤติของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมเท่ากับ 10.5 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิวิกฤติของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนเท่ากับ 15.2 องศาเซลเซียส จากข้อมูลการทดสอบด้วยวิธี DSR และ BBR ทำให้สามารถแบ่งเกรดของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมได้เท่ากับ PG70-16 และพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนเท่ากับ PG70-22 นั่นคือ พอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ผลการศึกษาที่ต่างจากการศึกษาของ Gandhi [14] ที่พบว่าเกิดเติมสารเติมแต่ง Sasobit ในแอสฟัลต์ซีเมนต์จะทำให้การแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำของแอสฟัลต์ซีเมนต์สูงขึ้น คือมีค่าความแข็งแรงสูง และอัตราการคลายแรงต่ำกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ควบคุม ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจาก Sasobit จัดเป็นสารประเภท macrocrystalline wax [19] ที่อุณหภูมิต่ำ Sasobit จึงสามารถเกิดผลึกได้มาก ทำให้มีความแข็งแรงและแตกร้าวได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ

4.4 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวม (Aggregate)

ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดได้แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวมทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดพบว่า ค่าที่ได้ผ่านตามเกณฑ์ที่ใช้เป็นข้อกำหนดของกรมทางหลวงทุกประการ สามารถนำมาก่อสร้างชั้นผิวทาง (wearing course) ได้ ขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.4 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม

Aggregate	Properties				Method
	Bulk Specific Gravity (Dry)	Bulk Specific Gravity (SSD)	Apparent Specific Gravity	% Water Absorption	
Hot Bin 1	2.674	2.703	2.754	1.08	ASTM C 128
Hot Bin 2	2.61	2.634	2.673	0.895	ASTM C 127
Hot Bin 3	2.623	2.64	2.669	0.659	ASTM C 127
Hot Bin 4	2.634	2.647	2.667	0.463	ASTM C 127

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบสมบัติของวัสดุมวลรวม

Properties	Unit	Method	Tolerances	Results
Coarse Aggregate				
Los Angeles Abrasion	%	ASTM C 131	≤40	29.5
Soudness (Sodium Sulfate)	%	ASTM C 88	≤9	1.3
Flakiness Index	-	BS 812-105-1	≤30	25.8
Coating	%	AASHTO T182	≥95	97
Fine Aggregate				
Sand Equivalent	%	ASTM D 2419	≥50	69.2
Soudness (Sodium Sulfate)	%	ASTM C 88	≤9	1.7

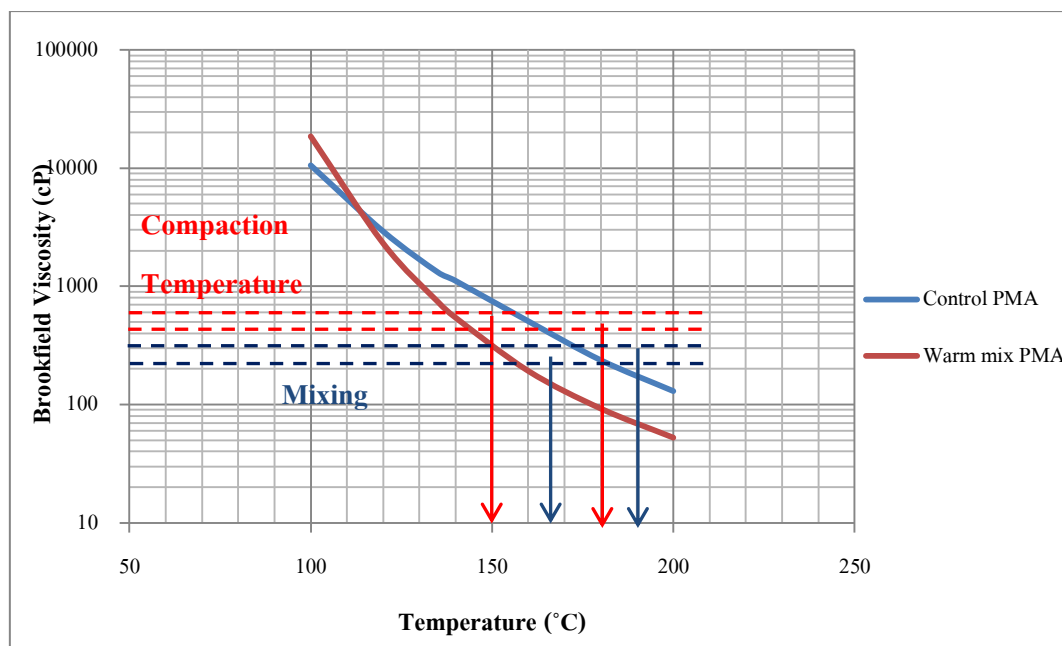
ตารางที่ 4.6 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

Nominal Size		Filler	HB1	HB2	HB3	HB4	Combine	Tolerances		DH-S 409/2549	
Proportion %		2	49	19	25	5	100			Wearing Course	
Mesh	# mm							Lower	Upper	Lower	Upper
1 1/2	37.5	100	100	100	100	100	100.0	100.0	100.0		
1	25	100	100	100	100	100	100.0	95.0	100.0		
3/4	19	100	100	100	100	92.3	99.6	94.6	100.0	100	100
1/2	12.5	100	100	100	90.6	25.2	93.9	88.9	98.9	80	100
3/8	9.5	100	100	100	40.7	10.3	80.7	75.7	85.7		
4	4.75	100	100.0	28.7	0.7	0.3	56.6	51.6	61.6	44	74
8	2.36	100	74.6	5.1	0.1	0.0	39.5	34.5	44.5	28	58
16	1.18	100	47.3	3.6	0.1	0.0	25.9	21.9	29.9		
30	0.6	100	32.5	2.8	0.1	0.0	18.5	14.5	22.5		
50	0.3	100	24.2	2.4	0.1	0.0	14.3	10.3	18.3	5	21
100	0.15	95	17.1	1.9	0.1	0.0	10.7	7.7	13.7		
200	0.08	88	12.5	1.3	0.1	0.0	8.2	6.2	10.2	2	10
Bulk Sp Gr		2.700	2.703	2.634	2.640	2.647	2.671				

4.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

4.5.1 การเลือกอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิการบดอัดของวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวม

การพิจารณาเลือกใช้อุณหภูมิการผสมและอุณหภูมิการบดอัดจะพิจารณาจากความหนืด ความหนืดที่เหมาะสมสำหรับการผสมวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวมอยู่ในช่วง 170 ± 20 เซนติพอยส์ และความหนืดที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดจะอยู่ในช่วง 280 ± 30 เซนติพอยส์ จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผสมและการบดอัดของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม คือ 190 และ 180 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในขณะที่พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีอุณหภูมิ สำหรับการผสมและการบดอัดคือ 165 และ 150 ตามลำดับ จะเห็นว่า การเติมสารเติมแต่งนี้ช่วยลด อุณหภูมิการผสมและการบดอัดลงได้ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของวัสดุเชื่อมประสานกับอุณหภูมิ

4.5.2 การหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum asphalt content)

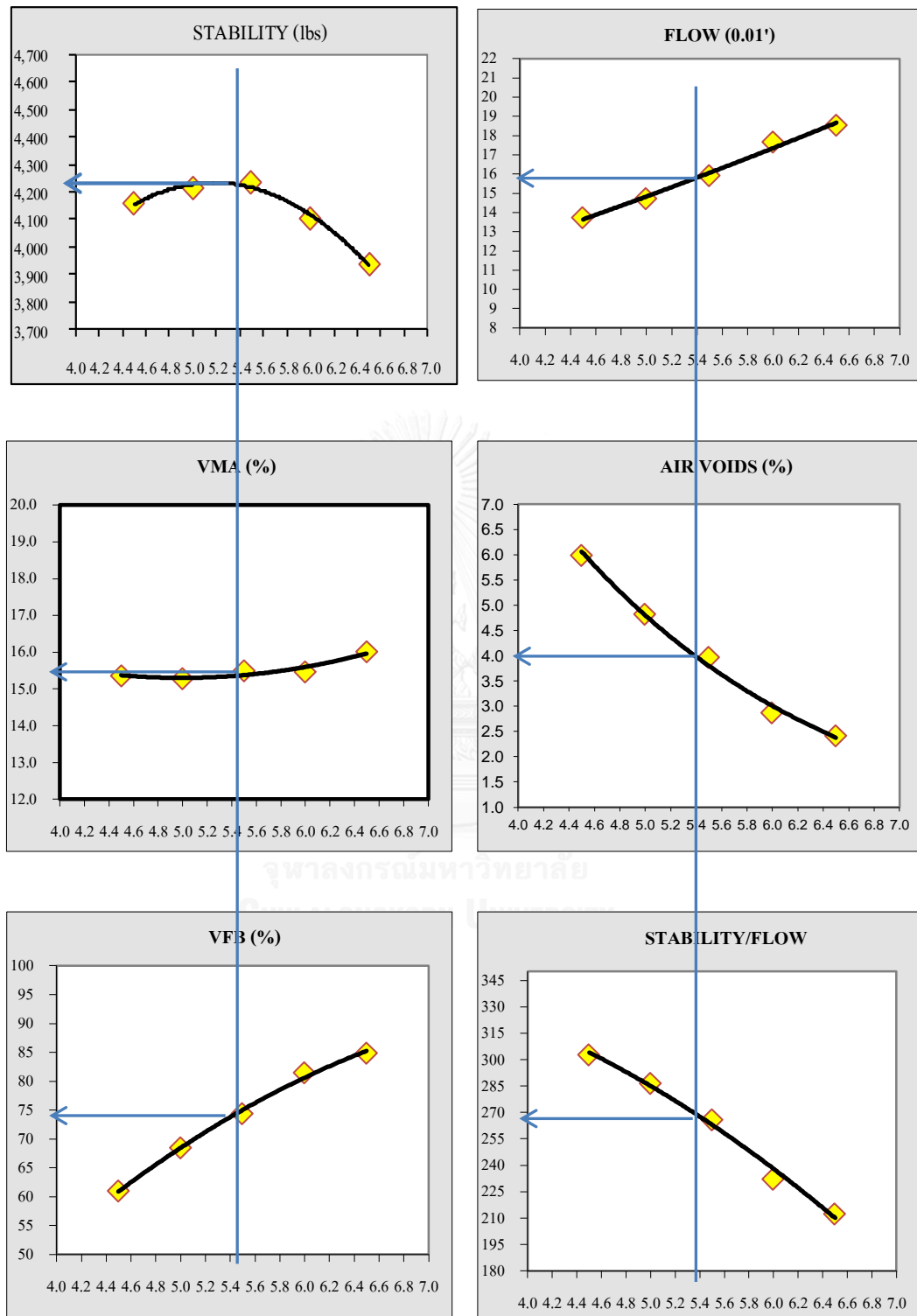
การหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมสำหรับผสมกับวัสดุมวลรวมจะใช้วิธีการทดสอบ มาร์แชล โดยจะแบ่งชุดตัวอย่างออกเป็นหลายๆ ชุด แต่ละชุดตัวอย่างจะมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่แตกต่างกัน เมื่อนำผลการทดสอบไปเขียนความสัมพันธ์จะสามารถหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมได้ สำหรับการทดสอบจะจัดให้ชุดตัวอย่างมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานแตกต่างกัน โดยแต่ละครั้งเพิ่มปริมาณร้อยละ 0.5 ควรมีค่าปริมาณวัสดุเชื่อมประสานไม่น้อยกว่า 2 ค่าก่อนถึงจุดเหมาะสม (optimum) และมีอย่างน้อย 2 ค่า ที่เลยจุดเหมาะสมไปแล้ว

ในงานศึกษานี้แบ่งชุดตัวอย่างออกเป็น 5 ชุดๆ ละ 3 ตัวอย่าง แต่ละชุดมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานร้อยละ 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 และ 6.0 โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม หลังจากทำการบดอัดตัวอย่าง นำตัวอย่างมาทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12

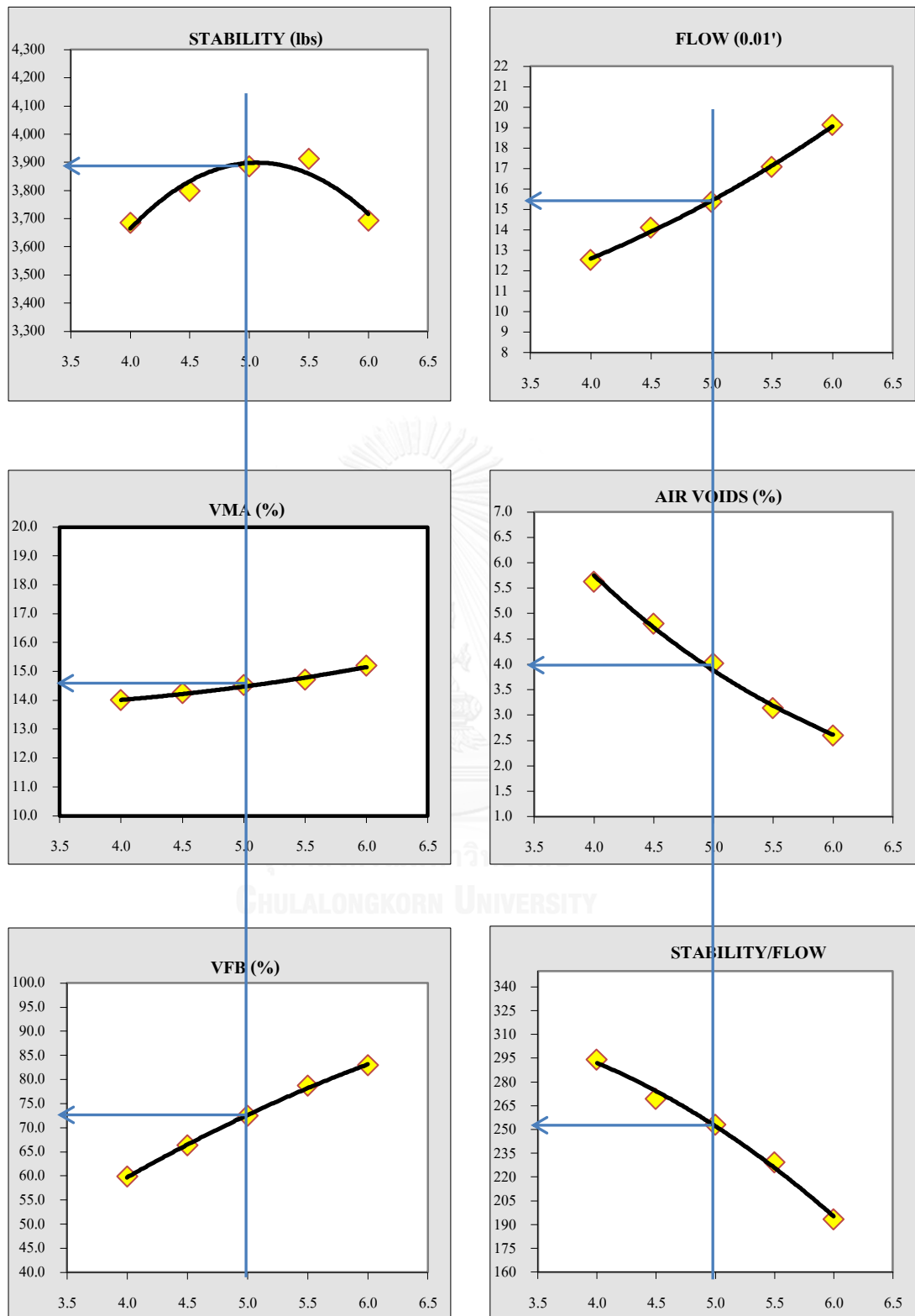
เมื่อพิจารณาร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับ 4 จะเห็นว่าพอลิเมอร์โมดิไฟเออร์แอสฟัลต์ผสมอุนมีแนวโน้มที่จะใช้ปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสม (optimum binder content) น้อย

กว่าพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม โดยปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น คือร้อยละ 5.0 ส่วนปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมของพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม คือร้อยละ 5.4 ทำให้เห็นว่าในการก่อสร้างถนนที่ใช้พอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น จะทำให้ประหยัดกว่าพอลิเมอร์โม่ติฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม





รูปที่ 4.11 กราฟข้อมูลของพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล



รูปที่ 4.12 กราฟข้อมูลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล

4.5.3 ผลทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

เมื่อพิจารณาค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบมาร์แชลที่จุดที่มีค่าปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าวัสดุเชื่อมประสานทุกตัวผ่านข้อกำหนด ยกเว้นพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัดที่ 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีช่องว่างอากาศมากกว่าก่อนตัวอย่างอื่น ซึ่งเกิดจากความหนืดที่มากเกินไปของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ทำให้ผสมกับวัสดุมวลรวมและบดอัดได้ไม่ดี แสดงให้เห็นว่าถึงแม้วัสดุเชื่อมประสานพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมจะอยู่ในข้อกำหนดตามมาตรฐานอุตสาหกรรม แต่เมื่อนำมาทำการผสมและบดอัดกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานต่ำและไม่ผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวง ตัวอย่างที่ทดสอบแล้วมีประสิทธิภาพการใช้งานดีที่สุด คือพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น ที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานที่ดี และความหนืดต่ำสามารถผสม บดอัดเข้ากับวัสดุมวลรวมได้เป็นอย่างดี

พิจารณาพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียสจะเห็นว่ามีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัดที่ 150 องศาเซลเซียส ทดแทนการใช้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียสได้ อย่างไรก็ตามการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานเบื้องต้น ดังนั้นจึงควรทดสอบด้วยวิธีทดสอบอื่นเพื่อให้ทราบสมบัติเชิงกลที่มากขึ้น

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลที่จุด optimum binder content

Properties	ข้อกำหนด	Control	Control	Warm mix	Warm mix
		PMA 150°C	PMA 180°C	PMA 150°C	PMA 180°C
Binder Content (%)	3-7	5.4	5.4	5.0	5.0
Air void (%)	3-5	5.7	4.0	4.0	3.5
Marshall Stability (lbs)	>3000	3187	4230	3890	4458
Flow (0.01')	8-16	18.4	15.8	15.4	14.5
Stability/Flow	>210	173	265	252	307
%VMA	>14	16.0	15.4	14.5	14.0
%VFB	-	64.7	74.5	72.4	75.3
Marshall Density (g/cm ³)	-	2.354	2.380	2.397	2.410

4.5.4 ผลการทดสอบ stiffness modulus ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า stiffness modulus ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ EN12697-26 “Standard Test Method for Indirect Tensile Test for Stiffness Modulus of Bituminous Mixtures” ค่าที่ได้เป็นค่าที่แสดงถึงการต้านทานการรับน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จากตารางที่ 4.8 พบว่าแนวโน้มของการทดสอบเหมือนกับ การทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล คือพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควมที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส มีค่า stiffness modulus ต่ำสุด พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียส มีค่า stiffness modulus สูงสุด เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียสพบว่ามีค่า stiffness modulus สูงกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควมที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบ DSR ของวัสดุ

เชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 64 องศาเซลเซียส ค่าความแข็งแรงแรงของพอลิเมอร์โมดิฟายแอสฟัลต์ผสมอุ่นสูงกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายแอสฟัลต์ควบคุม แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเติมแต่งที่ลดอุณหภูมิการใช้งานนี้ นอกจากจะช่วยลดอุณหภูมิผสมและบดอัด ทำให้สามารถผสมและบดอัดในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายแอสฟัลต์ควบคุมถึง 30 องศาเซลเซียส ยังช่วยทำให้ค่า stiffness modulus สูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตสามารถรับต้านทานการรับน้ำหนักที่มากกระทำได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบ stiffness modulus โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

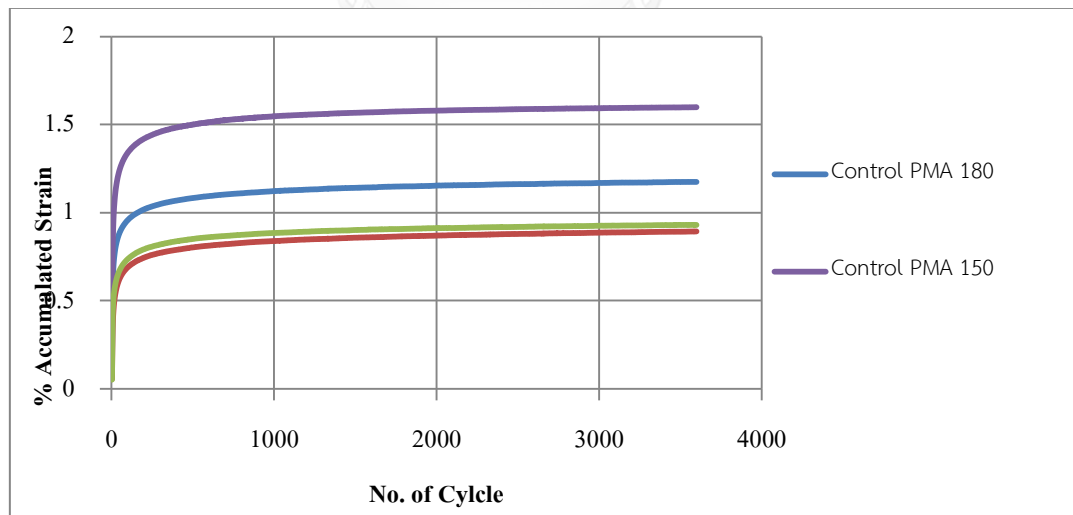
ITSM @ 25°C	Control	Control	Warm mix	Warm mix
	PMA 150°C	PMA 180°C	PMA 150°C	PMA 180°C
Sample 1	2342	3025	3323	3738
Sample 2	2272	2927	3201	3842
Sample 3	2322	2706	3489	3890
Average	2312	2886	3338	3823

4.5.5 ผลการทดสอบการยุบตัวแบบถาวร (dynamic creep test)

การทดสอบการยุบตัวแบบถาวร (permanent deformation) จะพิจารณาการเกิดความเครียดสะสม (accumulated strain) ที่เกิดจากการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำตามแนวแกนของก้อนตัวอย่างจำนวน 3,600 รอบ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาที่ช่วงแรก(0-500 รอบ) ของการป้อนน้ำหนักให้ก้อนตัวอย่าง จะเห็นว่าตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดมีอัตราการยุบตัวที่สูงมากในช่วงเวลาสั้นๆ เนื่องจากก้อนตัวอย่างจะเริ่มแน่นอย่างรวดเร็วเพราะน้ำหนักที่มากกระทำ วัสดุมวลรวมภายในจะมีการเคลื่อนตัว และจัดเรียงตัวกันใหม่ขึ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ข้อมูลในช่วงนี้ประเมินสมบัติการยุบตัวของตัวอย่างได้

ที่จำนวนรอบตั้งแต่ 500 ขึ้นไปหลังจากตัวอย่างแน่นขึ้น และการเคลื่อนตัวของวัสดุมวลรวมลดลง เป็นช่วงที่ใช้พิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดสะสมหรือการยุบตัว โดยพิจารณาได้จากความชันของกราฟ จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าความชันของกราฟของก้อนตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดสะสมของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดมีค่าไม่

แตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาที่จำนวนรอบ 3,600 รอบจะเห็นว่า พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียสเกิดความเครียดสะสมมากที่สุดคือ 1.60 เปอร์เซ็นต์ พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเกิดความเครียดสะสมเท่ากับ 1.17 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.93 และ 0.89 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณช่องว่างในอากาศ เนื่องจากพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียสมีช่องว่างในอากาศมากที่สุดจึงทำให้เกิดการยุบตัว และการเคลื่อนตัวของวัสดุรวมรวมได้มากกว่าก้อนตัวอย่างอื่น แสดงให้เห็นว่าช่องว่างในอากาศเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดร่องล้อในแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากนี้การทดลองนี้สัมพันธ์กับการทดสอบร่องล้อของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสสูงกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม การทดสอบนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Rouzbeh [18] ที่ใช้เทคนิค creep compliance ในการหาการต้านทานการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่าง ซึ่งพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสจะมีความต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตควบคุม



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเครียดสะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตและจำนวนรอบ

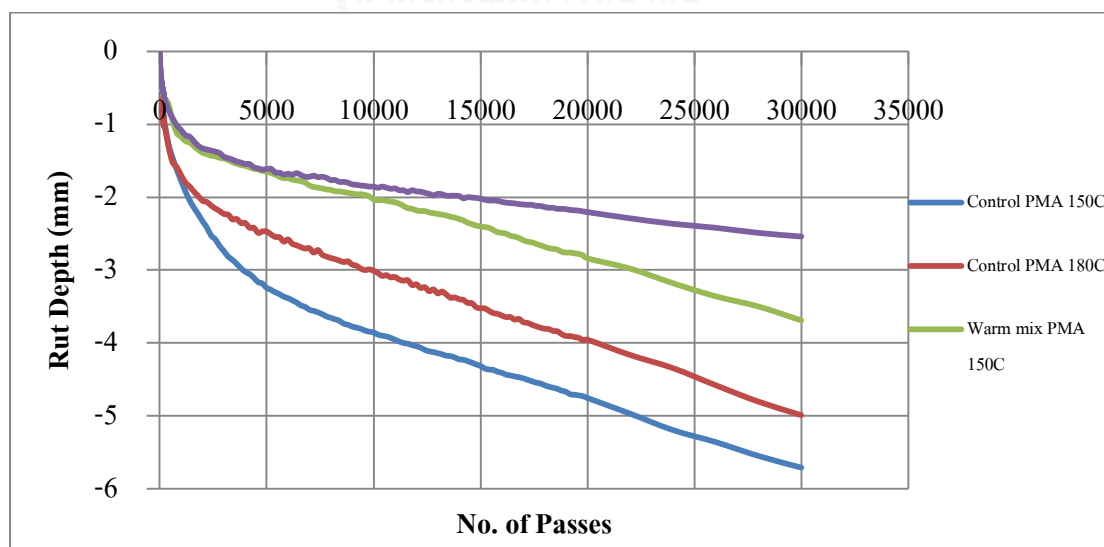
4.5.6 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อ (Hamburg wheel tracking method)

การทดสอบการต้านทานการเกิดร่องล้อทดสอบโดยใช้เครื่อง Hamburg wheel tracking test อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ AASHTO 324 “Hamburg wheel-track testing of compacted hot mix asphalt” โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสทั้งสภาวะแห้งและสภาวะเปียก (dry and wet mode) จำนวน 15,000 รอบ แล้ววัดร่องล้อที่เกิดขึ้น ตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น เกิดร่องล้อย่ต่ำกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมทุกอุณหภูมิการบดอัด และมีค่า dynamic stability หรือจำนวนรอบที่ทำให้เกิดร่องล้อ 1 มิลลิเมตร สูงกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมทั้งในสภาวะแห้งและเปียก ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบการเกิดร่องล้อโดยวิธี dynamic creep test

ในการทดสอบนี้นอกจากจะแสดงค่าการเกิดร่องล้อแล้วยังสามารถใช้บอกความต้านทานการเสียดสีจากความชื้นได้ (moisture susceptibility) โดยพิจารณาจากการทดสอบในสภาวะเปียก ว่าเกิดการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสานและวัสดุมวลรวมหรือไม่ โดยการหลุดลอกนี้พิจารณาได้จากการเกิด stripping inflection point ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดร่องล้อย่กับจำนวนรอบ หรือสังเกตตัวอย่างด้วยสายตาว่ามีการหลุดลอกหรือไม่ จากรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์การเกิดร่องล้อย่ของแอสฟัลต์คอนกรีตกับจำนวนรอบที่ 15,000 รอบ จะเห็นว่าไม่มีการเกิด stripping inflection point และรูปที่ 4.15 จะเห็นว่าไม่มีการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสานหรือวัสดุมวลรวม แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นไม่เหนียวนำไปเกิดการเสียดสีจากความชื้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zahid [16] ที่พบว่า การเติมสารเติมแต่ง Sasobit ทำให้การเกิดร่องล้อย่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยลง และไม่เกิด stripping inflection point

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบการเกิดร่องล้อในสภาวะแห้งและเปียก

Properties	Control PMA 150°C	Control PMA 180°C	Warm mix PMA 150°C	Warm mix PMA 180°C
Wet Mode				
Rut Depth (mm)	5.76	4.99	4.05	2.54
No. of Cycle	15,000	15,000	15,000	15,000
Dynamic stability (cycle/mm)	2,604.20	3,006.00	3,703.70	5,905.50
Dry Mode				
Rut Depth (mm)	3.68	3.06	2.08	1.91
No. of Cycle	15,000	15,000	15,000	15,000
Dynamic stability (cycle/mm)	4,070.60	4,893.60	7,211.50	7,853.40



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์การเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตกับจำนวนรอบ



รูปที่ 4.15 แอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบการเกิดร่องล้อในสภาวะเปียก

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเติมสารเติมแต่งเพื่อลดอุณหภูมิการใช้งานของพอลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์ โดยเริ่มจากการหาปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่งเพื่อให้ได้พอลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์ผสมอ่อนที่สามารถผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดมาตรฐานอุตสาหกรรม ทำการทดสอบสมบัติพื้นฐาน และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนเพื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์ควบคุม จากนั้นเตรียมแอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างจากพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อน โดยใช้อุณหภูมิการบดอัด 150 และ 180 องศาเซลเซียส เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบว่าสามารถใช้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียสทดแทนการใช้พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียสได้หรือไม่ ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 วัสดุเชื่อมประสาน

- การเติมสารเติมแต่งเพื่อลดอุณหภูมิการใช้งานในพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ทำให้ความหนืดลดลง ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ความหนืดของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมมีค่าเท่ากับ 1.33 Pa.s ความหนืดของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนมีค่าเท่ากับ 0.74 Pa.s และเมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบดอัดของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมเท่ากับ 190 และ 180 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิผสมและอุณหภูมิบดอัดของพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนเท่ากับ 165 และ 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ แสดงว่าการเติมสารเติมแต่งนี้ทำให้สามารถลดอุณหภูมิการใช้งานลดได้ประมาณ 30 องศาเซลเซียส

- ค่าการดัดงอและค่าร้อยละการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุม แสดงว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีความยืดหยุ่นที่ดีกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุม
- การทดสอบสมบัติต่างๆ ของกากที่เหลือจากการอบด้วยวิธี RTFOT เปรียบเทียบค่าก่อนอบ พบว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีความแตกต่างระหว่างก่อนอบและหลังอบน้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุม แสดงว่าการเติมสารเติมแต่งช่วยลดการเสถียรภาพจากความร้อนได้
- การทดสอบการเกิดร่องล้อที่อุณหภูมิสูงด้วยเครื่อง DSR พบว่าที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 64 องศาเซลเซียสขึ้นไป พอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมมีแนวโน้มในการต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น ในขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 64 องศาเซลเซียสพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นจะสามารถต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุม
- การทดสอบการแตกร้าวเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิปานกลางด้วยเครื่อง DSR พบว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีค่า $G^* \cdot \sin \delta$ น้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมทุกๆ อุณหภูมิการทดสอบ ส่งผลให้พอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้น้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุม และสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า
- ค่าความแข็งแรงที่อุณหภูมิต่ำของพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมสูงกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น ในขณะที่อัตราการคลายแรงของพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมน้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น ซึ่งส่งผลให้พอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำได้มากกว่าพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น

5.1.2 ส่วนผสมพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

- พอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นใช้ปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับผสมแอสฟัลต์คอนกรีตน้อยกว่าพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ซึ่งพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นใช้ปริมาณส่วนผสม 5.0 % ในขณะที่พอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมใช้ 5.4 %
- ค่าเสถียรภาพมาร์แชลจากแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 4 ตัวอย่างผ่านข้อกำหนดของกรมทางทุกตัวอย่าง โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียสมีค่ามากที่สุด คือ 4,458 ปอนด์ รองลงมาคือพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียส (ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 4,230 ปอนด์) พอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียส (ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 3,890 ปอนด์) และพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียส (ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 3,187 ปอนด์) ตามลำดับ
- ค่าการไหลมาร์แชลพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียสที่ไม่ผ่านข้อกำหนด ในขณะที่ตัวอย่างอีก 3 แบบผ่านข้อกำหนด โดยพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียสมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียสตามลำดับ
- ค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อการไหลมาร์แชลของพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียสที่ไม่ผ่านข้อกำหนด ในขณะที่ตัวอย่างอีก 3 แบบผ่านข้อกำหนด พอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียสมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ
- ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาควรรวมจากแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 4 ตัวอย่างผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวงทุกตัวอย่าง โดยพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต

ควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียสมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือพอลิเมอร์ โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์ โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปแรกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีความต้องการปริมาณวัสดุเชื่อมประสานน้อยกว่าพอลิเมอร์ โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม

- ค่า stiffness modulus ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการดึงทางอ้อมของ แอสฟัลต์คอนกรีตตัวอย่างที่เตรียมจากพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นมีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม นั่นคือที่ อุณหภูมิปานกลางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นจะมีค่าความต้านทานต่อการรับ แรงกระทำได้มากกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม โดยพอลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียสมีค่า stiffness modulus มากที่สุด รองลงมาคือพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่ อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่ อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่ อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละของช่องว่าง อากาศที่ได้จากการทดสอบมาร์แชล
- ความเครียดสะสมที่ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของพอลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นมีค่าน้อยกว่าพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุม ซึ่ง สอดคล้องกับการทดสอบการคืนตัวกลับของวัสดุเชื่อมประสาน โดยพอลิเมอร์โมดิฟายด์ แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียสมีความเครียดสะสมน้อย ที่สุด รองลงมาคือพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

- การทดสอบการเกิดร่องล้อทั้งในสภาวะแห้งและเปียกให้ผลที่เหมือนกันคือ โดยพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียสเกิดร่องล้อน้อยที่สุด รองลงมาคือพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด 180 องศาเซลเซียส และพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด 150 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นด้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีกว่าพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานของวัสดุเชื่อมประสานที่ทดสอบด้วยเครื่อง DSR
- การทดสอบร่องล้อของพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตผสมอุ่นทั้งที่อุณหภูมิการบดอัด 150 และ 180 องศาเซลเซียส ในสภาวะเปียกไม่พบการเกิด stripping inflection point แสดงว่าสารเติมแต่งเพื่อลดอุณหภูมิการใช้งานมีความสามารถในการต้านทานการเสียดสีจากความชื้นได้

จากการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมจากพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นที่อุณหภูมิการบดอัด 150 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถผ่านข้อกำหนดของกรมทางหลวงได้ทุกข้อกำหนด ถึงแม้จะใช้ปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมน้อยกว่าพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม อีกทั้งยังมีความต้านทานในการรับแรงกระทำ มีความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวร และมีความต้านทานการเกิดร่องล้อที่ดีกว่าพอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ควบคุม นั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้พอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นแทนที่ใช้พอลิเมอร์โม่ดีฟายด์แอสฟัลต์ควบคุมได้ นอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานดีขึ้น ยังช่วยลดอุณหภูมิการใช้งานได้อีก 30 องศาเซลเซียส ทำให้ประหยัดพลังงานได้มากขึ้น อีกทั้งยังส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากการลดอุณหภูมิการใช้งานจะช่วยทำให้กลิ่นและควันที่เกิดจากกระบวนการใช้งานลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- การอบให้ความร้อนเพื่อให้ยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นหลอมเหลวไม่ควรใช้อุณหภูมิเกินกว่า 165 องศาเซลเซียส และไม่ควรรอบเกิน 4 ชั่วโมง เนื่องจากจะทำให้สารเติมแต่งเสื่อมสภาพ
- ระยะเวลาในการผสมระหว่างยางพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ผสมอุ่นกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ไม่ควรเกิน 3 นาที เนื่องจากจะทำให้สารเติมแต่งเสื่อมสภาพ
- การใช้สารเติมแต่งเพื่อลดอุณหภูมิการใช้งานนี้ นอกจากจะส่งผลดีทั้งในแง่ของสมบัติเชิงกล พลังงาน และความปลอดภัยของผู้ใช้งานแล้ว ผู้รับเหมาก่อสร้างถนนยังสามารถใช้งานง่าย ไม่มีต้นทุนในการปรับเปลี่ยนเครื่องจักร หรือกระบวนการผสม เนื่องจากเป็นสารเติมแต่งที่สามารถเติมได้โดยตรงกับพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ กระบวนการทำงานจึงเหมือนกับการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ หรือพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ทั่วไป

รายการอ้างอิง

1. วัชรินทร์ วิทยกุล, แอสฟัลต์ระบบซูเปอร์เพฟ, ed. 1. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
2. บมจ ทิปโก้แอสฟัลท์, ผลิตภัณฑ์ยางมะตอยเบื้องต้นและการนำไปใช้งาน. [ออนไลน์]. 2559. สืบค้นจาก : <http://kmcenter.rid.go.th/kcdesign/dblog/upload/Asphalt-Product&Applications.pdf> [4 พฤษภาคม 2559]
3. Polymer Modified Asphalt. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : <http://www.e-asfalto.com/ingles/venezuela.pdf> [27 กรกฎาคม 2558]
4. Read, J. and Whiteoak, D. , The Shell Bitumen Handbook, ed. 5. 2003, England: Thomas Telford Publishing.
5. กรมทางหลวง, โครงการทดสอบผิวทาง warm mix asphalt. [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : <http://mai.doh.go.th/BT03/BT03C/2557/01%20Warm%20Mix%20Asphalt.pdf> [27 กรกฎาคม 2558]
6. กรมทางหลวง, การก่อสร้างถนนด้วยเทคนิคยางมะตอยผสมอุ่น Road construction by warm mix asphalt (WMA). [ออนไลน์]. 2558. สืบค้นจาก : <http://mai.doh.go.th/BT03/BT03C/2553/การก่อสร้างถนนด้วยเทคนิคการลดอุณหภูมิส่วนผสมแอสฟัลต์.pdf> [27 กรกฎาคม 2558]
7. วัชรินทร์ วิทยกุล, การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตซูเปอร์เพฟ, ed. 1. 2547, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
8. กรมทางหลวง, ลักษณะการชำรุดของผิวทาง. [ออนไลน์]. 2559. สืบค้นจาก: <https://www.google.co.th/#q=%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%81%E0%B8%A9%E0%B8%93> [25 เมษายน 2559]
9. วัชรินทร์ วิทยกุล, การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนวิธีมาร์แชล, ed. 1. 2544, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

10. ชยฉันทน์ พรหมศร, การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี Indirect tensile test เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์, กรมทางหลวง, 2541, รายงานฉบับที่ วพ.167, ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง: กรุงเทพฯ.
11. ชยฉันทน์ พรหมศร, ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก, เสกชัย อนุเวชศิริเกียรติ, พรชัย ศีลารมย์ และเอกพล อัครภาณิชย์กร, คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถระบายน้ำได้, กรมทางหลวง, 2553, รายงานฉบับที่ วพ. 213, ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง: กรุงเทพฯ.
12. M. Marcelo, D. Jo, B. Heather, and M. William. Evaluation of moisture and low-temperature cracking susceptibility of warm-mixture asphalt. International Journal of Pavement Engineering, 2012. 13: p. 395-400.
13. G. Tejash, R. William and A. Serji. Laboratory evaluation of warm mix asphalt ageing characteristics. International Journal of Pavement Engineering, 2010. 11: p. 133-142.
14. G. Tejash, A. Chandrakiran, and A. Serji. Laboratory evaluation of warm asphalt binder aging characteristics. International Journal of Pavement Engineering, 2009. 10: p. 353-359.
15. H. Zahid, Z. Musharraf, W. M. Nazimuddin, S. Justin, and O. A. Edgar. Rheological evaluation of warm mix and anti-stripping additives modified performance grade binders. Road Materials and Pavement Design, 2011. 12: p. 875-895.
16. B. Kheradmand, R. Muniandy, L.T. Hua, and A. Solouki. A laboratory investigation on the rheological properties of aged and unaged organic wax modified asphalt binder. Petroleum Science and Technology, 2015. 33: p. 757-764.
17. K. Amir and H. Leila. Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes. International Journal of Pavement Engineering, 2012. 13: p. 415-423.

18. G. Rouzbeh, S. Dharamveer, and Z. Musharraf. Laboratory evaluation of stiffness, low-temperature cracking, rutting, moisture damage, and fatigue performance of WMA mixes. Road Materials and Pavement Design, 2015. 16: p. 334-357.
19. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมมอดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง. 2547.
20. Y. Edwards and P. Redelius. Rheological Effects of Waxes in Bitumen. Energy and Fuels, 2003. 17.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
การคำนวณที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

1. การละลายในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีนของวัสดุเชื่อมประสาน

$$\text{สารที่ไม่ละลายไตรคลอโรเอธิลีน (A) (\%)} = [(B - C) / D] \times 100$$

เมื่อ B = น้ำหนักของครุซีเปิล กระจกกรอง และสารที่เหลือจากการกรอง (กรัม)

C = น้ำหนักของครุซีเปิลและกระจกกรอง (กรัม)

D = น้ำหนักวัสดุเชื่อมประสานเริ่มต้น

$$\text{การละลายในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน (\%)} = 100 - A$$

2. น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน (\%)} = [(A - B) / A] \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังให้ความร้อน (กรัม)

3. ความหนาแน่นของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของวัสดุเชื่อมประสาน (A)} = D - B / [(C - B) - (E - D)]$$

ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เมื่อ B = น้ำหนัก pycnometer (กรัม)

C = น้ำหนัก pycnometer ที่บรรจุน้ำ (กรัม)

D = น้ำหนัก pycnometer ที่บรรจุวัสดุเชื่อมประสาน 3 ใน 4 ส่วน (กรัม)

E = น้ำหนัก pycnometer ที่บรรจุวัสดุเชื่อมประสาน 3 ใน 4 ส่วนและน้ำ 1 ใน 4 ส่วน (กรัม)

ความหนาแน่นของวัสดุเชื่อมประสาน (F) = A x G

ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เมื่อ G = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นของวัสดุเชื่อมประสาน = F x H

ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

เมื่อ H = ค่าคงที่ที่ได้จากการเปิดตาราง 53B

หมายเหตุ ตารางที่ 53B คือตารางค่าคงที่ของการเปลี่ยนความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียส

เป็นความหนาแน่นที่ 15 องศาเซลเซียส

4. ร้อยละของเพนิเทรชันเต็ม

ร้อยละของเพนิเทรชันเต็ม = (A / B) x 100

เมื่อ A = เพนิเทรชันของวัสดุเชื่อมประสานหลังให้ความร้อนด้วยวิธี RTFOT

B = เพนิเทรชันของวัสดุเชื่อมประสานเริ่มต้น

5. ร้อยละความยืดหยุ่นกลับ

ร้อยละความยืดหยุ่นกลับ = [(A - B) / A] x 100

เมื่อ A = ระยะยืดเริ่มต้น (เซนติเมตร)

B = ระยะการหดตัวกลับ (เซนติเมตร)

6. ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งของวัสดุมวลรวม

ความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งของวัสดุมวลรวม = A / (B - C)

เมื่อ A = น้ำหนักหลังจากอบของวัสดุมวลรวม (กรัม)

B = น้ำหนักอิมตัวผิวแห้งของวัสดุมวลรวม (กรัม)

C = น้ำหนักที่ชั่งในน้ำของวัสดุมวลรวม (กรัม)

7. ความถ่วงจำเพาะสภาพอิ่มตัวผิวแห้งของวัสดุมวลรวม

$$\text{ความถ่วงจำเพาะสภาพอิ่มตัวผิวแห้งของวัสดุมวลรวม} = A / (A - B)$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งของวัสดุมวลรวม (กรัม)

$B =$ น้ำหนักที่ชั่งในน้ำของวัสดุมวลรวม (กรัม)

8. ความถ่วงจำเพาะปรากฏของวัสดุมวลรวม

$$\text{ความถ่วงจำเพาะปรากฏของวัสดุมวลรวม} = A / (A - B)$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักหลังจากอบของวัสดุมวลรวม (กรัม)

$B =$ น้ำหนักที่ชั่งในน้ำของวัสดุมวลรวม (กรัม)

9. การดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม

$$\text{การดูดซึมน้ำของวัสดุมวลรวม} = 100 \times [(B - A) / A]$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักหลังจากอบของวัสดุมวลรวม (กรัม)

$B =$ น้ำหนักอิ่มตัวผิวแห้งของวัสดุมวลรวม (กรัม)

10. ความถ่วงจำเพาะสูงสุดของส่วนผสมที่ไม่มีช่องว่างอากาศ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะสูงสุดของส่วนผสมที่ไม่มีช่องว่างอากาศ} = 100 / [(A/B) + (C/D)]$$

เมื่อ $A =$ ค่าร้อยละของวัสดุมวลรวมโดยมวลของส่วนผสม

$B =$ ความถ่วงจำเพาะประสิทธิผลของวัสดุมวลรวม

$C =$ ค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยมวลทั้งหมดของส่วนผสม

$D =$ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุเชื่อมประสาน

11. การดูดซึมน้ำของวัสดุเชื่อมประสานของวัสดุมวลรวม

$$\text{การดูดซึมน้ำของวัสดุเชื่อมประสาน} = 100 \times [(A - B) / (B \times A)] \times C$$

เมื่อ $A =$ ความถ่วงจำเพาะประสิทธิผลของวัสดุมวลรวม

$B =$ ความถ่วงจำเพาะทั้งก้อนของวัสดุมวลรวม

$C =$ ความถ่วงจำเพาะของวัสดุเชื่อมประสาน

12. ร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศ

$$\text{ร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศ} = 100 \times [(A - B) / A]$$

เมื่อ A = ความถ่วงจำเพาะสูงสุดของส่วนผสมที่ไม่มีช่องว่างอากาศ

B = ความถ่วงจำเพาะที่ก้อนของส่วนผสมที่บดอัดแล้ว

13. ร้อยละช่องว่างในวัสดุมวลรวม

$$\text{ร้อยละช่องว่างในวัสดุมวลรวม} = 100 - [(A \times B) / C]$$

เมื่อ A = ความถ่วงจำเพาะที่ก้อนของส่วนผสมที่บดอัดแล้ว

B = ค่าร้อยละของวัสดุมวลรวมโดยมวลทั้งของส่วนผสม

C = ความถ่วงจำเพาะที่ก้อนของวัสดุมวลรวมทั้งหมด

14. ร้อยละช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์

$$\text{ร้อยละช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์} = 100 \times [(A - B) / A]$$

เมื่อ A = ร้อยละช่องว่างในวัสดุมวลรวม

B = ร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศ

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการทดสอบเพนิเทรชันและร้อยละของเพนิเทรชันเดิม

binder	sample no.	penetration @ 25°C	penetration @ 25°C	% retained pen.
		before aging	after aging	
control PMA	1	59, 58, 58	44, 44, 44	75.5
	2	58, 58, 58	44, 44, 44	75.9
	3	57, 58, 58	44, 44, 44	76.3
	Avg.	58	44	75.9
PMA No. 4	1	58, 58, 58	47, 48, 47	81.6
	2	57, 58, 58	47, 47, 47	81.5
	3	57, 58, 58	47, 47, 48	81.9
	Avg.	58	47	81.6
PMA No. 5	1	62, 61, 61	47, 48, 48	77.8
	2	61, 61, 61	49, 48, 48	79.2
	3	61, 60, 61	49, 48, 48	79.6
	Avg.	61	48	78.9

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการทดสอบจุดอ่อนตัว

binder	sample no.	softening point (°C)		avg.
		ring 1	ring 2	
control PMA	1	87.0	87.2	87.0
	2	86.8	87.2	
	3	86.6	87.4	
PMA No. 4	1	85.2	85.6	85.6
	2	85.4	86.6	
	3	85.4	85.4	
PMA No. 5	1	79.8	80.4	80.2
	2	80.0	80.4	
	3	80.2	80.4	

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการทดสอบการดึงยืดที่อุณหภูมิ 13 °C ก่อนและหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT

binder	sample no.	ductility @ 13 °C (cm)				ductility @ 13 °C (cm)			
		before aging				after aging			
		mould 1	mould 2	mould 3	avg.	mould 1	mould 2	mould 3	avg.
control PMA	1	101	97	100	98	67	70	76	72
	2	93	98	100		70	73	68	
	3	94	97	99		73	72	76	
PMA No. 4	1	122	116	115	117	99	104	109	107
	2	114	120	116		104	110	107	
	3	115	119	118		111	113	102	
PMA No. 5	1	132	126	127	127	89	94	92	93
	2	129	123	125		93	100	95	
	3	121	127	130		88	90	94	

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการทดสอบความยืดหยุ่นกลับที่อุณหภูมิ 25 °C ก่อนและหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT

binder	sample no.	before aging				after aging			
		mould 1	mould 2	Elasticity (%)	avg. (%)	mould 1	mould 2	Elasticity (%)	avg. (%)
		control PMA	1	1.8	1.7	95.0	92	2.7	2.9
2	2.0		1.9	91.0	2.9	2.8		73.0	
3	1.9		2.1	90.0	2.8	3.0		72.0	
PMA No. 4	1	1.6	1.6	98.0	97	1.7	1.6	97.0	95
	2	1.7	1.8	95.0		1.8	1.9	93.0	
	3	1.6	1.7	97.0		1.8	1.7	95.0	
PMA No. 5	1	2.0	1.9	91.0	91	2.1	1.9	90.0	91
	2	1.9	1.9	92.0		1.9	2.0	91.0	
	3	2.0	2.1	89.0		2.0	1.9	91.0	

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการทดสอบความหนืดบรูคฟิลด์

binder	sample no.	brookfiled @ 135°C (Pa.s)	avg.
control PMA	1	1.320	1.329
	2	1.295	
	3	1.371	
PMA No. 4	1	0.744	0.742
	2	0.725	
	3	0.757	
PMA No. 5	1	0.678	0.68
	2	0.665	
	3	0.705	

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่น

binder	weight of pycnometer (g)	weight of pycnometer+ water (g)	weight of pycnometer+ binder(g)	weight of pycnometer+ binder+ water (g)	specific gravity	density at 25 °C	density at 15 °C	avg.
control PMA	30.8715	55.2387	46.3451	55.8463	1.0409	1.0379	1.0443	1.044
	31.2317	56.3924	47.0291	56.9925	1.0395	1.0365	1.0429	
	30.9538	55.2573	46.7235	55.9009	1.0425	1.0395	1.0459	
PMA No. 4	30.8719	55.2382	46.3649	55.8762	1.0429	1.0399	1.0463	1.045
	31.2324	56.3939	47.0863	56.9998	1.0397	1.0367	1.0431	
	30.9542	55.2377	47.8658	55.9389	1.0433	1.0402	1.0466	
PMA No. 5	30.8713	55.2376	46.7934	55.8376	1.0392	1.0361	1.0425	1.043
	31.2311	56.3932	47.0568	56.9828	1.0387	1.0357	1.0421	
	30.9532	55.2371	47.5381	55.9068	1.0421	1.0391	1.0455	

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลการทดสอบจุดวาบไฟ

binder	sample no.	flash point (°C)	avg.
control PMA	1	336.0	338.0
	2	340.0	
	3	338.0	
PMA No. 4	1	344.0	340.0
	2	336.0	
	3	340.0	
PMA No. 5	1	324.0	326.0
	2	328.0	
	3	326.0	

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลการทดสอบการละลายในสารละลายไตรคลอโรเอธิลีน

binder	weight of container (g)	weight of container+ binder (g)	weight of binder (g)	weight of crucible+ filter pad (g)	weight of crucible+ filter pad+ insoluble matter (g)	weight of insoluble matter (g)	weight of binder soluble matter (g)	% binder soluble	avg. % binder soluble
control PMA	123.4267	125.4582	2.0315	17.8956	17.8964	0.0008	0.04	99.96	99.95
	122.8935	124.8959	2.0024	18.2180	18.2191	0.0011	0.05	99.95	
	125.0926	127.1497	2.0571	18.0042	18.0052	0.0010	0.05	99.95	
PMA No. 4	122.8938	124.9421	2.0483	17.6492	17.6502	0.0010	0.05	99.95	99.95
	123.4298	125.4187	1.9889	18.1543	18.1552	0.0009	0.05	99.95	
	124.3829	126.4315	2.0486	18.0047	18.0059	0.0012	0.06	99.94	
PMA No. 5	124.2789	126.2984	2.0195	18.3428	18.3436	0.0008	0.04	99.96	99.96
	123.8362	125.8459	2.0097	18.0649	18.0659	0.0010	0.05	99.95	
	123.4528	125.4982	2.0454	17.8934	17.8942	0.0008	0.04	99.96	

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลการทดสอบน้ำหนักที่สูญหายไปเมื่อให้ความร้อน

binder	sample no.	before aging			after aging		% Loss	Avg.
		weight of container (g)	weight of container+ Binder (g)	weight of Binder (g)	weight of container+ Binder (g)	weight of Binder (g)		
control PMA	1	162.4736	197.4723	34.9987	197.5521	35.0785	0.23	0.22
	2	163.7892	198.8160	35.0268	198.8941	35.1049	0.22	
	3	162.8761	197.9512	35.0751	198.0235	35.1474	0.21	
PMA No. 4	1	161.2317	196.2301	34.9984	196.2430	35.0113	0.04	0.05
	2	164.3428	199.3653	35.0225	199.3821	35.0393	0.05	
	3	162.4682	197.5674	35.0992	197.5860	35.1178	0.05	
PMA No. 5	1	163.7602	198.8209	35.0607	198.8482	35.0880	0.08	0.08
	2	161.3872	196.3848	34.9976	196.4142	35.0270	0.08	
	3	162.5478	197.5562	35.0084	197.5814	35.0336	0.07	

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลการทดสอบโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและการต้านทานการเกิดร่องล้อ

temp. (°C)	sample no.	complex modulus (G^* , Pa)		$G^*/\sin \delta$ (kPa)	
		control PMA	warm Mix PMA	control PMA	warm Mix PMA
70	1	2132.4	2385.7	2.436	2.629
	2	2013.4	2405.5	2.430	2.625
	3	1980.2	2390.4	2.446	2.638
Avg.		2042.0	2393.9	2.437	2.630
76	1	1408.5	1449.8	1.861	1.737
	2	1450.8	1454.2	1.895	1.726
	3	1415.7	1433.5	1.883	1.721
Avg.		1425.0	1445.8	1.880	1.728
82	1	1150.5	1009.8	1.279	1.174
	2	1135.7	1014.0	1.317	1.185
	3	1127.5	1022.5	1.305	1.148
Avg.		1137.9	1015.4	1.300	1.169
88	1	1026.6	909.1	1.143	1.057
	2	1024.9	901.5	1.148	1.079
	3	1043.2	898.1	1.158	1.059
Avg.		1031.6	902.9	1.150	1.065

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลการทดสอบโมดูลัสเฉือนเชิงซ้อนและการต้านทานการเกิดร่องล้อหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT

temp. (°C)	sample no.	complex modulus (G*, Pa)		G*/sin δ (kPa)	
		control PMA	warm Mix PMA	control PMA	warm Mix PMA
64	1	4364	4527.5	4.867	4.961
	2	4332	4551.3	4.894	5.014
	3	4360	4531.2	4.879	4.974
Avg.		4352.0	4536.7	4.880	4.983
70	1	2629.7	2695.3	3.042	2.969
	2	2639.6	2662.2	3.014	3.005
	3	2671.2	2671.7	3.004	2.975
Avg.		2646.8	2676.4	3.020	2.983
76	1	1681.8	1682.2	2.008	1.908
	2	1703.9	1667.1	2.037	1.878
	3	1700.5	1669.9	2.015	1.899
Avg.		1695.4	1673.1	2.020	1.895

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลการทดสอบการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำหลังอบด้วยความร้อนโดยวิธี RTFOT และ PAV

temp. (°C)	sample no.	stiffness (MPa)		rate of stress relaxation	
		control PMA	warm Mix PMA	control PMA	warm Mix PMA
-6	1	193	72.8	0.43	0.53
	2	161.4	66.4	0.46	0.53
	3	172.4	75.8	0.42	0.51
	4	181.8	63.2	0.47	0.55
avg.		177.2	69.6	0.445	0.530
-12	1	367.3	175.3	0.35	0.44
	2	362.6	177.1	0.36	0.44
	3	370.2	171.2	0.33	0.43
	4	365.7	172.8	0.34	0.43
avg.		366.5	174.1	0.345	0.435
-18	1	760	429.1	0.23	0.34
	2	788.4	418.8	0.25	0.33
	3	771.8	404.0	0.22	0.34
	4	800.2	393.9	0.24	0.33
avg.		780.1	411.5	0.235	0.335

ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการทดสอบพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ ค.1 ทดสอบความเหนียวครีปิลด์ของพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมและพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอุ่น

control PMA				
อุณหภูมิ	sample no. 1	sample no. 2	sample no. 3	avg.
100	10580	10535	10505	10540
120	2917	2880	2907	2901
135	1320	1295	1371	1329
140	1112.5	1080.5	1100	1098
160	507.5	512.5	485	502
180	237.5	245	262.5	248
200	130	137.5	140	136
warm mix PMA				
อุณหภูมิ	sample no. 1	sample no. 2	sample no. 3	avg.
100	18605	18375	18370	18450
120	2310	2340	2325	2325
135	744	725	757	742
140	542.5	515	530	529
160	192.5	187.5	202.5	194
180	92.5	102.5	90.5	95
200	52.5	60.5	55	56

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลการทดสอบมาร์แชลของพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ควบคุมที่อุณหภูมิบดอัด
150 องศาเซลเซียส

sample No		1	2	3
AC by Wgt of agg	%	5.0		
AC by Wgt of mix	%	4.76		
eff AC by Wgt of mix	%	4.58		
density hydrostatic				
Wt air	gr	1212.8	1221.7	1210.9
Wt in water	gr	701.8	704.3	698.5
Wt SDD	gr	1217.4	1223.0	1212.8
bulk volume	gr	515.6	518.7	514.3
bulk density	gr/cm ³	2.352	2.355	2.354
average density	gr/cm ³	2.354		
max specific gravity	gr/cm ³	2.483		
density geometrical				
Wt Air	gr	1212.8	1221.7	1210.9
height	cm	6.50	6.52	6.51
diameter	cm	10.18	10.19	10.18
volume	cm ³	529.1	531.5	530.1
bulk density	gr/cm ³	2.292	2.298	2.284
average density	gr/cm ³	2.292		
max Specific gravity	gr/cm ³	2.483		
air void	%	7.7		
voids analysis				
hydrostatic				
volume AC	% total	10.4		
volume agg	% total	84.0		
VMA	%	16.0		
air voids	%	5.7		
VFB	%	64.7		
stability	kn	14.78	13.90	13.85
stability	lbs	3323	3124	3113
average	lbs	3187		
flow measured	mm	4.54	4.62	4.89
flow		17.87	18.19	19.25
average	0.01'	18.4		
stability/flow		173		

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลการทดสอบมาร์แชลของพอลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ผสมอ่อนที่อุณหภูมิปกติอัด
180 องศาเซลเซียส

sample no		1	2	3
AC by Wgt of agg	%	5.0		
AC by Wgt of mix	%	4.76		
eff AC by Wgt of mix	%	4.58		
density hydrostatic				
Wt air	gr	1214.3	1214.2	1222.6
Wt in water	gr	710.0	712.3	716.2
Wt SDD	gr	1215.2	1215.0	1223.2
bulk volume	gr	505.2	502.7	507.0
bulk density	gr/cm ³	2.404	2.415	2.411
average density	gr/cm ³	2.410		
max Specific gravity	gr/cm ³	2.486		
density geometrical				
Wt air	gr	1214.3	1214.2	1222.6
height	cm	6.27	6.28	6.30
diameter	cm	10.19	10.19	10.19
volume	cm ³	511.3	512.2	513.4
bulk density	gr/cm ³	2.375	2.371	2.381
average density	gr/cm ³	2.376		
max specific gravity	gr/cm ³	2.486		
air void	%	4.4		
voids analysis				
hydrostatic				
volume AC	% total	10.6		
volume Agg	% total	86.0		
VMA	%	14.0		
air voids	%	3.5		
VFB	%	75.3		
stability	kn	19.87	19.98	19.64
stability	lbs	4468	4491	4415
average	lbs	4458		
flow measured	mm	3.64	3.98	3.45
flow		14.33	15.67	13.58
average	0.01'	14.5		
stability/flow		307		

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรีภรณ์ สอนเฒ่า เกิดวันที่ 2 กรกฎาคม 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ในปีการศึกษา 2552 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและ
วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 เข้าร่วม
และเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ the Pure and Applied Chemistry International
Conference 2016 (PACCON 2016) ชื่อบทความ “Evaluation of Reduction Compact
Temperature and Mechanical Properties of Polymer Modified Asphalt Using Warm
Mixed Additives” ณ ศูนย์ประชุมไบเทค บางนา ประเทศไทย วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2559

