

ลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา
กับที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม



นายนราชัย ตันติวรวิทย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3556-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES
WITH AND WITHOUT NATURAL RUBBER AS ADDITIVES



Mr. Nrachai Tuntiworawit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3556-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ ธรรมดาที่ใส่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม
โดย	นายนราชัย ตันติวรวิทย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ชยธันว์ พรหมศร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อนุศักดิ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.ชยธันว์ พรหมศร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ)

นราชัย ตันติวรวิทย์ : ลักษณะสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมชาติร่วมกับที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม (PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES WITH AND WITHOUT NATURAL RUBBER AS ADDITIVES) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ดิเรก ลาวัญยศิริ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ชยธันว์ พรหมศร, 255 หน้า. ISBN 974-17-3556-1.

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางธรรมชาติหรือยางพาราในลักษณะของน้ำยางชั้นเป็นสารผสมเพิ่ม รวมทั้งศึกษาหาปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสมของน้ำยางชั้นในการผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์

ในการศึกษานี้ได้ใช้วัสดุเชื่อมประสาน 3 ชนิด ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมชาติชนิดเกรด 60-70 วัสดุ Natural Rubber Asphalt (NRA) ที่ได้จากการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมชาติชนิดเกรด 60-70 ผสมกับน้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia : HA) ในปริมาณ 1-14% โดยน้ำหนักรวม และวัสดุ Polymer Modified Asphalt (PMA) จากนั้นนำวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดไปผสมกับวัสดุมวลรวมประเภทหินปูนเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ รวมทั้งประสิทธิภาพในการใช้งาน เช่น แรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืบตัว ความล้มการยุบตัวถาวร และการหลุดลอก จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วัสดุ NRA มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา โดยวัสดุ NRA สามารถช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพ ค่าแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืบตัวที่อุณหภูมิสูง และลดการหลุดลอก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติการต้านทานต่อความล้มและต้านการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ดีขึ้นกว่า 3 เท่าแล้ว ทำให้สรุปได้จากการศึกษานี้ว่าปริมาณน้ำยางชั้นที่เหมาะสมในการผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์คือ 9% โดยน้ำหนักรวม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PMA แล้ว วัสดุ PMA ยังคงแสดงคุณสมบัติที่ดีกว่าวัสดุ NRA อย่างไรก็ตาม การใช้ยางธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรภายในประเทศเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อใช้ในงานทางก็ยังมีความเหมาะสมอยู่ เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ทำให้อายุการใช้งานนานขึ้น อีกทั้งยังใช้ปริมาณในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่น้อยกว่า ทำให้ช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาผิวทางได้ในระยะยาว

ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2546	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470364421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: ASPHALT CEMENT / NATURAL RUBBER / POLYMER MODIFIED ASPHALT /
 ASPHALT CONCRETE MIXTURES / PERFORMANCE TEST

NRACHAI TUNTIWORAWIT : PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES
 WITH AND WITHOUT NATURAL RUBBER AS ADDITIVES. THESIS ADVISOR :
 PROF. DIREK LAVANSIRI, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : CHAYATAN PHROMSORN,
 Ph.D., 255 pp. ISBN 974-17-3556-1.

This research is to study the engineering properties of asphalt cement and its mixture with additives such as natural rubber or para rubber in form of concentrated latex. It also emphasizes on determining the appropriate proportion of concentrated latex to be used in the mixing process.

In this study, three types of binder were separately mixed with limestone to make each mixture of asphalt concrete. They are conventional asphalt cement of 60–70 penetration grade (AC 60-70), Natural Rubber Asphalt (NRA) obtained from mixing AC 60–70 with High Ammonia (HA) concentrated latex at the content of 1-14% by total weight and Polymer Modified Asphalt (PMA). Basic properties and performance tests of the asphalt concrete mixture were then conducted to study such as indirect tensile strength, resilient modulus, fatigue, permanent deformation and stripping. The results showed that NRA materials gave better performance than conventional asphalt cement in term of engineering properties. In making the mixture of asphalt concrete, less content of NRA was required, leading to a lower road construction cost. In addition, NRA materials also contribute to the increased value of stability, indirect tensile strength, resilient modulus at high temperature, and to the reduced rate of stripping. Moreover, NRA materials also enhance the mixture properties on resisting to fatigue cracking and permanent deformation 3 times better than conventional asphalt cement. However, compared to the properties of PMA materials, NRA is still less favorable. It can be concluded from this study that the use of natural rubber as additives is the best alternative due to its domestic availability and to the fact that less content of NRA materials would be required in making the mixture of asphalt concrete. Natural rubber offers enhanced flexibility and stability of asphalt pavement, bringing greater life expectancy at lower maintenance cost. The suggested proportion of concentrated latex in blending with asphalt cement is 9% by total weight.

Department	Civil Engineering	Student's signature.....
Field of study	Civil Engineering	Advisor's signature.....
Academic year	2003	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และคอยเอาใจใส่ดูแลช่วยเหลือ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลงด้วยดี

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร.ชยธันว์ พรหมศร ซึ่งเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมเป็นอย่างสูง ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ และช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลงด้วยดี

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อนุกัณฑ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา ซึ่งเป็นประธานกรรมการ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษา และข้อแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลงด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณณพรัตน์ วิชิตชลชัย นักวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ ส่วนอุตสาหกรรม สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลเอกสาร และให้ความรู้ด้านยางพาราแก่ผู้เขียน

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณชัยวัฒน์ ศรีวรรณรัตน์ ประธานกรรมการผู้จัดการ คุณประพจน์ อิศริยะกุล ผู้อำนวยการสายการผลิต คุณสมหมาย รงศิริกุล ผู้จัดการโรงงาน สาขา สูงเนิน จ.นครราชสีมา คุณวิจิต มีมา หัวหน้าฝ่ายควบคุมคุณภาพ บริษัท ทิปปี้แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน) และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง ที่อำนวยความสะดวก เอื้อเฟื้อวัสดุตัวอย่าง และสถานที่ รวมทั้งให้คำแนะนำในการผสมและทดสอบวัสดุตัวอย่าง

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณพรชัย ศิลารมย์ และคุณณรงค์ชัย นุ่มภรณ์ ซึ่งเป็นรุ่นพี่สาขาวิศวกรรมขนส่ง ที่ให้ข้อแนะนำ ข้อชี้แนะในการทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ที่สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

ผู้เขียนขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ สาขาวิศวกรรมขนส่ง ที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในการทดสอบที่ต้องใช้กำลังคนและเป็นกำลังใจแก่ผู้เขียน

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนทั้งด้านการเงิน ความช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด และเป็นกำลังใจที่เข้มแข็งของผู้เขียนตลอดการศึกษา จนสามารถศึกษาและทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลงได้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ผลการศึกษาและงานวิจัยที่ผ่านมา.....	6
2.2 สิ่งที่ได้รับจากผลการศึกษาและงานวิจัยในอดีต.....	26
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการในการศึกษา.....	67
3.1 การเตรียมวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางชั้น.....	68
3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	76
3.3 การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมรวม.....	78
3.4 ขนาดคละของวัสดุผสมรวม.....	78
3.5 การเตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต.....	80
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต.....	82
3.7 แนวทางในการดำเนินการศึกษา.....	87
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการศึกษา.....	89
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	89
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมรวม.....	104

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	105
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1 บทสรุป.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	123
รายการอ้างอิง.....	124
ภาคผนวก.....	127
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน.....	128
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	148
ภาคผนวก ค วิธีการทดสอบ.....	213
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	242

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราสาร

ตาราง		หน้า
2.1	ระยะเวลาและอุณหภูมิที่สามารถเก็บแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาติโดยไม่เสื่อมคุณภาพ.....	8
2.2	คุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่ผสมน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด.....	10
2.3	คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมน้ำยางธรรมชาติชนิด NRL และ CL.....	16
2.4	ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำยางธรรมชาติแบบ NRL และแบบ CL ที่ปริมาณสัดส่วน 2 %.....	17
2.5	ขนาดคละของวัสดุผสมแทรก.....	38
2.6	เกณฑ์การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	52
3.1	สมบัติของน้ำยางข้นธรรมชาติชนิด HA.....	68
3.2	อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการผสมน้ำยางข้นกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ กัน.....	75
3.3	การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	77
3.4	การตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมหยาบ.....	78
3.5	การตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุผสมรวมละเอียด.....	78
3.6	ขนาดคละของวัสดุผสมรวม.....	79
3.7	จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใน 1 Mixture.....	81
3.8	ค่าหน่วยแรงที่ใช้สำหรับการทดสอบ MR ที่แต่ละอุณหภูมิ.....	84
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	90
4.2	ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึ่มของวัสดุผสมรวม.....	104
4.3	ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมรวม.....	105
4.4	ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	106
4.5	ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	111
4.6	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	113
4.7	ผลการทดสอบความล้า.....	117
4.8	ผลการทดสอบการยุบตัวแบบถาวร.....	118

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness ของแอสฟัลต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่คาดหวังจะได้รับจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลีเมอร์.....	13
2.2	ความแตกต่างในคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	19
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Accumulated permanent axial strain กับจำนวนรอบที่น้ำหนักมากระทำ.....	23
2.4	องค์ประกอบโครงสร้างของวัสดุแอสฟัลต์.....	28
2.5	โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ แบบ cis 1, 4 polyisoprene.....	39
2.6	ลักษณะโมเลกุลของยางธรรมชาติเมื่อได้รับแรงดึง.....	40
2.7	ลักษณะน้ำยางสดที่กรีตจากต้นยางพารา.....	41
2.8	การยุบตัวของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	46
2.9	การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	47
2.10	การแตกร้าวเนื่องจากความล้าของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	48
2.11	เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	51
2.12	กราฟตัวอย่างข้อมูลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล.....	51
2.13	ลักษณะการทำงานในการบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor (SGC).....	53
2.14	การป้อนน้ำหนักและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบด้วย Indirect Tensile Test.....	55
2.15	ความสัมพันธ์ของจังหวะการให้ Load และ Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Repeated Load.....	56
2.16	การติดตั้งวัสดุทดสอบและลักษณะเครื่องมือ Indirect Tensile Test.....	58
2.17	ลักษณะของ Repeated stress ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	60
2.18	ค่าระดับของ Tensile stress และ Maximum compressive stress.....	60
2.19	เครื่อง Dynamic Shear Rheometer (DSR).....	62
2.20	ลักษณะของค่า Phase angle (δ).....	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า	
2.21	ค่า Phase angle δ ที่สะท้อนถึงพฤติกรรมของวัสดุ.....	64
2.22	หลักการทำงานของการทดสอบ Dynamic Shear Rheometer (DSR).....	66
3.1	ลักษณะเครื่อง Universal Testing Machine (UTM-5P).....	67
3.2	ลักษณะใบพัดของเครื่องผสมแรงเฉือนสูง.....	69
3.3	การผสมน้ำยางชั้นกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	70
3.4	ลักษณะของส่วนผสมเมื่อน้ำยางชั้นเกิดการเดือดและไต่ขึ้นแกนเครื่องผสม.....	70
3.5	ตัวอย่างสัญญาณวิทยาจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า ของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ และวัสดุ NRA ที่ปริมาณน้ำยางชั้นสัดส่วนต่าง ๆ.....	71
3.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับอุณหภูมิ ของวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ.....	73
3.7	ลักษณะของเนื้อยางที่ลอยบนผิวน้ำของส่วนผสม.....	74
3.8	กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุผสมรวม.....	79
3.9	ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดึงทางอ้อม.....	83
3.10	ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic creep test.....	85
3.11	ผังโปรแกรมการศึกษาการทดสอบส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน.....	87
3.12	ผังโปรแกรมการศึกษาการทดสอบส่วนที่เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	88
4.1	ค่า Penetration ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	91
4.2	ค่า % Retain Penetration ที่ผ่านการอบด้วย TFOT.....	91
4.3	ค่าจุดอ่อนตัว.....	92
4.4	ค่า Penetration Index (PI).....	93
4.5	ค่าการยึดดึงที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียสทั้งก่อนและหลัง จากการอบด้วย TFOT.....	94
4.6	ค่าการยึดดึงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสทั้งก่อนและหลัง จากการอบด้วย TFOT.....	95
4.7	ค่าร้อยละการคืนตัวกลับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทั้งก่อนและหลังจากการอบด้วย TFOT.....	96
4.8	ค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	97
4.9	ค่าความหนืดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส.....	98
4.10	จุดวาบไฟและจุดติดไฟของวัสดุเชื่อมประสาน.....	98

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.11 ค่า G^* ของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่างๆ.....	99
4.12 ค่ามุม Phase angle (δ) ของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	100
4.13 ค่า $G^*/\sin \delta$ ของวัสดุ NRA ทั้งก่อนและหลังจากการอบด้วย TFOT ที่อุณหภูมิสูง.....	101
4.14 ค่า $G^* \sin \delta$ ของวัสดุ NRA ทั้งก่อนและหลังจากการอบด้วย TFOT ที่อุณหภูมิปานกลาง.....	102
4.15 ค่า %Stripping ของวัสดุเชื่อมประสาน.....	103
4.16 ค่าร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสาน โดยน้ำหนักของมวลรวม.....	106
4.17 ค่าเสถียรภาพมาร์แชลกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสาน โดยน้ำหนักของมวลรวม.....	107
4.18 ค่าการไหลมาร์แชลกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสาน โดยน้ำหนักของมวลรวม.....	107
4.19 ค่าหน่วยน้ำหนักกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม.....	108
4.20 ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมกับ ค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม.....	108
4.21 ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับ ค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม.....	109
4.22 ปริมาณ Optimum binder content ในแต่ละส่วนผสม.....	109
4.23 ค่า Tensile Strength Ratio (TSR) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	110
4.24 ค่าแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	112
4.25 ค่าโมดูลัสคืบตัวของที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส.....	114
4.26 ค่าโมดูลัสคืบตัวของที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	114
4.27 ค่าโมดูลัสคืบตัวของที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส.....	115
4.28 ค่าโมดูลัสคืบตัวของที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส.....	115
4.29 ค่าความล้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	117
4.30 ค่า Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) หรือที่รู้จักกันดีในชื่อของ **ยางพารา** เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย หากพิจารณาส่วนแบ่งทางการตลาดของยางธรรมชาติแล้ว ประเทศไทยนับเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ซึ่งการผลิตในปี พ.ศ. 2544 มีปริมาณ 2 ล้านตัน ส่งออกในรูปวัตถุดิบประมาณ 1.8 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 90 ของผลผลิตในประเทศทั้งหมด มีมูลค่าการส่งออก 55,000 ล้านบาท ส่วนปริมาณยางธรรมชาติที่ใช้ในประเทศมีปริมาณ 0.2 ล้านตัน หรือคิดเป็นเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 จนกระทั่งถึงปัจจุบัน ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ล้วนเกิดปัญหาทางด้านเศรษฐกิจ ความต้องการและปริมาณการผลิตยางธรรมชาติของโลกตกอยู่ในภาวะไม่สมดุล ปริมาณการผลิตมีมากกว่าความต้องการ จึงส่งผลกระทบต่อมูลค่าของยางธรรมชาติ ดังจะเห็นได้จากอัตราการขยายตัวของการผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทยมีค่าร้อยละ 9.16 ในปี พ.ศ. 2539 จากนั้นในปี พ.ศ. 2540 พ.ศ. 2541 และ พ.ศ. 2542 อัตราการขยายตัวของการผลิตกลับลดลงเหลือเพียงร้อยละ 3.17 2.12 และ 3.00 ตามลำดับ เช่นเดียวกับอัตราการขยายตัวของการส่งออกมีค่าร้อยละ 7.80 ในปี พ.ศ. 2539 แต่ต่อมาในปี พ.ศ. 2540 พ.ศ. 2541 และ พ.ศ. 2542 อัตราการขยายตัวของการส่งออกลดลงเหลือเพียงร้อยละ 4.20 0.12 และ 1.66 ตามลำดับ ส่งผลให้ราคายางธรรมชาติภายในประเทศตกต่ำ รัฐบาลจึงจำเป็นต้องเข้าไปแทรกแซงตลาดยางธรรมชาติ โดยใช้งบประมาณเป็นจำนวนมากเพื่อช่วยพยุงราคาขาย แต่ก็เป็นเพียงการแก้ไขปัญหาในระยะสั้นเท่านั้น ไม่สามารถช่วยยกระดับราคาขายให้สูงขึ้นได้แต่อย่างใด ดังนั้น การแก้ไขปัญหาในระยะยาว ก็คือ การเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศให้มากขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบยางธรรมชาติภายในประเทศ ไม่ว่าจะเป็นในลักษณะของการแปรรูปหรือการพัฒนาเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมการผลิตให้ทันสมัยมากขึ้น เพื่อเพิ่มศักยภาพของวัตถุดิบยางธรรมชาติภายในประเทศ

การนำยางธรรมชาติหรือยางพารามาใช้ในงานทาง ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศได้ ในปัจจุบันทางรัฐบาลได้ให้การส่งเสริมและสนับสนุน โดยจัดตั้งคณะกรรมการพิจารณาหาแนวทางในการใช้ยางธรรมชาติผสมกับวัสดุแอสฟัลต์เพื่อใช้ในงานทาง ซึ่งประกอบด้วยผู้แทนจากหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของคณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติ เนื่องจากโดยเฉลี่ยแล้วในแต่ละปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 – 2544 ประเทศไทยใช้แอสฟัลต์ปีละ 839,400 ตัน เป็นแอสฟัลต์ชนิดน้ำ (Emulsifier asphalt) ปริมาณ 298,800 ตัน และเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) ปริมาณ 540,600 ตัน หากมีการพิจารณานำยางธรรมชาติมาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์เป็นสารผสมเพิ่ม ก็จะเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศอีกเป็นจำนวนมาก กอปรกับผลการศึกษาของประเทศต่าง ๆ ที่ได้มีการศึกษาถึงการนำยางธรรมชาติมาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์เพื่อใช้ในงานทางต่างแสดงให้เห็นถึงข้อดีของการนำยางธรรมชาติมาเป็นสารผสมเพิ่ม นั่นคือ ช่วยให้ผิวทางมีคุณภาพดีขึ้น มีอายุการใช้งานนานขึ้น และสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาทางลงได้

จากข้อมูลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็ผลการศึกษาวิจัยในอดีตหรือแนวทางการแก้ปัญหาราคายางตกต่ำที่เกิดขึ้นนี้ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำยางธรรมชาติมาเป็นสารผสมเพิ่มแก่วัสดุแอสฟัลต์เพื่อใช้ในงานทาง ซึ่งนอกจากจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของผิวทางแล้วยังมีส่วนช่วยในการเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศอีกด้วย และเพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้นรวมทั้งส่งเสริมแนวทางการแก้ไขในระยะยาวของรัฐบาล ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อมุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับยางธรรมชาติในลักษณะของน้ำยางชั้นทั้งในส่วนของวัสดุเชื่อมประสานและในส่วนของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมุ่งเน้นเฉพาะการนำยางธรรมชาติผสมกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งจะยังไม่ครอบคลุมถึงการนำไปใช้กับแอสฟัลต์ชนิดน้ำ เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยมากกว่า นอกจากนี้ ยังศึกษาปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เหมาะสมในการผสม เปรียบเทียบข้อดีที่จะได้รับ เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดจากการนำยางธรรมชาติมาใช้และเหมาะสมกับค่าใช้จ่ายในส่วนที่ต้องเพิ่มขึ้นจากการใช้ยางธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา กับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา กับที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติ เป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Binder)
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติที่มีต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนปริมาณยางธรรมชาติที่มีต่อคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้มีการกำหนดขอบเขตไว้ดังนี้

- 1.3.1 วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ชนิดเกรด 60-70 ตามมาตรฐาน มอก. 851-2542 ซึ่งเป็นข้อกำหนดของกรมทางหลวง
- 1.3.2 ยางธรรมชาติที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ยางพาราที่อยู่ในรูปของน้ำยางข้นชนิด แอมโมเนียสูง (High Ammonia : HA) ที่ได้จากวิธีการบั่นให้มีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content : DRC) เท่ากับ 60% ตามมาตรฐาน มอก. 980-2533
- 1.3.3 วัสดุยางธรรมชาติผสมแอสฟัลต์ที่นำมาใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบ จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ทล.-ก. 408/2536 ซึ่งเป็นข้อกำหนดของกรมทางหลวง
- 1.3.4 วัสดุ Polymer Modified Asphalt (PMA) ที่ผ่านมาตรฐาน ทล.-ก. 408/2536 และมีจำหน่ายในประเทศไทย จะนำมาศึกษาเปรียบเทียบร่วมด้วย
- 1.3.5 วัสดุมวลรวมที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ หินปูนที่มีคุณสมบัติและขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ทล.-ม. 408/2532 ซึ่งเป็นข้อกำหนดของกรมทางหลวงในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชั้นผิวทาง สำหรับมวลรวมขนาด 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว)
- 1.3.6 การศึกษามุ่งเน้นเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม ซึ่งได้แก่

- ค่าความต้านทานต่อการหลุดลอก (Stripping test) ทั้งในส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ตามมาตรฐาน ทล.-ท. 605/2518 ซึ่งเป็นข้อกำหนดของกรมทางหลวง และส่วนที่เป็น ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐาน AASHTO T283
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) ที่อุณหภูมิ 25° C
- ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus : MR) โดยได้จากการทดสอบวิธี Repeated load indirect tensile test ตามมาตรฐาน AASHTO TP 31 ที่อุณหภูมิ 15 25 35 และ 45° C
- ค่าความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) โดยได้จากการ ทดสอบวิธี Repeated load indirect tensile test ที่อุณหภูมิ 25° C
- ค่าความต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) โดยได้จากการ ทดสอบวิธี Repeated uniaxial loading strain test (Dynamic creep test) ที่อุณหภูมิ 50° C ตามมาตรฐาน AS 2891.12.1 - 1995

1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษา

- 1.4.1 วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ เป็นวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างทางโดยทั่วไปในประเทศไทย
- 1.4.2 หินปูนที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ เป็นตัวแทนของมวลรวมที่ใช้ในการก่อสร้างทางโดยทั่วไปในประเทศไทย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เกิดการวิจัยและพัฒนาอันเป็นองค์ความรู้ในการศึกษาการใช้วัสดุท้องถิ่นและวัสดุธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศมาเป็นส่วนผสมเพิ่มแก่แอสฟัลต์เพื่อใช้ในงานทางจริง และเป็นพื้นฐานในการค้นคว้าหาวัสดุอื่น ๆ มาพัฒนาในแนวทางเดียวกันต่อไป
- 1.5.2 ช่วยให้เห็นถึงการผสมยางธรรมชาติกับวัสดุแอสฟัลต์นั้น จะทำให้ได้วัสดุแอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมดีขึ้นหรือไม่อย่างไร เพื่อนำไปใช้ในการสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

หากผลการศึกษาที่ได้พบว่า การนำยางธรรมชาติมาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์แล้ว สามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมให้ดีขึ้นจริง ก็จะทำให้ได้ผิวทางที่มีคุณภาพดีขึ้น เนื่องจากผิวทางที่ได้จากการใช้แอสฟัลต์ผสมยางธรรมชาติมีความคงทนสูงกว่าผิวทางที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา

จึงเป็นการช่วยประหยัดงบประมาณของประเทศในการซ่อมบำรุงทาง เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้ ยังสามารถช่วยแก้ไขปัญหาในระยะยาวของปริมาณยางธรรมชาติที่ล้นตลาด โดยการเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศและช่วยพยุงราคาขายให้สูงขึ้น อีกทั้งหากสามารถจัดการผลิตแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วนที่เหมาะสม มีต้นทุนต่ำและผ่านมาตรฐานตามข้อกำหนดแล้ว ก็อาจสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุการทางในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา ตลอดจนทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2 เตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ทดสอบและวัสดุตัวอย่าง เช่น มวลรวม วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติ วัสดุโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- 1.6.3 ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในข้อ 1.6.2
- 1.6.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ
- 1.6.5 สรุป เสนอแนะ และเรียบเรียงรายงานการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาและงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต รวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิจัยการนำยางธรรมชาติมาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์เพื่อใช้ในทาง ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ผลการศึกษาและงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตที่ได้ทำการรวบรวมนี้ เป็นการศึกษาคุณสมบัติของการนำยางธรรมชาติในรูปแบบต่าง ๆ มาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์ทั้งในส่วนที่ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการและในส่วนของการทำงานจริงในสนาม รวมทั้งการใช้เครื่องมือและวิธีการทดสอบต่าง ๆ ในการประเมินคุณสมบัติที่ได้ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

(Thompson, 1964 ; Mullins, 1971) ได้มีโครงการวิจัยร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการวิจัยถนนของสหราชอาณาจักร (U.K. Road Research Laboratory) ห้องปฏิบัติการวิจัยของสมาคมผู้ผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber Producers' Association and Laboratory) และคณะกรรมการพัฒนายางธรรมชาติ (Natural Rubber Development Board) โดยได้ทำการทดลองใช้แอสฟัลต์ผสมยางธรรมชาติในห้องปฏิบัติการและลาดถนนจริงในลักษณะต่าง ๆ เช่น แบบ Seal coat แบบ Macadam และแบบ Dense grade ในหลายพื้นที่ทั่วประเทศ โดยทำการเปรียบเทียบกับถนนที่ลาดด้วยแอสฟัลต์ธรรมดาเป็นเวลา 15 ปี ในส่วนของทดลองในห้องปฏิบัติการจากโครงการนี้ได้ศึกษาการใช้ยางธรรมชาติชนิดต่าง ๆ 4 ชนิด ได้แก่

- ยางผงทั้งที่ผ่านการคงรูป (Vulcanized natural rubber powder) และไม่ผ่านการคงรูป (Unvulcanized natural rubber powder)
- น้ำยางที่ได้จากวิธีการปั่น (Centrifuged latex) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60%
- น้ำยางที่ได้จากวิธีการระเหยน้ำ (Evaporated latex) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้ง 73%
- ยางแผ่น (Sheet rubber) จากท้องถิ่น

นำยางธรรมชาติชนิดต่าง ๆ มาทำการผสมกับแอสฟัลต์ ซึ่งแอสฟัลต์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ คัทแบคแอสฟัลต์ และอิมัลชันแอสฟัลต์ จากนั้นทำการศึกษาวิธีการผสม และหาปริมาณยางธรรมชาติที่เหมาะสม รวมทั้งศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์และสมบัติการยึดเกาะกับวัสดุมวลรวมที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมยางธรรมชาติลงในแอสฟัลต์ไม่ว่าจะเป็นยางธรรมชาติชนิดใดและแอสฟัลต์ชนิดใดก็ตามเพียงปริมาณเล็กน้อยไม่เกิน 5% โดยน้ำหนักแอสฟัลต์ สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น เช่น ทำให้แอสฟัลต์มีจุดอ่อนตัวสูงขึ้น (Softening point) นอกจากนี้ การเติมยางธรรมชาติลงในแอสฟัลต์จะทำให้ค่า Penetration ลดลง นั่นคือทำให้แอสฟัลต์แข็งขึ้น และช่วยลดความว่องไวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) ลงได้ ขณะเดียวกัน ยังช่วยเพิ่มคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ความเหนียว ความหนาแน่น ความคงตัว ความยืดหยุ่น และการยึดเกาะกับวัสดุมวลรวมดีขึ้น ลดการหลุดลอก

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การนำวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาติมาลาดถนน นั้นสามารถช่วยลดการแตกกร้าว ลดการบวมปูด การหลุดลอกและการเสียรูปได้ และพบว่า ส่วนผสมที่มียางธรรมชาติในปริมาณ 2.5% โดยน้ำหนักแอสฟัลต์ สามารถช่วยให้ถนนทนทานขึ้น 30-50% การนำยางธรรมชาติชนิดต่าง ๆ มาทดลองผสมกับแอสฟัลต์ พบว่ายางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของน้ำยางมีประสิทธิภาพดีที่สุดและมีราคาถูกที่สุดแต่ทำการผสมยาก เนื่องจากปัญหาของการเกิดฟองที่มากจากการเดือดและระเหยของน้ำในน้ำยาง ดังนั้น เวลาผสมจะต้องระวังและผสมน้ำยางทีละน้อย ๆ อย่างช้า ๆ และต้องทำการกวนตลอดช่วงระยะเวลาการผสมโดยรักษาระดับของอุณหภูมิที่ใช้ผสมให้คงที่ตลอด หากมีการเติมสารต้านฟอง (Anti-foaming) จะเป็นประโยชน์มากในการทำงาน ช่วยให้เกิดความปลอดภัย นอกจากนี้ ภาชนะที่ใช้ในการผสมจะต้องเผื่อปริมาณของส่วนผสมและฟองที่จะเพิ่มขึ้น

ปัจจัยสำคัญในการผสมแอสฟัลต์กับยางธรรมชาติคือ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการผสม โดยอุณหภูมิที่ใช้ผสมต้องไม่สูงเกินไปที่ทำให้คุณสมบัติของทั้งยางธรรมชาติและวัสดุแอสฟัลต์เสียไปจนไม่สามารถนำมาใช้งานได้ สำหรับระยะเวลาที่แนะนำในการเก็บแอสฟัลต์ที่ผสมกับยางธรรมชาติโดยไม่เสื่อมคุณภาพได้แสดงดังตารางที่ 2.1 หากเก็บวัสดุส่วนผสมดังกล่าวเป็นเวลานาน เมื่อนำมาใช้งานจะต้องทำการกวนก่อนทุกครั้ง เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากส่วนที่เป็นเนื้อยางธรรมชาติอาจเกิดการแยกชั้นและลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของส่วนผสมเพราะมีน้ำหนักเบากว่าวัสดุแอสฟัลต์

ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาและอุณหภูมิที่สามารถเก็บแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาติ
โดยไม่เสื่อมคุณภาพ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาในการเก็บ
อุณหภูมิห้อง	ไม่จำกัด
120	7 วัน
130	3 วัน
140	2 วัน
150	18 ชั่วโมง
160	12 ชั่วโมง
170	4 ชั่วโมง
180	3 ชั่วโมง
200	1 ชั่วโมง

ผลการศึกษาค้นคว้าได้แนะนำปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เหมาะสมในการผสมกับวัสดุแอสฟัลต์ ดังนี้ ปริมาณน้ำยาง 1-1.5% สำหรับผิวทางแบบ Surface dressing ปริมาณน้ำยาง 2-4% สำหรับผิวทางแบบ Rolled asphalt และปริมาณน้ำยาง 2-3% สำหรับผิวทางแบบ Macadam

Lyons (1967) ผู้อำนวยการแห่ง Road Research Laboratory ได้ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผสมยางธรรมชาติกับวัสดุแอสฟัลต์ สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีที่ใช้น้ำยาง (Latex) ควรทำการผสมในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 140-170 องศาเซลเซียส โดยจะขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุแอสฟัลต์ที่นำมาใช้ สำหรับการเก็บรักษาส่วนผสมของแอสฟัลต์ที่ผสมกับยางธรรมชาติ นั้น ควรหลีกเลี่ยงการจัดเก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากจะทำให้ส่วนผสมเกิดการแยกตัวและสูญเสียคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส ส่วนผสมจะมีการอัตราเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น ดังนั้น อุณหภูมิและช่วงเวลาที่ยอมให้ในการจัดเก็บส่วนผสมเพื่อไม่ให้สูญเสียคุณสมบัติดังกล่าว จะมีค่าลดลงตามลำดับดังต่อไปนี้

เวลาที่อุณหภูมิเริ่มต้น / เวลาที่ยอมให้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น

Fernando และ Nadarajah (1969) ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยน้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) ชนิดต่าง ๆ 6 ชนิดดังนี้ น้ำยางสด (Field latex) ทั้งชนิดแอมโมเนียต่ำ LA และชนิดแอมโมเนียสูง HA น้ำยางที่ได้จากวิธีการปั่น (Centrifuged latex) ชนิดแอมโมเนียต่ำ LA น้ำยาง Revertex และหางน้ำยาง (Skim latex) ทั้งชนิดที่ใส่สาร Carboxy

Methyl Cellulose (CMC) และชนิดที่ใส่สาร Hydroxy Ethyl Cellulose (HEC) ซึ่งใช้ปริมาณน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิดในอัตราส่วน 2–4% ผสมลงในแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 80/100 โดยทำการผสมที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 150–163 องศาเซลเซียส และกวนอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่ทำการผสม หลังจากผสมน้ำยางธรรมชาติหมดแล้วจะต้องกวนต่อจนครบ 20 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมน้ำยางธรรมชาติในแต่ละชนิด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.2 พบว่า ค่า Penetration ลดลง นั่นคือแอสฟัลต์แข็งขึ้น ค่าจุดอ่อนตัวสูงขึ้น ขณะที่ค่าการหลุดลอกและค่าการยืดดึง (Ductility) ลดลง นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาเทคนิคในการผสม เช่น การเติมน้ำมันก๊าด 5% โดยปริมาตร สามารถช่วยลดความหนืด (Viscosity) ในระหว่างทำการผสมลงได้ ทำให้เกิดความสะดวกในการปฏิบัติงาน ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของส่วนผสมจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่ผสมลงไปในแอสฟัลต์ และการรักษาน้ำยางสดโดยใช้แอมโมเนีย 0.3% (สารละลาย 20%) และโซดาไฟ (NaOH) 0.7% (สารละลาย 10%) จะให้ผลดีที่สุด ดีกว่าการใช้เพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง นอกจากนี้ โซดาไฟยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผสม สามารถลดฟองจากการเดือดของน้ำในขณะทำการผสมได้ เนื่องจากการใช้น้ำยางสดเพียงอย่างเดียวผสมกับแอสฟัลต์จะเกิดฟองมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่ผสมน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด

Properties	% Rubber	Type of Latex					
		L.A.	H.A.	L.A.	Revertex	Creamed Skim latex	
		Field latex	Field latex	Centrifuged latex		C.M.C	H.E.C.
Penetration	0	90	90	90	90	90	90
	2	74	69	71	73	70	68
	3	68	60	65	63	62	64
	4	62	58	60	53	52	60
Softening Point	0	49	49	49	49	49	49
	2	53	58	54	54	58	57
	3	56	62	58	61	59	59
	4	60	63	61	67	64	62
Ductility	0	150	150	150	150	150	150
	2	72	55	54	72	73	58
	3	61	40	48	60	60	51
	4	54	34	43	35	45	54
Stripping on Limestone	0	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
	2.5	2.6	4.3	2.0	1.3	1.0	2.4
% Increase in Toughness	2.5	68	108	93	39	125	-
% Increase in Tenacity	2.5	186	260	303	220	136	140

จากนั้นได้ทดลองลาดถนนจริง ในปี 1984 โดยมีความร่วมมือกับสถาบันวิจัยยางอินเดีย ด้วยการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 80/100 กับน้ำยางสดในอัตราส่วน 2% ใช้วิธีผสมร้อน (Hot Mix Asphalt : HMA) กับมวลรวมชนิดหินปูน (Limestone) ที่ถนนระหว่างเมืองที่วิวานดรัม และโคตยาัม เป็นระยะทาง 1 กิโลเมตรเปรียบเทียบกับถนนที่ลาดด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา ผลปรากฏว่า ถนนที่ลาดด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาต้องซ่อมผิวทางใหม่ในอีก 5 ปีต่อมาและในปีที่ 10 ต้องซ่อมเป็นครั้งที่สอง ขณะที่ถนนที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมน้ำยางธรรมชาติในอัตราส่วน 2% ยังคงมีสภาพดีจนกระทั่งถึงปีที่ 14 จากนั้นถนนทั้ง 2 แห่งจึงถูกลาดทับด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์

ธรรมดา ต่อมาได้มีการขยายผลไปทั่วประเทศ โดยในปี 1995 ได้สร้างถนนที่ใช้แอสฟัลต์ผสมน้ำยางธรรมชาติในอัตราส่วน 2% เป็นระยะทาง 13 กิโลเมตร ที่ซาบาริมาลา และจากหลายการทดลองสรุปได้ว่า การผสมยางธรรมชาติในอัตราส่วน 2% สามารถยืดอายุการใช้งานของถนนได้อย่างน้อย 50% ในขณะที่ค่าใช้จ่ายในการลาดผิวถนนเพิ่มขึ้นเพียง 16%

ปัจจุบัน รัฐบาลอินเดียร่วมกับกระทรวงขนส่งทางบกได้สั่งการให้ทุกรัฐเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติผสมแอสฟัลต์ในทุก ๆ 10% ของระยะทางที่จะดำเนินการก่อสร้างหรือซ่อมแซมทุกปี โดยเริ่มตั้งแต่ปี 1999 เป็นต้นไป นอกจากนี้ ยังได้มีการผลิตยางธรรมชาติในลักษณะของน้ำยางสดที่รักษาสภาพด้วยแอมโมเนียกับโซดาไฟที่โรงกลั่นน้ำมันเมืองโคชินผสมกับแอสฟัลต์ในเชิงพาณิชย์

Turi (1981) ได้เสนอแนะขอบเขตของอุณหภูมิที่ใช้ผสมแอสฟัลต์กับยางธรรมชาติ โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิสูง เนื่องจากการผสมวัสดุแอสฟัลต์กับยางธรรมชาตินั้นจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิที่สูงเป็นระยะเวลานาน ซึ่งอาจทำให้คุณภาพของส่วนผสมนั้นลดลงไปได้ ดังนั้นไม่ว่าจะผสมด้วยวิธีการใดก็ตามจะต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินกว่า 270 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวเนื้อยางจะเริ่มเสื่อมสภาพ (Degradation) และเมื่ออุณหภูมิถึงช่วง 360-380 องศาเซลเซียส เนื้อยางจะเสียสภาพ (Breakdown) ทันที

Fernando และ Guirguis (1983) ได้ศึกษาการใช้ผงยางธรรมชาติ (Natural rubber powder) ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 ในอัตราส่วนร้อยละ 2-4 โดยนำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อใช้ลาดถนนในเขตร้อน (Hot climates) โดยพบว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยผงยางธรรมชาตินั้น ช่วยทำให้ผิวทางสามารถต้านทานต่อการแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำอันเป็นสาเหตุของการเกิดการแตกร้าวได้ ขณะที่อุณหภูมิสูงสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงแก่ผิวทางเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดร่องล้อ (Rutting) และการยุบตัวอย่างถาวร (Permanent deformation) เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกได้ ซึ่งการใช้ยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์นั้นเป็นสิ่งที่ควรนำมาพิจารณา เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีราคาถูก เมื่อเทียบกับงบประมาณในการซ่อมบำรุงทางแล้ว จะเห็นว่าคุ้มค่าแก่การนำมาใช้ อีกทั้งผิวทางที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติจะสามารถช่วยเพิ่มการเกาะยึดในการขับขี่ได้ดีขึ้น เพิ่มความปลอดภัยได้

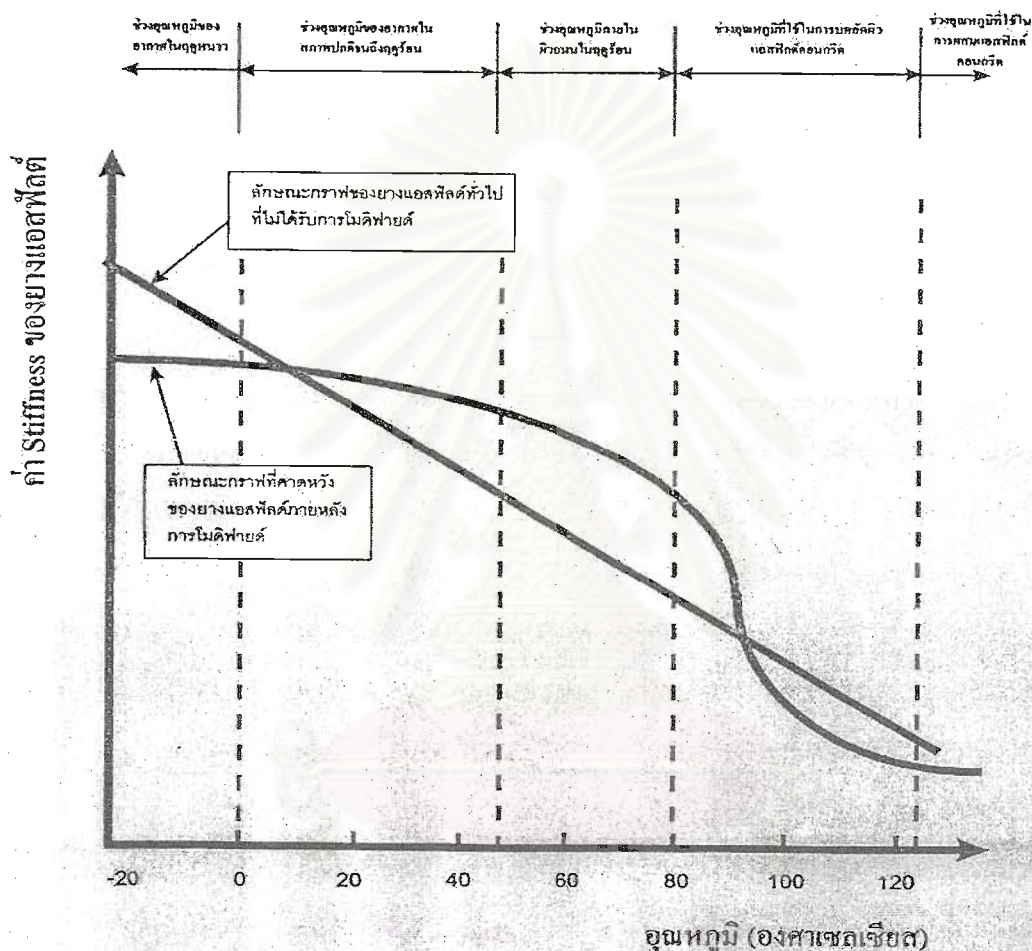
Balghunnain et al. (1992) ได้ศึกษาการนำสารโพลีเมอร์มาปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ เพื่อลดการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของผิวทางเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยโพลีเมอร์ที่นำมาใช้ศึกษามี 2 ชนิดคือ โพลีเอทิลีนและสไตรีนบิวตะไดอีน โดยแอสฟัลต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ชนิดโพลีเอทิลีน ในอัตราส่วนผสม 7% จะเรียกว่า Novophalt ส่วนแอสฟัลต์ที่ได้รับการปรับปรุงด้วยโพลีเมอร์ชนิดสไตรีนบิวตะไดอีน ในอัตราส่วนผสม 5% จะเรียกว่า Styrelf จากนั้นได้ทำการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม โดยในภาคสนามเลือกใช้เส้นทางที่รองรับน้ำหนักจากรถบรรทุกน้ำมัน ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ค่า Penetration ลดลง ค่าความหนืด (Viscosity) และจุดอ่อนตัว (Softening point) สูงขึ้น ขณะที่ผลการทดสอบในภาคสนามพบว่า ความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดร่องล้อ (Rutting) มีน้อยมาก

Shell Chemical Company (1992) ได้ศึกษาการนำยางมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC-5 ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 โดยตั้งชื่อที่ได้จากการค้นคว้านี้ว่า "Kraton Rubber" จากผลการศึกษาพบว่า ยางดังกล่าวสามารถทำให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไปดังนี้

- เพิ่มความสามารถในการดัดงอที่อุณหภูมิต่ำ
- เพิ่มความต้านทานต่อการไหลและการเสีรูปที่อุณหภูมิสูง
- เพิ่มความสามารถในการรับแรงดึง
- เพิ่มค่าโมดูลัสความแข็งแแกร่ง (Stiffness modulus) ที่อุณหภูมิสูง
- เพิ่มความสามารถในการยืดเหนียวระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม
- เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิวทาง
- เพิ่มค่าจุดอ่อนตัว
- ลดความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- เพิ่มความยืดหยุ่น
- ค่า Penetration ลดลง นั่นคือ วัสดุผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์มีความแข็งขึ้น

ชยธันว พรหมศร (2541) ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลีเมอร์ เพื่อเน้นการเพิ่มศักยภาพอยู่ 2 ด้านสำหรับการใช้งานในประเทศไทย คือ ในด้านการรักษาความแข็งแแกร่ง (Stiffness) และความยืดหยุ่น (Elasticity) ที่อุณหภูมิสูง เพื่อป้องกันการยุบตัวแบบถาวร

(Permanent deformation) และในด้านการรักษาความยืดหยุ่นไม่แข็งเปราะ ภายหลังจากผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่ง (Aging) แล้วสามารถทนต่อการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้ (Fatigue cracking) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้คาดหวังถึงคุณสมบัติที่จะได้รับหลังจากผสมโพลีเมอร์ลงไปในแอสฟัลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness ของแอสฟัลต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่คาดหวังจะได้รับจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลีเมอร์

ในการศึกษาได้เลือกใช้สารโพลีเมอร์ 4 ชนิด ได้แก่ SBS (Styrene Butadiene Styrene) SBR (Styrene Butadiene Rubber) EVA (Ethylene Vinyl Acetate) ในอัตราส่วนชนิดละ 3% โดยน้ำหนักแอสฟัลต์ และ SBR ผสมกับ Polyolefin ในอัตราส่วน 3:2 สำหรับวัสดุแอสฟัลต์ที่ใช้ศึกษามีทั้งชนิดเกรดแข็งคือ AC-20 และชนิดเกรดอ่อนคือ AC-10 โดยการผสมสารโพลีเมอร์กับวัสดุแอสฟัลต์นั้นทั้งหมดจะกระทำในระหว่างกระบวนการผลิตแอสฟัลต์ที่โรงงานผลิตทั้งสิ้น การทดสอบ

ทั้งหมดอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM โดยจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแอสฟัลต์ที่มีส่วนผสมสารโพลีเมอร์ กับที่ไม่ได้ผสมสารโพลีเมอร์ จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ในส่วนที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมสารโพลีเมอร์

- การผสมสารโพลีเมอร์ชนิด SBS ในวัสดุแอสฟัลต์ ส่งผลให้มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงมากขึ้นแม้ที่อุณหภูมิสูง โดยสารโพลีเมอร์ชนิด SBS ได้แสดงคุณสมบัตินี้ได้ชัดเจนกว่าสารโพลีเมอร์โมดิฟายด์ชนิดอื่น
- สารโพลีเมอร์ชนิด SBS ที่ผสมในวัสดุแอสฟัลต์เกรดอ่อน สามารถช่วยให้วัสดุแอสฟัลต์นั้นมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่ผสมในวัสดุแอสฟัลต์เกรดแข็ง แต่ในขณะเดียวกันก็ยังมีแข็งแรงเพราะที่อุณหภูมิต่ำน้อยกว่าวัสดุแอสฟัลต์เกรดแข็ง โดยสารโพลีเมอร์ชนิด SBS แสดงคุณสมบัตินี้ได้ชัดเจนกว่าสารโพลีเมอร์โมดิฟายด์ชนิดอื่นเช่นกัน
- การผสมสารโพลีเมอร์ชนิด SBS ในวัสดุแอสฟัลต์ได้แสดงถึงความสามารถที่จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ภายหลังจากการใช้งานไประยะหนึ่ง (Aging) ได้
- สารโพลีเมอร์ทุกชนิดได้แสดงถึงความสามารถที่จะช่วยเพิ่มค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) แก่วสดุแอสฟัลต์ได้

ในส่วนที่เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

- สารโพลีเมอร์ทุกชนิดได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถที่จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stability) ให้แก่วสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้
- สารโพลีเมอร์ชนิด SBS ได้แสดงความสามารถที่โดดเด่นที่สุดในการเพิ่มความต้านทานต่อการแตกร้าวของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยสังเกตได้จากผลการทดสอบค่า Tensile strength และค่า Tensile strain ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ทุกค่าอุณหภูมิทดสอบ โดยเฉพาะผลการทดสอบก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตและก้อนตัวอย่างโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมขึ้นโดยการบดอัดด้วยวิธี Standard compaction

Nair et al. (1998) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical property) และคุณสมบัติการไหล (Rheological property) ของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมยางธรรมชาติ โดยการใช้แผ่นยางรมควันที่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงด้วยการละลายแผ่นยางลงใน Fluxing oil เพื่อทำให้อยู่ในรูป

ของเหลว (Liquid Natural Rubber : LNR) แล้วนำไปผสมกับแอสฟัลต์ในอัตราส่วน 5% 10% 20% และ 30% สำหรับวัสดุแอสฟัลต์ที่ใช้ทำการศึกษามี 2 ชนิดคือ แอสฟัลต์ชนิดเกรด 80/100 และแอสฟัลต์แบบเป่า (Air blown) ชนิดเกรด 5 โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ อัตราส่วนที่ใช้ในการผสม และคุณสมบัติที่ใช้ในการทดสอบ เช่น ค่า Penetration ค่าความหนืด (Viscosity) ค่าการยืดดึง (Ductility) ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) และค่าแรงเฉือน (Lap shear)

จากการศึกษาพบว่า เมื่อผสม LNR ลงไปในวัสดุแอสฟัลต์ทั้ง 2 ชนิด ค่าการยืดดึงจะลดลงตามปริมาณ LNR ที่เติมเข้าไปยกเว้นในกรณีของส่วนผสมแอสฟัลต์แบบ Air blown ขณะที่ค่าจุดอ่อนตัวและค่า Penetration Index (PI) แสดงค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ LNR ที่เติมเข้าไป ซึ่งค่า PI ที่เพิ่มขึ้นนี้จะบ่งชี้ถึงความสามารถในการลดความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ นอกจากนี้ การผสม LNR ลงไปในวัสดุแอสฟัลต์ยังช่วยเพิ่มค่า Shear strength เมื่ออัตราแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น และสามารถต้านทานต่อการไหลได้ดีขึ้น ขณะที่อุณหภูมิส่งผลต่อความหนืดของส่วนผสม นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไม่ว่าจะทำการผสมยางธรรมชาติเข้าไปหรือไม่ก็ตาม ค่าความหนืดจะลดลง ดังนั้น อัตราส่วนของ LNR ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการผสมต้องไม่เกิน 20% เนื่องจากหากผสมมากกว่าปริมาณดังกล่าว ส่วนผสมจะมีความหนืดสูง การผสมจะทำได้ยากขึ้น และทำให้ส่วนผสมไม่สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีพอ

Manoj Kumar และ Satya Kumar (2001) ได้ศึกษาคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 80/100 ผสมกับน้ำยางธรรมชาติ 2 ชนิดคือ น้ำยางสด (Natural Rubber Latex : NRL) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content : DRC) 30% และน้ำยางข้นที่ได้จากวิธีการปั่น (Centrifuged Latex : CL) ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content : DRC) 60% ทำการผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณสัดส่วน 1% 1.5% 2% 3% และ 4% โดยนำหนักแอสฟัลต์ จากนั้นผสมกับมวลรวมร้อนชนิดเกรดเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้ เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ปริมาณน้ำยางธรรมชาติที่เหมาะสม และต้นทุนในการใช้น้ำยางธรรมชาติของทั้ง 2 ชนิด ซึ่งผลทดสอบคุณสมบัติได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ที่ผสมน้ำยางธรรมชาติชนิด NRL และ CL

No	Properties	AC 80/100	1%		1.50%		2%		3%		4%	
			NRL	CL	NRL	CL	NRL	CL	NRL	CL	NRL	CL
1	Penetration value	85	78	73	72	70	68	65	64	60	61	57
2	Softening point (°C)	43.5	48	50	48.5	51	50	51.5	51	53	52.5	54.5
3	Ductility (cms)	66	>125	>125	>125	>125	>125	>125	>125	>125	>125	>125
4	Specific gravity	2.33	2.28	2.34	2.32	2.34	2.35	2.34	2.36	2.36	2.40	2.38
5	Unit weight (g/cc)	2.37	2.39	2.35	2.41	2.36	2.45	2.37	2.64	2.38	2.92	2.39
6	Stability (kg)	1132	772	1004	821	1168	1319	1204	684	1188	594	1155
7	Flow (mm)	2.3	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6	2.4	3.0	2.6	3.4	2.9
8	% Air voids	4.0	4.83	4.8	4.67	4.7	4.04	4.6	3.41	3.8	1.29	2.6
9	% VMA	16.62	10.8	10.4	10.7	10.4	10.1	10.3	10.2	9.62	9.36	8.47
10	% VFB	74.94	55.1	53.9	56.2	54.7	60.2	55.5	66.4	60.5	86.1	69.4

จากผลการทดสอบในตารางที่ 2.3 พบว่าแอสฟัลต์ที่ผสมด้วยน้ำยางธรรมชาติแบบ CL แสดงคุณสมบัติที่ดีกว่าน้ำยางแบบ NRL เช่น ค่า Penetration ลดลงต่ำกว่า นั่นคือช่วยปรับปรุงให้แอสฟัลต์แข็งกว่า ขณะที่จุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นสูงกว่า และสำหรับในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ใช้การบดอัดด้วยวิธีมาร์แชล พบว่าค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำยางแบบ CL มีค่าน้อยกว่าที่ผสมด้วยน้ำยางแบบ NRL ในทุกระดับตามปริมาณน้ำยางที่ผสมลงไป อย่างไรก็ตาม ยังคงแสดงค่าที่สูงกว่าส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา สำหรับค่าเสถียรภาพ (Stability) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำยางแบบ CL มีค่าสูงกว่าที่ผสมด้วยน้ำยางแบบ NRL ขณะที่ค่าการไหล (Flow) กลับแสดงค่าที่ตรงกันข้ามกัน นั่นเป็นการบ่งชี้ว่า น้ำยางแบบ CL ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งมากกว่าสามารถช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงและมีเสถียรภาพในการรับน้ำหนักที่มากกระทำเพิ่มมากขึ้น ขณะที่มีการไหลลดลง นอกจากนี้ ยังช่วยเพิ่มปริมาณช่องว่างอากาศแก่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อให้มีช่องว่างเพียงพอต่อความยืดหยุ่นของผิวทาง สำหรับค่า %VMA และ %VFB ล้วนมีค่าต่ำกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาทั้งสิ้น

จากการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลทำให้ได้ปริมาณน้ำยางธรรมชาติทั้ง 2 ชนิด ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตคือ การผสมน้ำยางธรรมชาติ

ในปริมาณสัดส่วน 2% ลงไปในแอสฟัลต์ซีเมนต์ จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วย
น้ำยางธรรมชาติแบบ NRL และแบบ CL ที่ปริมาณสัดส่วน 2%

No	Properties	AC 80/100	NRL 2%	CL 2%
1	Tensile strength (kg/cm ²)	6.92	7.5	7.03
2	Retained tensile strength (kg/cm ²)	5.82	6.87	6.35
3	Tensile Strength Ratio (TSR)	84%	92%	90%
4	Tensile strain (mm/mm)	0.524	0.702	0.672

จากตารางที่ 2.4 พบว่าประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำยางธรรมชาติแต่ละชนิด มีค่าความแตกต่างกันไม่มากนัก โดยส่วนผสมของน้ำยางแบบ NRL จะมีค่าสูงกว่าแบบ CL เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าเมื่อนำน้ำยางธรรมชาติแบบ NRL มาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ในอัตราส่วน 2% ลาดถนนจะทำให้มีต้นทุนเพิ่มขึ้น 8.33% ขณะที่เมื่อนำน้ำยางธรรมชาติแบบ CL ในอัตราส่วนเดียวกัน ลาดถนนจะทำให้มีต้นทุนเพิ่มขึ้น 10.42%

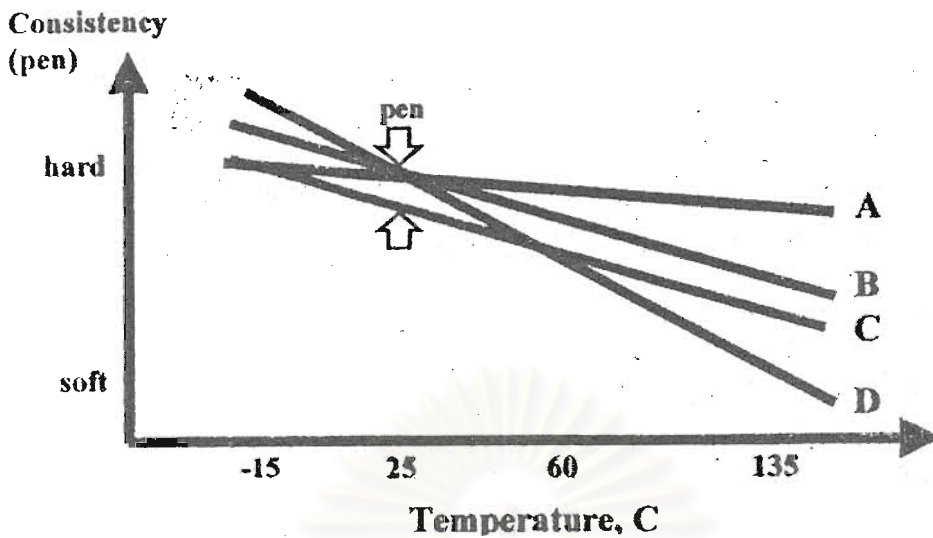
ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, พิภพณ์ คูหิรัญ และ ชยธันว์ พรหมศร (2544) ได้ร่วมกันนำเสนอข้อแนะนำในการปรับปรุงการออกแบบวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรสูงในประเทศไทย เนื่องจากผิวทางในประเทศไทยมักมีลักษณะการเสียหายหลักอยู่ 2 รูปแบบ คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent deformation) และการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking)

สำหรับความเสียหายในลักษณะแรกมักเกิดในบริเวณที่มีการสัญจรไปมามากและมีการหยุดจอดและออกตัวบ่อย เช่น บริเวณทางแยก ทำให้ผิวทางต้องรับน้ำหนักมากจนเกิดการยุบตัวและเกิดร่องล้อ (Rutting) ขึ้น อีกทั้งประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน วัสดุผิวทางแอสฟัลต์จึงอ่อนตัวได้ง่าย ดังนั้นสามารถสรุปสาเหตุของความเสียหายในลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรได้ คือ เกิดจากการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ดีพอ ชั้นโครงสร้างทางต่าง ๆ ไม่แข็งแรงเพียงพอ มีการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดที่กฎหมายกำหนด และที่สำคัญวัสดุแอสฟัลต์ที่ใช้

เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพไม่ดีพอ ขาดความยืดหยุ่นและความแข็งแรง ส่วนการเสียหายของผิวทางที่แตกร้าวเนื่องจากความล้ามักเกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกในลักษณะซ้ำซากและวัสดุผิวทางมีคุณภาพที่ไม่ดีพอ อีกทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนเมื่อผิวทางผ่านการใช้งาน (Aging) มาระยะหนึ่ง ทำให้ผิวทางมีความแข็งเปราะมากขึ้น ขาดความยืดหยุ่นทำให้เกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งการเกิด Aging จะเกิดซ้ำเร็วแตกต่างกันตามแหล่งและชนิดของวัสดุแอสฟัลต์ สำหรับสาเหตุอื่นก็มีลักษณะใกล้เคียงกันกับสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงได้เลือกประเด็นของการคัดเลือกและพิจารณาปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นหลัก

จากการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์นั้น ยังไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์ได้อย่างเพียงพอว่าจะเป็วัสดุที่ดีเมื่อนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วจะทำให้ได้ผิวทางที่มีคุณภาพที่ดีตามมาได้หรือไม่ สำหรับทางหลวงในประเทศไทยในปัจจุบันได้ใช้ข้อกำหนดของกรมทางหลวงในการก่อสร้าง โดยกำหนดเกรดของวัสดุแอสฟัลต์ด้วยการทดสอบ Penetration ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเพียงอย่างเดียว จะเห็นได้ว่าการทดสอบดังกล่าวเป็นเพียงการวัดความแข็งอ่อนเพื่อแบ่งเกรดของวัสดุแอสฟัลต์เท่านั้น ขณะที่อุณหภูมิการใช้งานบนถนนอาจสูงถึง 50-60 องศาเซลเซียส ซึ่งในแต่ละเส้นทางที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดเดียวกันนั้น กลับมีความสามารถในการต้านทานความเสียหายที่แตกต่างกันและในระยะเวลาที่ต่างกัน นั้นเป็นการบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าวัสดุแอสฟัลต์ทั้ง 4 ชนิด สามารถผ่านข้อกำหนดเกรด Penetration เดียวกัน แต่เมื่อนำไปใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันแล้ว กลับแสดงคุณสมบัติที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสซึ่งอาจเป็นอุณหภูมิของผิวทางในฤดูร้อน ดังนั้น วัสดุแอสฟัลต์ชนิด A น่าจะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยพิจารณาลักษณะของ Temperature susceptibility ประกอบไปด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 ความแตกต่างในคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากเหตุการณ์ดังกล่าวจึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์ขึ้น โดยประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดให้มีโปรแกรมเฉพาะกิจเพื่อปรับปรุงคุณภาพการทดสอบ การออกแบบวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นคือ Strategic Highway Research Program หรือที่เรียกกันย่อๆว่า SHRP ซึ่งต่อมาได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง โดยโปรแกรมนี้ได้คิดค้นข้อกำหนดในการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์และวัสดุเชื่อมประสาน (Binders) ชนิดอื่น ๆ เช่น ยาง โพลีเมอร์ และวัสดุ Modified asphalt ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบด้วย Dynamic Shear Rheometer (DSR) เพื่อเป็นการวัดสมบัติทาง Rheology properties ของวัสดุประเภท visco-elastic ที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (5-40 องศาเซลเซียส) และที่ช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 45 องศาเซลเซียส) ได้

โดยปกติวัสดุแอสฟัลต์จัดเป็นวัสดุประเภท visco-elastic คือ มีทั้งพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) โดยสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้โดยสมบูรณ์หรือตอบสนองต่อแรงกระทำในทันที และมีพฤติกรรมแบบหนืด Viscous โดยตอบสนองต่อแรงที่มากระทำช้ามาก ซึ่งในการทดสอบ DSR นี้ จะแสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญที่วัดได้ออกมา 2 ค่า คือ Complex shear modulus (G^*) และ Phase angle (δ) โดยค่า G^* หมายถึงความแข็งแกร่ง (Stiffness) ของวัสดุ ส่วนค่า δ หมายถึงพฤติกรรมของวัสดุ ซึ่งเมื่อค่า δ มีมุน้อยเข้าใกล้ 0 องศา แสดงว่าวัสดุนั้นมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ขณะที่ถ้าค่า δ มีมุนมากเข้าใกล้ 90 องศา แสดงว่าวัสดุนั้นมีพฤติกรรมแบบหนืด สำหรับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั่วไป จะมีค่า δ อยู่ในช่วง 0-90 องศา โดยที่อุณหภูมิต่ำจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า ค่า δ จะค่อนข้างต่ำ ขณะที่อุณหภูมิสูงจะมีลักษณะหนืดมากกว่า ค่า δ จะค่อนข้างสูง

ดังนั้น ทั้งค่า G^* และค่า Phase angle (δ) จึงมีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อต้านทานความเสียหายของผิวทางได้ โดยในกรณีความเสียหายที่เกิดจากการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) ที่อุณหภูมิสูงสุดเทียบเท่าอุณหภูมิของถนนที่ใช้ งาน ข้อกำหนดระบุให้ใช้ค่า $G^*/\sin \delta$ เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบกำหนดความสามารถในการต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวร ทั้งนี้วัสดุแอสฟัลต์โดยทั่วไปจะต้องมีค่า $G^*/\sin \delta$ สูงกว่า 1.0 kPa และหลังจากผ่านการ Aging ระยะสั้นซึ่งเป็นการจำลองสภาพการ Aging ที่เกิดขึ้นระหว่างการผสมแอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิสูงด้วยเครื่อง Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) โดยเป็นการผ่านวัสดุแอสฟัลต์ในสภาพแผ่นฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 85 นาที แล้ว ค่า $G^*/\sin \delta$ จะต้องไม่ต่ำกว่า 2.20 kPa ซึ่งพอจะเชื่อมั่นได้ว่าวัสดุแอสฟัลต์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติแข็งแรงเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในลักษณะการยุบตัวแบบถาวรที่อุณหภูมิการใช้งาน และเมื่อผิวทางบนถนนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เกิดการ Aging ของวัสดุแอสฟัลต์ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในระยะยาว โดยมีสภาพแข็งเปราะทำให้เกิดความเสียหายในลักษณะแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) ได้ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง ดังนั้นวัสดุแอสฟัลต์จะต้องได้รับการตรวจคุณสมบัติภายหลังจากการ Aging นี้ด้วย ซึ่งวัสดุแอสฟัลต์ที่ผ่าน RTFOT แล้วจะต้องนำมาผ่านเครื่อง Pressure Aging Vessel (PAV) โดยเป็นการผ่านวัสดุแอสฟัลต์ในสภาพแผ่นฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 90–100 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันออกซิเจนขนาด 2.07 MPa เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อเป็นการจำลองสภาพ Aging ของแอสฟัลต์บนถนน ข้อกำหนดระบุให้ใช้ค่า $G^* \sin \delta$ ที่ผ่านการ Aging ด้วยเครื่อง PAV ที่อุณหภูมิ 20–30 องศาเซลเซียส จะต้องไม่สูงเกินกว่า 5.0 MPa เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุแอสฟัลต์ที่จะนำมาใช้งานนั้น จะมีคุณสมบัติแข็งแรงเพียงพอต่อการต้านทานความเสียหายต่อการยุบตัวแบบถาวร และเมื่อเกิดการ Aging ในระหว่างการใช้งาน จะไม่มีผลให้เกิดความแข็งเปราะมากเกินไปจนกระทั่งทำให้เกิดความเสียหายในรูปแบบของการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้

Jamal และ Faisal (1991) ได้ร่วมกันศึกษาผลของระดับการบ่อน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์แตกต่างกัน โดยการทดสอบได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4123-82 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension" ในการศึกษานี้ได้ทดสอบตัวอย่างที่ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 ที่แตกต่างกันอยู่ 3 ระดับ คือ 4% 4.5% และ 5% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมดที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลโดยใช้จำนวนรอบการบดอัด 75 ครั้งต่อด้าน ซึ่งในแต่ละปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ใช้ตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 20 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 10 ตัวอย่าง

แรกใช้ในการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) ที่สภาพแห้ง (Dry condition) และที่สภาพเปียก (Moisture condition) อย่างละ 5 ตัวอย่าง สำหรับ 10 ตัวอย่างที่เหลือจะใช้ในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus) ต่อไป ซึ่งตาม ASTM D4123-82 ได้ให้คำแนะนำไว้ว่าระดับการป้อนน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว ควรอยู่ในช่วงร้อยละ 10-50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ดังนั้น ในการทดสอบจึงกำหนดค่าระดับการป้อนน้ำหนักร้อยละ 10-30 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ซึ่งการที่ไม่ใช้ระดับการป้อนน้ำหนักร้อยละ 50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมนั้น ก็เพื่อให้แน่ใจว่าระดับการป้อนน้ำหนักร้อยละ 50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมนั้น ก็เพื่อให้แน่ใจว่าระดับการป้อนน้ำหนักร้อยละ 50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมนั้น ก็เพื่อให้แน่ใจว่าระดับการป้อนน้ำหนักร้อยละ 50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมนั้น ก็เพื่อให้แน่ใจว่าระดับการป้อนน้ำหนักร้อยละ 50 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมนั้น

- ค่าโมดูลัสคืนตัว มีค่าลดลง เมื่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น
- ค่าโมดูลัสคืนตัว ที่ได้จากการทดสอบที่สภาพเปียก มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบที่สภาพแห้ง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลมาจาก Pore pressure และการลดลงของอุณหภูมิเนื่องจากการระเหยของน้ำออกจากตัวอย่าง
- ผลที่ได้สามารถแสดงให้เห็นว่าระดับการป้อนน้ำหนักร้อยละ 10-30 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมนั้น มีผลต่อค่าโมดูลัสคืนตัว กล่าวคือ ที่การป้อนน้ำหนักร้อยละสูงค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้จะมีค่าต่ำกว่าที่การป้อนน้ำหนักร้อยละต่ำ นั่นคือยิ่งป้อนน้ำหนักร้อยละสูงค่าโมดูลัสคืนตัวที่ได้ก็ยิ่งน้อยลงเท่านั้น

จากผลทดสอบดังกล่าว ทำให้มีคำแนะนำว่า ในการออกแบบควรป้อนน้ำหนักร้อยละ 10-30 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม เพื่อเป็นการออกแบบที่ Conservative design ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตในกรณีที่มีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่ำ

ชยธันว์ พรหมศร (2541) ได้ศึกษาการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) และเสนอข้อดีของวิธีการทดสอบดังกล่าว ดังนี้

- วิธีการทดสอบมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- การพังทลายของวัสดุเนื่องจากการทดสอบไม่มีผลต่อสภาพของผิวของวัสดุทดสอบ จึงทำให้แน่ใจว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง
- การพังทลายของวัสดุเกิดขึ้นที่บริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่สามารถหาได้จากวิธีการทดสอบนี้ สามารถแบ่งได้เป็น

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักคงที่ (Static indirect tensile test) ได้ค่าดังนี้

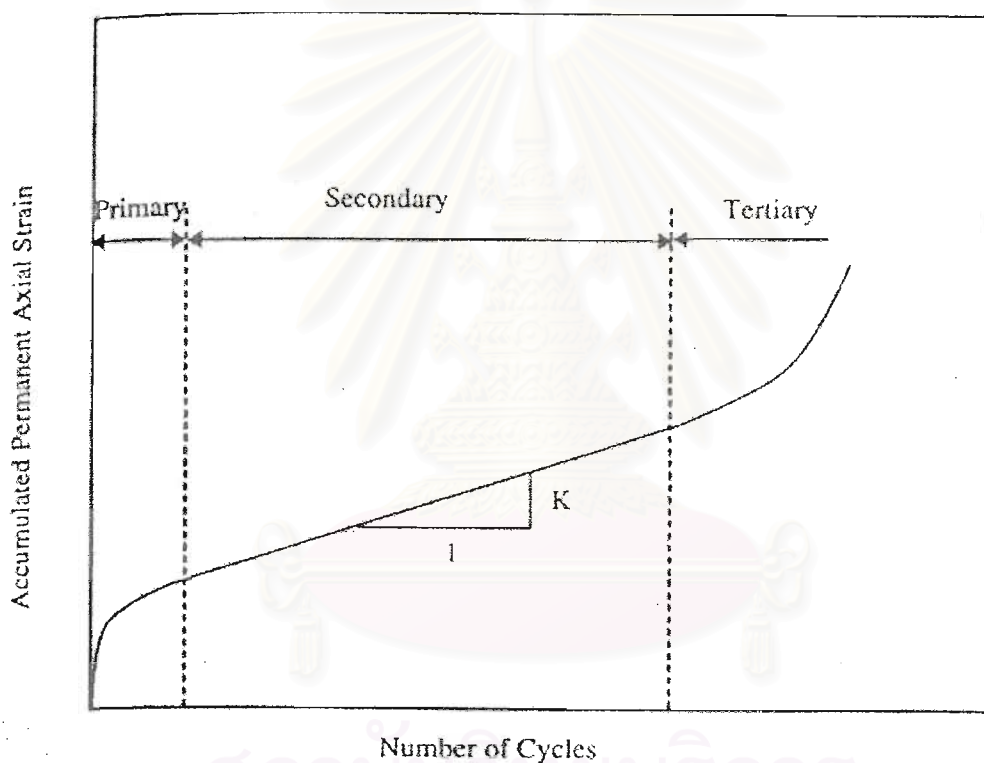
- ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Static modulus of elasticity)
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)
- ค่าสัดส่วนปัวซอง (Static Poisson's ratio)

การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated-Load/Dynamic indirect tensile test) ได้ค่าดังนี้

- ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient modulus)
- ค่าความล้า (Fatigue characteristics)
- ค่าสัดส่วนปัวซองแบบคืนตัว (Resilient Poisson's ratio)
- ค่าการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Permanent deformation characteristics)

Mohamed และ Yue (1994) ได้ศึกษาการประเมินผลจากการเกิดร่องล้อบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งในอดีตการวัดการเกิดร่องล้อจะทำการทดสอบโดยใช้ล้อจำลองวิ่งบนแผ่นวัสดุตัวอย่างด้วยความเร็วและอุณหภูมิที่กำหนด หลังจากนั้นจะทำการวัดหาความลึกที่เกิดจากล้อจำลอง (rut depth) แล้วนำค่านี้ไปประเมินสภาพผิวทางในสนาม ซึ่งต่อมาหน่วยงานทางหลวง Strategic Highway Research Program (SHRP) ได้คิดค้นวิธีใหม่ในการประเมินผลโดยการหาค่า Accumulated permanent axial strain บนผิวทางที่เกิดร่องล้อซึ่งเกิดการเสียหายจาก Shear damage ด้วยวิธีการทดสอบ Repetitive uniaxial compression test ซึ่งสามารถประเมินการเสียหายจากการเกิดร่องล้อและการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) ของผิวทางได้ โดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบน้อยและเสมือนการจำลองน้ำหนักบรรทุกจริงในสนาม นอกจากนี้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสามารถได้มาจากการขุดเจาะ (Core) ในสนามจริง หรือได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องบดอัด SHRP Gyrotory compactor ทำให้เกิดความสะดวก อีกทั้งตัวอย่างที่ได้มีลักษณะทางกายภาพ เช่น ความสูง ความหนาแน่น และปริมาณช่องว่างอากาศที่ใกล้เคียงกัน เป็นต้น

สำหรับการศึกษานี้ได้กำหนดลักษณะของการป้อนน้ำหนักเป็นรูปแบบ Square pulse ใช้เวลา 2 วินาทีต่อ 1 รอบการให้น้ำหนัก โดยแบ่งออกเป็น 0.2 วินาที ให้น้ำหนัก และ 1.8 วินาทีเป็นเวลาหยุดพัก กล่าวคือใช้ความถี่ 0.5 Hz หน่วยแรงที่ใช้ป้อนคือ 690 kPa ซึ่งเป็นค่าตัวแทนของน้ำหนักล้อของรถที่สัญจรบนทางหลวงในอเมริกาเหนือ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อข้อกำหนดเกณฑ์ในการทดสอบ คือ ความสูงของก้อนตัวอย่าง ระดับการป้อนน้ำหนัก ลักษณะการบดอัดทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ รวมทั้งสภาพแวดล้อมที่ช่วงอุณหภูมิสูง ผลการทดสอบได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Accumulated permanent axial strain กับจำนวนรอบที่น้ำหนักมากกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Accumulated permanent axial strain กับจำนวนรอบที่น้ำหนักมากกระทำ

จากรูปที่ 2.3 แสดงช่วงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ 3 ช่วง คือ

- **ช่วงแรก (Primary)** ช่วงนี้ก้อนตัวอย่างทดสอบจะมีอัตราการยุบตัวสูงมาก ค่า Accumulated permanent axial strain จะเพิ่มสูงขึ้นภายในระยะเวลาสั้น ๆ เนื่องจากก้อนตัวอย่างจะเริ่มแน่นอย่างรวดเร็วจากน้ำหนักที่มากกระทำ และภายใน

โครงสร้างของส่วนผสม มวลรวมจะมีการเคลื่อนตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ขึ้น ซึ่งข้อมูลในช่วงแรกนี้ยังไม่สามารถประเมินสมบัติการยุบตัวของตัวอย่างได้

- **ช่วงที่ 2 (Secondary)** หลังจากตัวอย่างแน่นขึ้นและการเคลื่อนตัวของมวลรวมลดลง ทำให้อัตราการเพิ่มของค่า Accumulated permanent axial strain เริ่มคงที่ ดังนั้น การยุบตัวที่เกิดในช่วงนี้อาจมีสาเหตุมาจาก Shear flow โดยจากกราฟในรูป 2.2 ค่าความชัน K จะเป็นค่าคงที่ของการยุบตัว ซึ่งมีในทุกก้อนตัวอย่างและมีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละก้อนตัวอย่าง โดยค่า K นี้จะเป็นตัวชี้วัดหรือเป็นเกณฑ์ที่สำคัญในการประเมินการเกิดการยุบตัวหรือการเกิดร่องล้อของผิวทาง ถ้าค่า K มาก การยุบตัวจะเกิดขึ้นมาก ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่า K ในก้อนตัวอย่าง ได้แก่ ความสูงของก้อนตัวอย่างโดยเฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากก้อนตัวอย่างจะมีความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้นเมื่อถูกน้ำหนักกระทำที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ ปริมาณน้ำหนักที่มากกระทำก็มีผลต่อค่า K เช่นกัน นั่นคือค่า K จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณน้ำหนักที่มากกระทำ
- **ช่วงที่ 3 (Tertiary)** ช่วงนี้เป็นช่วงสุดท้ายของการทดสอบ โดยค่า Accumulated permanent axial strain จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดการยุบตัวอย่างฉับพลัน จนนำไปสู่สถานะแตกเสียหาย ซึ่งมีปัจจัยบางประการที่ทำให้ก้อนตัวอย่างอาจเสียหายได้ก่อนกำหนดคือ ความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม ความเอียงของแผ่นเหล็กที่รองรับน้ำหนักกระทำบนตัวอย่าง และความไม่สม่ำเสมอบนผิวหน้าของตัวอย่าง

Kennedy et al. (1996) ได้กล่าวถึงการบดอัดที่ทำในห้องปฏิบัติการ ก็เพื่อเป็นการจำลองความหนาแน่นของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถรองรับปริมาณจราจรได้จนถึงปริมาณที่ต้องการ แต่ทั้งวิธีมาร์แชลและวิธีฮวีม (Hveem) นั้น ไม่สามารถที่จะจำลองความหนาแน่นของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อก่อสร้างเสร็จใหม่ หรือในสภาพการใช้งานจริงที่ปริมาณจราจรมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ประมาณการไว้ได้ หากปริมาณการจราจรมีมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ประมาณการเอาไว้ก็จะส่งผลให้ปริมาณช่องว่างของอากาศ (Air void) มีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่าที่ประมาณไว้ในห้องปฏิบัติการได้เช่นกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถทราบได้ว่าปริมาณช่องว่างของอากาศที่มีน้อยกว่าหรือมากกว่านี้จะอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ ขณะที่การบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory compactor สามารถประมาณปริมาณช่องว่างของอากาศที่มีอยู่หรือสามารถจำลองความหนาแน่นที่เกิดขึ้นตั้งแต่ก่อสร้างเสร็จจนกระทั่งเมื่อได้รองรับระดับปริมาณการจราจรตามที่ต้องการหรือมากกว่าได้ เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวสามารถบดอัดจนได้ปริมาณช่องว่างของ

อากาศที่น้อยกว่าแบบวิธีมาร์แชลได้ ดังนั้นหากถนนจริงต้องรับปริมาณการจราจรที่น้อยกว่าหรือมากกว่าที่ประมาณไว้แล้ว ก็จะสามารถทราบปริมาณช่องว่างของอากาศได้ว่าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ อีกทั้งการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory compactor ช่วยให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความแปรปรวนที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างในแต่ละก้อนน้อยลง

ชยธันว พรมศร (2542) ได้เสนอว่าการบดอัดส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในวิธีเดิมของมาร์แชลยังมีข้อบกพร่องและขีดจำกัดมากมาย ดังนี้

- การบดอัดโดยใช้การกระแทกของก้อนน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่างนั้นแตกต่างจากลักษณะของการบดอัดผิวทางในสนามด้วยรถบดโดยสิ้นเชิง ส่งผลให้การออกแบบส่วนผสมมีความคลาดเคลื่อนได้
- ความสม่ำเสมอในการบดอัดค่อนข้างต่ำเนื่องจากใช้แรงงานคน จึงมีความคลาดเคลื่อนสูง (Human error)
- มีขีดจำกัดในขนาดของแบบหล่อ (Mold) ทำให้ไม่สามารถออกแบบส่วนผสมโดยใช้วัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ได้
- มีความแปรปรวนของผลการบดอัดค่อนข้างสูง เช่น ความหนาแน่น ปริมาณช่องว่างของอากาศ เป็นต้น

ในอดีตมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและวิศวกรผู้ออกแบบอยู่ในสถานะที่ไม่มีทางเลือก อีกทั้งถนนในอดีตการใช้งานไม่หนักหน่วงเฉกเช่นปัจจุบันทั้งในด้านปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุก ต่อมา มีหน่วยงานทางหลวงของประเทศสหรัฐอเมริกา Strategic Highway Research Program (SHRP) ได้จัดตั้งโครงการขึ้นเพื่อพัฒนาถนนแอสฟัลต์คอนกรีตในแง่ต่าง ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ปัจจุบัน โดยมุ่งเน้นประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ในสนามเป็นหลัก จึงได้ตั้งโครงการ Superior Performing Asphalt Pavements หรือ SUPERPAVE ขึ้น และใช้เครื่องมือ Superpave Gyrotory Compactor (SGC) ในการบดอัดส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเครื่อง SGC จะทำมุมเอียงในการบดอัดเพื่อเลียนแบบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนาม และสามารถทราบข้อมูลความสูงของก้อนตัวอย่างส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในระหว่างทำการบดอัดได้ เพื่อใช้ในการออกแบบและควบคุมคุณภาพของส่วนผสม โดยจะมีข้อกำหนดในเรื่องของความหนาแน่นที่จำนวนรอบต่าง ๆ ซึ่งก้อนตัวอย่างจะต้องมีความหนาแน่นไม่สูงเกินกว่าหรืออยู่ในช่วงที่กำหนด ทำให้ได้ส่วนผสมที่สามารถบดอัดได้อย่างมีคุณภาพ

2.2 สิ่งที่ได้รับจากผลการศึกษาและงานวิจัยในอดีต

จากการศึกษาผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้นำเสนอข้างต้น สามารถสรุปสิ่งที่จะเป็นประโยชน์ต่อแนวทางในการทำการศึกษาดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- การใช้วัสดุโพลีเมอร์ต่าง ๆ เช่น SBS SBR EVA Neoprene รวมไปถึงผงยาง (Powdered rubber / Crumb rubber) ยางล้อรถที่ใช้งานแล้ว (Reclaim tire rubber) และเศษยาง (Scrap rubber) ซึ่งล้วนแล้วแต่มียางธรรมชาติเป็นส่วนผสมอยู่ส่วนหนึ่ง เมื่อนำมาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ทางวิศวกรรมของวัสดุได้ทั้งในส่วนที่เป็นวัสดุผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์และส่วนที่เป็นวัสดุส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- จากการศึกษาพบว่า การผสมยางธรรมชาติกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการผสมซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติของวัสดุส่วนผสม รวมถึงการจัดเก็บส่วนผสมดังกล่าวเพื่อใช้งานต่อไป
- จากรายงานผลการทดลองต่าง ๆ สรุปได้ว่า วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของน้ำยางมีประสิทธิภาพดีที่สุดและราคาถูกที่สุด รองลงมาคือยางที่ไม่ผ่านการคงรูป (Unvulcanised powder rubber) และยางชนิดอื่น ๆ
- จากการพิจารณายางธรรมชาติที่ผลิตภายในประเทศ ก่อนที่จะมีการแปรรูปเป็นยางประเภทต่าง ๆ เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ ยางแผ่นดิบ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง และยางเครพ เป็นต้น มักจะเก็บยางในรูปของน้ำยาง เช่น น้ำยางสดที่ได้จากการกรีดต้นยางพารา หรือน้ำยางข้นที่เติมสารเคมีบางชนิดลงไปในน้ำยางสดเพื่อรักษาสภาพน้ำยาง ดังนั้น จึงพิจารณาศึกษาถึงการนำยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของน้ำยางมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มเติมโดยเฉพาะน้ำยางข้น เนื่องจากมีปริมาณเนื้อยางแห้งมากกว่าน้ำยางสด อีกทั้งสามารถจัดเก็บวัตถุดิบได้นานกว่า และในขณะที่ทำการผสมจะเกิดฟองน้อยกว่าน้ำยางสดเพราะมีปริมาณน้ำในน้ำยางน้อยกว่า ช่วยเพิ่มความปลอดภัยและง่ายต่อการผสม นอกจากนี้หากใช้ยางที่ผ่านการแปรรูปแล้วจะทำให้มีต้นทุนสูงขึ้นและเมื่อต้องการนำมาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนสภาพให้มีลักษณะเป็นของเหลวเพื่อที่สามารถผสมให้เข้ากันได้ดีขึ้น ทำให้เกิดความยุ่งยากมากขึ้น
- พิจารณาความเหมาะสมในการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางธรรมชาติ ณ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยการใช้เครื่อง Dynamic Shear Rheometer (DSR) และการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ยางธรรมชาติเป็นส่วนผสมด้วยเครื่องมือ

Indirect Tensile Test (IDT) ที่ใช้ทดสอบแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว และความล้ม รวมถึงการใช้เครื่องมือในการทดสอบการยุบตัวแบบถาวรด้วยเครื่อง Uniaxial load test นอกจากนี้ ยังพิจารณาความเหมาะสมในการบดอัดก้อนตัวอย่างด้วยเครื่อง Gyrotory compactor ซึ่งทำให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีลักษณะการบดอัดที่ใกล้เคียงกับในสนามจริง มีความแปรปรวนของก้อนตัวอย่างน้อยกว่าการบดอัดด้วยวิธีของมาร์แชล มีความสะดวก รวดเร็วและง่ายต่อการใช้งาน

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้ได้นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ได้แก่ นิยามและลักษณะสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานทาง ข้อกำหนด เครื่องมือและลักษณะการทดสอบต่าง ๆ เป็นต้น

2.3.1 แอสฟัลต์ (Asphalt)

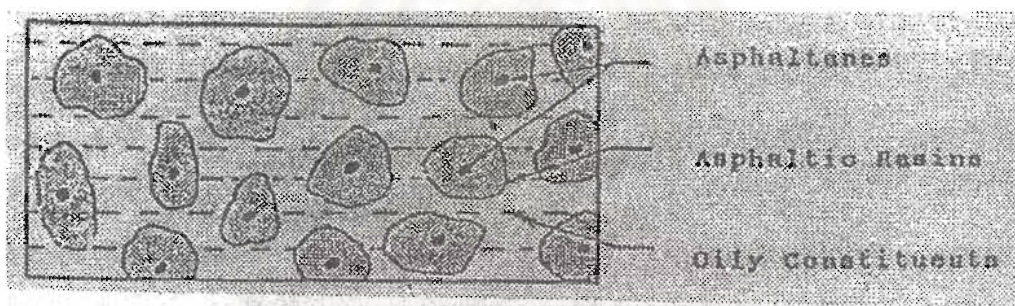
แอสฟัลต์ คือ วัสดุเชื่อมประสาน (Binder) สีนํ้าตาลเข้มถึงดำ มีบิทูเมน (Bitumen) เป็นส่วนประกอบหลัก เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ บิทูเมนเป็นสารที่ประกอบด้วยโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300-5,000 หน่วย มีคุณสมบัติยึดประสาน มีสภาพเป็นของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือเหนียวหนืด มีสีดำหรือค่อนข้างดำ สามารถละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) และนอกจากโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนแล้ว แอสฟัลต์ยังมีองค์ประกอบของธาตุอื่นอีกที่รวมเรียกว่า Heteroatom เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และนิกเกิล สัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามแหล่งของน้ำมันดิบ ดังนั้นคุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์จึงแตกต่างกันเช่นเดียวกัน แอสฟัลต์สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือได้จากการผลิต แอสฟัลต์จึงจัดเป็นวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งมีลักษณะค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิปกติ เมื่อให้ความร้อนจะมีลักษณะอ่อนและไหลได้ จึงเรียกคุณสมบัติแบบนี้ว่า Thermoplastic properties และเมื่อนำมาผสมกับมวลรวมที่สถานะของเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง จะมีลักษณะแข็งและยึดมวลรวมไว้ด้วยกัน เกิดเป็นชั้นผิวจราจรของผิวทาง ดังนั้น จึงนิยมใช้แอสฟัลต์เป็นวัสดุผิวทาง

2.3.1.1 แบบจำลององค์ประกอบโมเลกุลของวัสดุแอสฟัลต์

ปัจจุบันมีแบบจำลองที่ใช้อธิบายองค์ประกอบโมเลกุลของแอสฟัลต์อยู่ 2 แบบจำลอง โดยแบบจำลองแรกเป็นแบบจำลองที่เรียกว่า แบบจำลอง Micellar ซึ่งเข้าใจกันว่าเมื่อวิเคราะห์ทางกายภาพแล้ว แอสฟัลต์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ Asphaltenes Asphaltic Rasins และ Oily Constituents ทำให้แบบจำลองนี้ได้รับการยอมรับในการใช้อธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์มาเป็นเวลานาน จนกระทั่งคณะวิจัยของ Strategic Highway Research Program (SHRP) ของรัฐบาลกลางอเมริกันได้ทำการวิจัยจนพบแบบจำลองที่สามารถเข้าใจและอธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์ได้ชัดเจนมากขึ้น เรียกแบบจำลองนี้ว่าแบบจำลอง SHRP

2.3.1.1.1 แบบจำลอง Micellar

แบบจำลองนี้ได้อธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์ว่าประกอบขึ้นจากส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ Asphaltenes Asphaltic Rasins และ Oily Constituents ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 องค์ประกอบโครงสร้างของวัสดุแอสฟัลต์

- *Asphaltenes* เป็นผงสีน้ำตาลเกือบดำ สลายตัวเมื่อถูกความร้อน สามารถติดไฟได้ทันที เมื่อได้รับความร้อนสูงมาก ไม่ละลายใน *n*-Heptane มีอัตราส่วน C : H มากกว่า 0.8
- *Asphaltic Rasins* เป็นของแข็งสีน้ำตาลแก่ มีลักษณะแข็งและเปราะที่อุณหภูมิต่ำ สามารถบดให้ละเอียดได้ จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ละลายได้เมื่ออุณหภูมิสูง ประมาณ 93 องศาเซลเซียส และยังสามารถละลายได้ใน *n*-Heptane มีอัตราส่วน C : H ระหว่าง 0.6-0.8
- *Oily Constituents* เป็นส่วนที่เหลือจากการแยก Asphaltenes และ Asphalt Rasins ออกจากกันแล้ว มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลแก่หรือน้ำตาลแกมแดง มีอัตราส่วน C : H น้อยกว่า 0.6

Asphaltenes จะเป็นส่วนประกอบหลักของแอสฟัลต์ทุกชนิด อยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Colloid) และกระจายอยู่ใน Oily Constituents ซึ่งเป็นตัวกลางโดยมี Asphaltic Rasins เป็นตัวช่วยป้องกันไม่ให้ Asphaltenes จับตัวเป็นก้อน ดังนั้น จึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติด้านการยึดเกาะ (Adhesion) และการยืดตัว (Ductility) สำหรับส่วนประกอบของ Oily Constituents นั้น จะมีผลต่อความแข็งหรืออ่อนของแอสฟัลต์ ดังนั้น จึงเป็นตัวที่กำหนดความหนืด (Viscosity) และการไหล (Flow) ของแอสฟัลต์ โดยทั่วไปวัสดุแอสฟัลต์จะมีคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้ ค่าความหนาแน่น (Density) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 1.01-1.04 g/cm³ และค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.95-1.05

2.3.1.1.2 แบบจำลอง SHRP

แบบจำลองใหม่นี้ ได้เสนอว่าแอสฟัลต์ประกอบขึ้นด้วยส่วนผสมที่กลมกลืนกันของหลายโมเลกุลที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจแยกได้เป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ โมเลกุลที่มีขั้วและโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว โมเลกุลที่ไม่มีขั้วนี้จะทำหน้าที่เป็นโครงยึดเกาะโมเลกุลที่มีขั้ว โดยที่โครงข่ายของโมเลกุลที่มีขั้วนั้น จะยึดกันอยู่อย่างไม่แข็งแรงทำให้วัสดุแอสฟัลต์มีคุณลักษณะของการยืดหยุ่น (Elastic properties) โมเลกุลที่มีขั้วจะกระจายอยู่ทั่วไปในแอสฟัลต์ ซึ่งเมื่อถูกทำให้ร้อน แรงยึดเกาะที่อ่อนแออยู่แล้วจะถูกทำลายลง ทำให้แอสฟัลต์มีสภาพเป็นของไหล ณ ที่อุณหภูมิสูง แอสฟัลต์ที่ดี ต้องมีการถ่วงดุลที่เหมาะสมระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลที่แท้จริงของโมเลกุลที่ไม่มีขั้วยังมีความสำคัญต่อพฤติกรรมของวัสดุแอสฟัลต์ โดยเฉพาะคุณภาพที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับแอสฟัลต์ที่มีโมเลกุลที่มีขั้วมากเกินไปจะมีลักษณะที่แข็งเปราะง่าย จึงมักเกิดปัญหาการแตกร้าว ในขณะที่เดียวกันหากแอสฟัลต์มีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วมากเกินไปหรือมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกินไป ก็จะทำให้เกิดปัญหาการอ่อนตัวของแอสฟัลต์หรือนำไปสู่ปัญหาการเกิดร่องล้อ (Rutting) บนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ปัจจุบันมีการนำแอสฟัลต์ไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติที่สำคัญ ๆ อยู่ 6 ประการ

- สมบัติในการยึดและประสาน (Cementing)
- สมบัติการป้องกันการซึมของน้ำ (Water proofing)
- สมบัติที่เปลี่ยนเป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อถูกความเย็น (Thermoplastic)
- สมบัติในการคงทนต่อสภาวะแวดล้อม (Durability) เช่น กรดและด่างอ่อน ๆ

- สมบัติด้านการเป็นฉนวน (Non-Conducting)
- สมบัติด้านการยืดหยุ่น (Elasticity)

จากสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำแอสฟัลต์มาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย โดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นตัวประสานหรือยึดเกาะวัสดุต่าง ๆ ในการทำผิวทาง นอกจากนี้ ยังใช้แอสฟัลต์ในการลาดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ผิวหน้าเขื่อนดินเพื่อป้องกันน้ำซึม และยังใช้ในวงการอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ทำสีกันสนิม กระจกกันซึม กระจกเบี่ยงรูปพื้น เคลือบภายในท่อน้ำ เป็นต้น

2.3.1.2 ชนิดของแอสฟัลต์

แอสฟัลต์สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้ 2 ชนิด คือ

2.3.1.2.1 แอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ พบตามแหล่งต่าง ๆ ที่มีลักษณะเป็นบึง เนื่องจากน้ำมันดิบตามธรรมชาติได้ผิวโลกถูกกระทำภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์และลม ยังผลให้ส่วนประกอบที่เป็นก๊าซหรือน้ำมันระเหยง่าย แยกตัวออกไปเหลือเพียงแอสฟัลต์รวมตัวอยู่ด้วยกัน โดยอาจแทรกอยู่ในชั้นหิน เรียกว่า Rock asphalt ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินปูนที่มีแอสฟัลต์ซึมอยู่อัดตัว

2.3.1.2.2 แอสฟัลต์ที่เกิดจากการผลิต เป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ (Residual materials) หรือที่เรียกว่า Topped crude ซึ่งยังมีลักษณะค่อนข้างเหลว เนื่องจากยังมีส่วนที่เป็นน้ำมันต่าง ๆ เหลืออยู่ โดยเมื่อแยกน้ำมันออกไปจะได้แอสฟัลต์ที่มีความข้นเหลวหรือความแข็งมากน้อยตามความต้องการ

2.3.2 ประเภทของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง

2.3.2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นสารหรือผลิตภัณฑ์พื้นฐานหลักที่เหลือ (Residual product) จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบเนื่องจากไม่ระเหย มีลักษณะกึ่งอ่อนกึ่งแข็งที่อุณหภูมิปกติ มีสีดำหรือสีน้ำตาลปนดำ ในการนำไปใช้งานจะต้องต้มให้เหลวโดยใช้อุณหภูมิ 100-150 องศาเซลเซียส

- สมบัติด้านการเป็นฉนวน (Non-Conducting)
- สมบัติด้านการยืดหยุ่น (Elasticity)

จากสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำแอสฟัลต์มาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย โดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นตัวประสานหรือยึดเกาะวัสดุต่าง ๆ ในการทำผิวทาง นอกจากนี้ ยังใช้แอสฟัลต์ในการลาดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ผิวหน้าเขื่อนดินเพื่อป้องกันน้ำซึม และยังใช้ในวงการอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ทำสีกันสนิม กระจกกันซึม กระจกเบี่ยงฟูพื้น เคลือบภายในท่อน้ำ เป็นต้น

2.3.1.2 ชนิดของแอสฟัลต์

แอสฟัลต์สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้ 2 ชนิด คือ

2.3.1.2.1 แอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ พบตามแหล่งต่าง ๆ ที่มีลักษณะเป็นบึง เนื่องจากน้ำมันดิบตามธรรมชาติได้ผิวโลกถูกกระทำภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์และลม ยังผลให้ส่วนประกอบที่เป็นก๊าซหรือน้ำมันระเหยง่าย แยกตัวออกไปเหลือเพียงแอสฟัลต์รวมตัวอยู่ด้วยกัน โดยอาจแทรกอยู่ในชั้นหิน เรียกว่า Rock asphalt ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินปูนที่มีแอสฟัลต์ซึมอยู่ในตัว

2.3.1.2.2 แอสฟัลต์ที่เกิดจากการผลิต เป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ (Residual materials) หรือที่เรียกว่า Topped crude ซึ่งยังมีลักษณะค่อนข้างเหลว เนื่องจากยังมีส่วนที่เป็นน้ำมันต่าง ๆ เหลืออยู่ โดยเมื่อแยกน้ำมันออกไปจะได้แอสฟัลต์ที่มีความข้นเหลวหรือความแข็งมากน้อยตามความต้องการ

2.3.2 ประเภทของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง

2.3.2.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นสารหรือผลิตภัณฑ์พื้นฐานหลักที่เหลือ (Residual product) จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบเนื่องจากไม่ระเหย มีลักษณะกึ่งอ่อนกึ่งแข็งที่อุณหภูมิปกติ มีสีดำหรือสีน้ำตาลปนดำ ในการนำไปใช้งานจะต้องต้มให้เหลวโดยใช้อุณหภูมิ 100–150 องศาเซลเซียส

แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถแบ่งเกรดต่าง ๆ ได้ 3 ชนิด ตามผู้ผลิต คือ

2.3.2.1.1 Penetration Grade เป็นแอสฟัลต์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง ซึ่งมีเกรดมาตรฐาน 5 เกรด ได้แก่ 40-50 60-70 80-100 120-150 และ 200-300 เพื่อให้สามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมกับงานและสภาพดินฟ้าอากาศของแต่ละพื้นที่ เช่น ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนควรใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เกรดค่อนข้างต่ำ คือ 60-70 แต่สำหรับประเทศในเขตนหนาวอาจต้องใช้ถึงเกรด 120-150 หรือสูงกว่าในประเทศไทย กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทนี้ไว้ใน ทล.-ก 401/2531 ตาม มอก. 851-2542 ค่า Penetration ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ คือ จำนวนหน่วยของระยะ (1 หน่วย = 0.1 มิลลิเมตร) ที่เข็มมาตรฐานซึ่งถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัม จมลงในแอสฟัลต์เป็นเวลา 5 วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น เข็มจมลงไป 10 มิลลิเมตร ค่า Penetration = $10/0.1 = 100$

2.3.2.1.2 Blown Grade เป็นการนำแอสฟัลต์ชนิด Penetration Grade ไปเป่าลมใส่ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 250-300 องศาเซลเซียส ซึ่งทำให้สมบัติทางด้านความแข็งและการทนความร้อนของแอสฟัลต์ดีขึ้น เนื่องจากสัดส่วนของ Asphaltenes ในเนื้อแอสฟัลต์สูงขึ้น เหมาะกับการนำไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ R.85/25 R.85/40 R.115/15 R.135/10 และ R.155/7 เช่น R.85/25 จะหมายถึงถึง

- R คือ Rubbery หมายถึง มีสมบัติบางส่วนใกล้เคียงกับยางสังเคราะห์หรือยางธรรมชาติ
- 85 คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของจุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์ (Average softening point) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส วัดโดยใช้เครื่องมือ Ring and Ball Test (แอสฟัลต์ชนิดนี้จะมีค่าจุดอ่อนตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส)
- 25 คือ ค่า Penetration

2.3.2.1.3 Hard Grade เป็นการนำแอสฟัลต์ชนิด Penetration Grade ไปกลั่นต่อภายใต้สูญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้ได้แอสฟัลต์ที่มีความแข็งมากขึ้น เช่น H 80/90 จะหมายถึงถึง

H คือ Hard

80/90 คือ ค่าจุดอ่อนตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส แต่ค่า Penetration ของแอสฟัลต์ชนิดนี้ไม่ได้แสดงไว้ โดยจะอยู่ในช่วง 6 - 12 เท่านั้น

ในการทำผิวทางจะต้องทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในสภาพของเหลวด้วยความร้อน จากนั้นจึงผสมกับวัสดุมวลรวมต่าง ๆ ก่อนการบดอัด เมื่อปล่อยให้เย็นลงแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเคลือบวัสดุมวลรวมและจับตัวเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดความแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักการจราจรได้

2.3.2.2 แอสฟัลต์ชนิดเหลว (Liquid asphalt)

2.3.2.2.1 **คัตแบคแอสฟัลต์ (Cutback asphalt)** เป็นการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ไปละลายในตัวทำละลาย (Solvents) ซึ่งได้แก่น้ำมันต่าง ๆ เช่น Neptha (Gasoline) Kerosine และ Diesel oil น้ำมันที่ใช้เป็นสารละลายนี้เรียกรวมกันว่า Dituent หรือ Culter stock แอสฟัลต์ชนิดนี้มีลักษณะเหลวที่อุณหภูมิธรรมดา แต่จะข้นหรือเหนียวขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และ Culter stock ตลอดจนสัดส่วนระหว่างแอสฟัลต์กับ Culter stock การใช้งานแอสฟัลต์ชนิดนี้เมื่อบดอัดแล้วจะปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยไป เหลือเพียงแต่แอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่ประสานวัสดุมวลรวมเข้าด้วยกัน กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของคัตแบคแอสฟัลต์ไว้ตามมาตรฐาน ทล.-ก. 402/2531 และ ทล.-ก. 403/2531 โดยคัตแบคแอสฟัลต์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามชนิดตัวทำละลาย คือ

- **ชนิดแข็งตัวเร็ว (Rapid Curing : RC)** ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลายที่ระเหยเร็ว ได้แก่ Neptha (Gasoline) แอสฟัลต์ชนิดนี้จะแข็งตัวเร็ว ส่วนมากใช้กับงาน Surface treatment
- **ชนิดแข็งตัวเร็วปานกลาง (Medium Curing : MC)** ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลายที่ระเหยเร็วปานกลาง ได้แก่ Kerosine จะมีการแข็งตัวช้ากว่าชนิด RC การใช้งานต้องใช้เวลาในการบ่มตัวนาน (Curing) ส่วนมากใช้กับงาน Prime coat และ Tack coat เพื่อให้ MC มีโอกาสซึมลงไปได้ผิว Base course ได้มากขึ้น
- **ชนิดแข็งตัวช้า (Slow Curing : SC)** ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับน้ำมันที่ระเหยช้า ได้แก่ Diesel fuel oil หรืออาจผลิตได้จากการกลั่นโดยตรง มักนิยมเรียกว่า Road oils ส่วนมากใช้ทำ Road mix หรือใช้ในงานซ่อม (Patching) แต่ไม่นิยมใช้ในประเทศไทย

2.3.2.2.2 **อิมัลชันแอสฟัลต์ (Emulsion asphalt)** คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ (Colloidal particles) กระจายอยู่ในน้ำที่มี Emulsifier ผสมอยู่เล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.25 – 2 โดยน้ำหนัก อิมัลชันแอสฟัลต์ผลิตได้โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสผสมกับน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส โดยมีสารเคมี

ที่ช่วยในการให้อนุภาคของแอสฟัลต์กระจายตัวซึ่งเรียกว่า Emulsifier ผสมอยู่ในน้ำและแอสฟัลต์จะถูกตีด้วยเครื่อง Colloidal mill ทำให้แอสฟัลต์แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ ในอิมัลชันแอสฟัลต์จะมีแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณ 55 – 70% ที่เหลือจะเป็นน้ำทั้งหมด

Emulsifier เป็นตัวกำหนดสมบัติของอิมัลชันแอสฟัลต์ตามชนิดของประจุ คือ ชนิดประจุไฟฟ้าลบ (Anionic) ชนิดประจุไฟฟ้าบวก (Cationic) และชนิดที่เป็นกลาง (Nonionic) แต่ในการก่อสร้างจะใช้ชนิดประจุไฟฟ้าบวกและประจุไฟฟ้าลบ ส่วนในงานสร้างถนนนิยมใช้ Cationic emulsified asphalt มากกว่า Anionic emulsified asphalt เนื่องจากหินที่ใช้ในการก่อสร้างมีผิวที่เป็นประจุลบ ซึ่งตรงข้ามกับ Asphalt particle ของ Cationic emulsified asphalt ดังนั้นแอสฟัลต์ชนิดนี้มักนำไปใช้ในงานประเภท Penetration Macadam Surface treatment Prime coat Tack coat และ Seal coat เป็นต้น เนื่องจากแอสฟัลต์ชนิดนี้ มีน้ำเป็นส่วนผสม จึงสามารถนำไปใช้งานโดยผสมกับส่วนอื่นที่เป็นน้ำได้และยังสามารถทำงานในขณะที่ยังสดอยู่ ๆ เปียกน้ำได้ Anionic emulsified asphalt จะใช้ Emulsifier จำพวก Fatty acid ซึ่งทำให้อนุภาคแอสฟัลต์แสดงประจุไฟฟ้าเป็นลบ ส่วน Cationic emulsified asphalt จะใช้ Emulsifier จำพวก Fatty amines ซึ่งทำให้อนุภาคแอสฟัลต์แสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของ Cationic asphalt emulsion ไว้ในข้อกำหนด ทล.-ก. 404/2531 ตาม มอก. 371-2530 อัตราการแข็งตัวหรือการแตกตัวของ Emulsion จะขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของสารที่ใช้ ซึ่งมีอยู่ 3 ระดับ ของทั้ง 2 ชนิดประจุ คือ

- ชนิดก่อตัวเร็ว (Rapid setting , RS และ CRS)
- ชนิดก่อตัวปานกลาง (Medium setting , MS และ CMS)
- ชนิดก่อตัวช้า (Slow setting , SS และ CSS)

อักษร C ข้างหน้าของแต่ละชนิด หมายถึง ประเภท Cationic ถ้าไม่มีอักษร C หมายถึง ประเภท Anionic

2.3.3 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง วัสดุผิวทางที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวม ผสมกันในขณะร้อนด้วยอุณหภูมิสูงในเครื่องผสม จากนั้นจึงนำไปปูลาดทำเป็นผิวทางถนนในขณะที่ส่วนผสมยังคงร้อนอยู่แล้วบดอัดให้แน่นและเรียบเป็นถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีผิวทางคุณภาพดี แข็งแรง สึก่อนข้างดำ รองรับปริมาณการจราจรที่หนาแน่นมาก ๆ ได้ จึงเป็นที่รู้จักกันในชื่อของ แบล็กท็อป (Blacktop) หรือส่วนผสมร้อน (Hot mix) ดังนั้นแอสฟัลต์คอนกรีตจึงมัก

นิยมใช้สำหรับถนนลาดยางคุณภาพดีทั่ว ๆ ไป รวมถึงลานจอดรถขนาดใหญ่ แต่จะไม่นิยมนำไปใช้สร้างถนนในชนบทหรือถนนที่มีปริมาณการจราจรเบาบางมาก เนื่องจากไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในการก่อสร้าง ถนนลาดยางประเภทผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนี้จัดเป็นถนนที่มีความปลอดภัย มีเสถียรภาพและทนทานดี คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวม ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของส่วนผสม ตลอดจนสัดส่วนที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมและกระบวนการในการผลิตส่วนผสม

ในแอสฟัลต์คอนกรีต จะมีปริมาณสัมพัทธ์ระหว่างมวลรวม แอสฟัลต์ และอากาศ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต แอสฟัลต์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคมวลรวมจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานอนุภาคมวลรวมให้เกาะติดกันแน่นไม่หลุดลอกง่าย จึงเรียกว่าแอสฟัลต์ประสิทธิผล (Effective asphalt) ซึ่งมีแอสฟัลต์บางส่วนถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวมและช่องว่างอากาศ (Air void) ที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่ โดยทั่วไปปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมนี้จะมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวมชนิดนั้นได้ประมาณร้อยละ 50

องค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

2.3.3.1 ความหนาแน่น (Density) ของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง มวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากพอจะทำให้มีอายุการใช้งานนานและมีคุณภาพดี โดยทั่วไปการบดอัดด้วยรถบดในสนามจะได้ความหนาแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นที่ออกแบบไว้ซึ่งถูกบดอัดด้วยเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นต่ำสุดที่ต้องบดอัดให้ได้ในสนามจะกำหนดให้เป็นค่าร้อยละของความหนาแน่นที่ทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ กรมทางหลวงจึงได้กำหนดการบดอัดต้องให้ได้ความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของความหนาแน่นที่ทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ

2.3.3.2 ช่องว่างอากาศ (Air Void : AV) ของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง ช่องว่างเล็ก ๆ ที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการบดอัดแล้วจะต้องมีปริมาณช่องว่างอากาศเพียงพอ หลังจากที่เปิดใช้การจราจรแล้ว ยานพาหนะที่แล่นบนผิวทางจะทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแน่นขึ้นกว่าเดิม จึงมีปริมาณช่องว่างอากาศลดลง ดังนั้นถ้าปริมาณช่องว่างอากาศที่ก่อสร้างเสร็จใหม่มีไม่เพียงพอ จะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาบนผิวหน้าของถนน นอกจากนี้ ช่องว่างอากาศยังเป็นที่รองรับแอสฟัลต์ที่ขยายตัวเมื่ออากาศ

ร้อนอีกด้วย สำหรับผิวทางชั้นบนสุดจะออกแบบให้มีปริมาณช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 3 - 5 ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักของยานพาหนะที่แล่นบนผิวทาง ส่วนผิวทางชั้นล่างลงมา อาจออกแบบให้มีปริมาณช่องว่างอากาศได้มากถึงร้อยละ 4 - 7 เป็นต้น

ปริมาณช่องว่างอากาศมีผลต่อความทนทานของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ถ้าปริมาณช่องว่างอากาศน้อย น้ำและอากาศก็มีโอกาสซึมผ่านเข้าไปทำลายการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้น้อย ทำให้ผิวทางมีอายุการใช้งานนานขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าปริมาณช่องว่างอากาศมีน้อยเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาบนผิวหน้าของถนนได้ และที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ผิวทางมีแอสฟัลต์ไหลเยิ้ม (Bleeding) และเกิดการยุบแบบตัวถาวร (Permanent deformation) หรือเกิดร่องล้อ (Rutting) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ขณะถ้าปริมาณช่องว่างอากาศมากเกินไปก็ทำให้ น้ำและอากาศมีโอกาสน้ำซึมผ่านเข้าไปทำลายการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ได้มากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างน้ำกับอากาศ จะทำให้วัสดุแอสฟัลต์เกิดการแข็งตัวเมื่อผ่านการใช้งาน (Aging) ระยะเวลาหนึ่ง ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีสภาพแข็งเปราะและเกิดการแตกร้าวได้ ยิ่งเมื่อได้รับน้ำหนักบรรทุกในลักษณะซ้ำซากก็เกิดการเสียหายในลักษณะของการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) ดังนั้น ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณจราจรที่ออกแบบไว้จะต้องมีปริมาณช่องว่างอากาศไม่น้อยกว่าร้อยละ 3 และไม่มากเกินไปกว่าร้อยละ 5 ซึ่งโดยทั่วไป จะพิจารณาค่ากลางของปริมาณช่องว่างอากาศ คือร้อยละ 4 ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ดังนั้น ความหนาแน่นและปริมาณช่องว่างอากาศจึงมีความสัมพันธ์กัน ถ้าความหนาแน่นมากปริมาณช่องว่างอากาศจะน้อย การกำหนดค่าความหนาแน่นต่ำสุดของผิวทางจะต้องคำนึงถึงปริมาณช่องว่างอากาศด้วย โดยปกติผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดเสร็จใหม่ มักจะกำหนดค่าความหนาแน่นต่ำสุดให้มีปริมาณช่องว่างอากาศน้อยกว่าร้อยละ 8

2.3.3.3 ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate :

VMA) หมายถึง ปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งรวมทั้งช่องว่างที่ถูกแอสฟัลต์แทนที่ด้วย (Voids Filled with Asphalt : VFA) ดังนั้น ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมจึงเป็นปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์รวมกับปริมาณช่องว่างอากาศ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า $VMA = VFA + AV$ สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากัน แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA สูงกว่าจะมีความทนทานต่อการใช้งานนานกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA ต่ำกว่า

เนื่องจากมวลรวมที่มีค่า VMA สูงกว่า ย่อมมีปริมาตรช่องว่างสำหรับใส่แอสฟัลต์ได้มากกว่า ทำให้ได้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มผิวอนุภาคของมวลรวมหนากว่า แอสฟัลต์คอนกรีตจึงมีความทนทานและมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น (Aging resistance) ถึงแม้ส่วนผสมที่มีค่า VMA น้อยกว่าข้อกำหนด จะทำให้ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ผสมน้อยลง เป็นการประหยัดแต่จะทำให้ได้ผิวทางที่มีความคงทนลดลง

2.3.3.4 ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt content) ในแอสฟัลต์คอนกรีตมีผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นอย่างมาก ดังนั้น ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้จะต้องถูกต้องและแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการผสมในห้องปฏิบัติการหรือที่โรงผสมในสนาม ข้อกำหนดต่าง ๆ เกี่ยวกับคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการในการออกแบบจะเป็นตัวกำหนดปริมาณแอสฟัลต์ที่ต้องใช้ในส่วนผสม

ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ ขนาดคละและคุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ มวลรวมที่มีขนาดคละซึ่งประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กจะต้องการแอสฟัลต์สำหรับผสมมากกว่ามวลรวมที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ เหตุผลคือ เมื่อปริมาตรเท่ากันมวลรวมที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จึงต้องใช้แอสฟัลต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวอนุภาคของมวลรวม มวลรวมที่ดูดซึมแอสฟัลต์มากทำให้ต้องใช้แอสฟัลต์ผสมมากเพื่อชดเชยส่วนที่ถูกดูดซึมไป

2.3.3.5 เสถียรภาพและการไหล (Stability and Flow) ค่าเสถียรภาพ หมายถึงความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรได้โดยไม่เกิดร่องล้อหรือเป็นคลื่น หรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผิดไปจากเดิม (Deformation) เป็นค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดโดยทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าการไหล เป็นการวัดค่าการเคลื่อนที่หรือหน่วยการยวบตัว (Strain) โดยวัดจากระยะทางที่แอสฟัลต์คอนกรีตยุบตัวลงขณะที่ไม่มีแรงกระทำกับขณะที่มีแรงกระทำสูงสุดของเสถียรภาพ ความมีเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในและแรงยึดประสานระหว่างอนุภาคของมวลรวม ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของมวลรวมเกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันเมื่อมีน้ำหนักของยานพาหนะมากระทำ

โดยทั่วไป มวลรวมที่รูปร่างและอนุภาคเป็นเม็ดเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพสูง แรงยึดเกาะจะมีค่ามากหากแอสฟัลต์ที่ใช้มีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์จนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบอนุภาคของมวลรวมหนาเกินไป เป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมมีค่าลดลง จึงทำให้เสถียรภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้น ในการออกแบบส่วนผสมจะต้องออกแบบให้มีเสถียรภาพสูงพอที่จะรับน้ำหนักการจราจรได้ อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงว่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไปจนขาดความยืดหยุ่น อาจทำให้ผิวทางเกิดความเสียหายได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แอสฟัลต์คอนกรีตปูลงบนผิวทางเดิมที่มีการแอ่นตัวสูง

ปัจจุบัน การสร้างถนนแอสฟัลต์ส่วนใหญ่มักเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense grade mixtures และแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดเกรด 60-70 ในสัดส่วนปริมาณ 3 - 8% โดยน้ำหนักของมวลรวม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของงาน ดังนั้น การเตรียมการก่อสร้างผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตจะกระทำดังนี้

- ชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และไหล่ทางต้องเรียบสม่ำเสมอได้มาตรฐาน
- ทำ Prime coat หรือในบางกรณีอาจจำเป็นต้องทำ Tack coat
- มวลรวมก่อนผสมต้องทำให้ร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 163 ± 8 องศาเซลเซียส และมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของมวลรวม
- แอสฟัลต์ซีเมนต์ขณะจัดเก็บในถังเก็บจะต้องมีอุณหภูมิไม่สูงเกิน 100 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมกับมวลรวมต้องทำให้ร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 159 ± 8 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความหนืดคิเนเมติก 170 ± 20 เซนติสโตกส์
- เมื่อผสมเสร็จแล้วก่อนนำออกจากโรงงานผสมไปใช้ จะต้องมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 121-168 องศาเซลเซียส
- ในการเทลาดถนนอุณหภูมิจะต้องไม่ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความหนืดคิเนเมติก 280 ± 30 เซนติสโตกส์ แล้วทำการบดอัดทันที
- อื่น ๆ ให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ทล.-ม 408/2532 ของกรมทางหลวง

2.3.4 มวลรวม (Aggregates)

มวลรวมที่ใช้สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต สามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิด คือ

2.3.4.1 **มวลรวมหยาบ** คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4

2.3.4.2 **มวลรวมละเอียด** คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.075 - 4.75 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 เช่น หินฝุ่นหรือทราย

2.3.4.3 **วัสดุผสมแทรก** คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ซึ่งเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเติมส่วนละเอียดให้มากขึ้น ส่วนละเอียดนี้เป็นส่วนสำคัญในการผลิตวัสดุผสมที่แข็งแรงและมีเกรดแน่น (Dense grade) โดยทั่วไป ทรายธรรมชาติจะมีส่วนละเอียดที่ต้องการนี้ในปริมาณน้อย วัสดุผสมแทรกอาจเป็น Stone dust Portland cement Silica cement Hydrated lime และอื่น ๆ ตามที่ข้อกำหนด ทล.-ท.205/2517 ของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ขนาดคละของวัสดุผสมแทรก

ขนาดตะแกรง (มิลลิเมตร)	ปริมาณผ่านตะแกรงร้อยละโดยมวล (% Passing)
0.600 (เบอร์ 30)	100
0.300 (เบอร์ 50)	75 - 100
0.075 (เบอร์ 200)	55 - 100

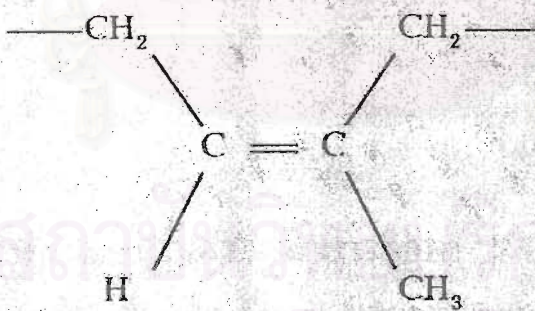
คุณสมบัติของวัสดุมวลรวมที่มีคุณภาพดีจะต้องมีลักษณะดังนี้

- **ขนาดคละดี** เพื่อให้ส่วนผสมแน่น หากมีความจำเป็นอาจใช้วัสดุผสมแทรกไปด้วย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่ส่วนผสม
- **แข็ง** เพื่อด้านทานการสึกหรอและการขัดสีจากการจราจร
- **คงทน** เพื่อด้านทานการแตกร้าวจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- **ผิวขรุขระหยาบ** เพื่อให้มีแรงเสียดทานมากขึ้นและมีผิวหน้าที่ยึดเกาะกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดีขึ้น

- **รูปร่างลูกบาศก์** เนื่องจากอนุภาครูปร่างแบนยาวมีโอกาสแตกได้ง่าย
- **เกลียดน้ำ** หรือที่เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก มวลรวมจำพวกซิลิกา เช่น ควอตซ์ เป็นพวกชอบน้ำ ที่เรียกว่า ไฮโดรฟิลิก หมายถึง ยึดเกาะกับน้ำได้ดีกว่ายึดเกาะกับแอสฟัลต์เนื่องจากประจุที่อยู่ผิวหน้าของอนุภาคมวลรวม ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการหลุดลอกของแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวอนุภาคของมวลรวมที่มีน้ำห่อหุ้มอยู่
- **ปราศจากสารที่เป็นอันตราย** วัสดุจำพวกอนุภาคของดินเหนียว ผุ่น สิ่งสกปรก และ ส่วนที่มีน้ำหนักเบา อาจทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวอนุภาคของมวลรวมมีคุณภาพต่ำลงหรืออาจทำให้อนุภาคบางอนุภาคเกิดการแตกได้

2.3.5 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

ยางธรรมชาติ เป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000,000 เป็นสารประกอบโพลิเมอร์ประเภทไฮโดรคาร์บอน มีชื่อโครงสร้างทางเคมีว่า cis 1, 4 polyisoprene และมีสูตร C_5H_8 นั่นคือเกิดจากการต่อกันหลาย ๆ หน่วยโมเลกุลของ Isoprene ซึ่งต่อแบบปลายต่อปลายประมาณ 5,000 หน่วยขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยอนุภาคของเนื้อยางมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมหรือรูปลูกแพรขนาดขนาด 0.01 – 5 ไมโครมิเตอร์ กระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (Aqueous medium)



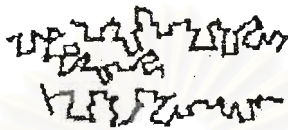
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ แบบ cis 1, 4 polyisoprene

คุณสมบัติเด่นของยางคือ มีความยืดหยุ่น สามารถถูกยืดให้ยาวออกได้ตามแรงดึง และเมื่อปล่อยให้มันเป็นอิสระจะกลับคืนสู่สภาพเดิม ซึ่งเกิดจากสายโมเลกุลที่ต่อกันนั้นไม่มีความเป็นเส้นตรง หากแต่ต่อกันในลักษณะที่ก่อให้เกิดสายโมเลกุลที่ขยุกขยิกยุ่งเหยิง อันเป็นผลให้สายโมเลกุลที่สมบูรณ์จะขดอยู่ใกล้กัน ด้วยเหตุนี้ยางชิ้นหนึ่ง ๆ จะประกอบไปด้วยสายโมเลกุลที่ขดกัน

ซับซ้อนเป็นจำนวนมาก และการหดของแต่ละโมเลกุลจะอยู่ในลักษณะซับซ้อนกันแต่ไม่ได้เชื่อมโยงติดกัน ดังนั้น เมื่อขึ้นยางขึ้นหนึ่ง ๆ ถูกแรงดึง แต่ละสายโมเลกุลก็จะเหยียดตรงออกไป และสายโมเลกุลที่ถูกยึดนี้จะพยายามหดกลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อขึ้นงานถูกปล่อยให้เป็นอิสระจากแรงดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2.6



ยางที่ไม่ถูกยึด



ยางที่ยืดออก



โมเลกุลเกิดการแยกออกจากกัน

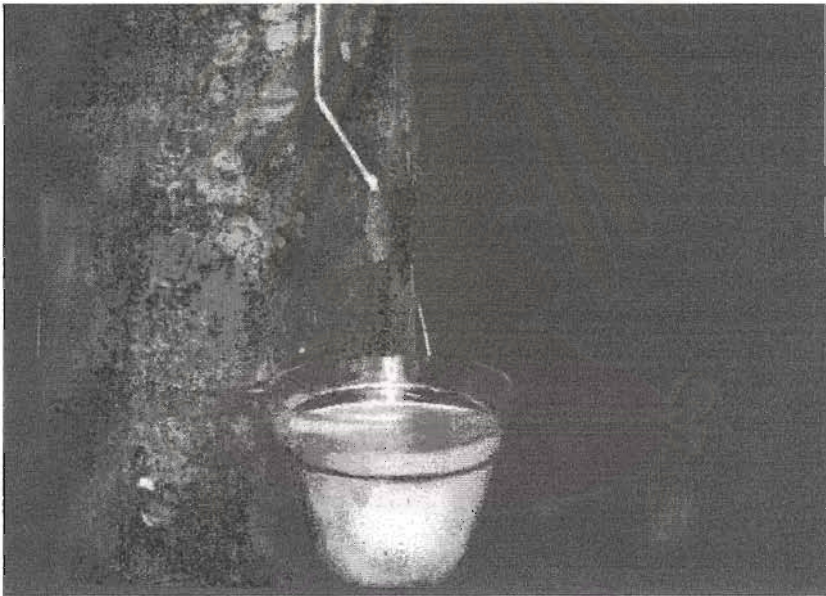
รูปที่ 2.6 ลักษณะโมเลกุลของยางธรรมชาติเมื่อได้รับแรงดึง

ปัจจุบันยางที่ใช้เป็นวัตถุดิบในโรงงานผลิตภัณฑ์ยาง จะได้มาจากพืชและจากการสังเคราะห์ของมนุษย์ ยางที่ได้มาจากพืชจะเรียกว่า ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR) ส่วนยางที่ได้จากการสังเคราะห์จะเรียกว่า ยางเทียมหรือยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber : SR)

พืชที่ให้ยางธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น ยางพารา ยางกัตคาเปอร์ช่า ยางมาลาตา และยางซิลเกิล ยางแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างโมเลกุล คุณสมบัติ และการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน แต่ยางที่ได้จากยางพารา เป็นยางธรรมชาติที่นำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด หากเอ่ยถึงยางธรรมชาติจะหมายถึงยางพาราเพียงอย่างเดียว

ยางพาราเป็นพืชยืนต้นขนาดใหญ่ชนิดใบเลี้ยงคู่ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Hevea braziliensis* มีโครงสร้างโมเลกุลแบบ cis 1, 4 polyisoprene ไม่น้อยกว่า 98% ถิ่นกำเนิดของยางพาราอยู่ในทวีปอเมริกาใต้ บริเวณลุ่มแม่น้ำอเมซอน ในประเทศบราซิล ส่วนการปลูกยางพาราในประเทศไทย ไม่มีหลักฐานแน่ชัดว่าเริ่มเมื่อใด แต่เชื่อกันว่า พระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี (คอซิมบี๊ ณ ระนอง) ขณะที่ยังดำรงตำแหน่งเจ้าเมืองตรัง ได้นำยางพาราจากรัฐเปร์ริค ประเทศมาเลเซีย มาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง ในราวปี พ.ศ. 2442 – 2444

น้ำยางจะเป็นของเหลวที่อยู่ในท่อน้ำยางซึ่งเรียงตัวกันอยู่ในเปลือกของต้นยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเปลือกด้านในซึ่งติดกับเยื่อเจริญ การจะนำน้ำยางออกจากต้นยางจะต้องใช้มีดกรีด เพื่อตัดท่อน้ำยางให้ขาดออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อกรีดลำต้นจะทำให้น้ำยางไหลออกมา ซึ่งเป็นสารที่ไม่บริสุทธิ์มีสีขาวคล้ายน้ำมัน เรียกว่า น้ำยางสด (Latex) ประกอบด้วย อนุภาคยางแขวนลอยอยู่ในน้ำ ปกติจะมีปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content : DRC) อยู่ประมาณ 30 – 45% โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 50 – 65% จะเป็นน้ำ และที่เหลืออีกบางส่วนเพียงเล็กน้อยจะเป็นโปรตีน ไขมันและเกลืออนินทรีย์ ยางมีความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.975 – 0.980 กรัมต่อมิลลิเมตร มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.93 และมีค่า pH ประมาณ 6.5 – 7.0 ความหนืดของยางมีค่าประมาณ 12 – 15 centipoise (น้ำบริสุทธิ์มีความหนืด 1 centipoise) และอาจมีค่าความแปรปรวน ขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนประกอบในน้ำยาง นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีก เช่น พันธุ์ยาง อายุของยาง ฤดูกาลกรีดยาง และวิธีการกรีดยาง เป็นต้น



รูปที่ 2.7 ลักษณะน้ำยางสดที่กรีดจากต้นยางพารา

น้ำยางสดที่ได้หลังจากกรีดต้นยางแล้ว จะคงสภาพเป็นน้ำยางอยู่ได้เพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งคือไม่เกิน 3 ชั่วโมง จากนั้นน้ำยางจะเริ่มจับตัวเป็น Gel มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ คล้ายเม็ดพริก แล้วจะค่อย ๆ หนืดขึ้น อนุภาคยางจะเริ่มจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น จนกระทั่งน้ำยางเกิดการสูญเสียสภาพ ซึ่งอาจเกิดมาจากสภาพแวดล้อม อุณหภูมิ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในน้ำยาง หรือเมื่อค่า pH ของน้ำยางลดลงต่ำกว่า 6.5 เนื่องจากเดิมที่เมื่อน้ำยางสดไหลออกจากต้นหลังการกรีดจะมีสถานะเป็นต่าง หากไม่มีการเติมสารเคมีรักษาสภาพลงไปน้ำยางจะเปลี่ยนสถานะเป็น

กรด โดยน้ำยางจะแยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่เป็นเซรุ่ม ต่อมาน้ำยางจะเริ่มบุดเน่าและมีกลิ่นเหม็น ดังนั้น จึงต้องเติมสารเคมีเข้าไปเพื่อเก็บรักษาน้ำยาง ถ้าเก็บระยะสั้นเพียง 2 – 3 วัน จะเติมสาร เช่น แอมโมเนีย โซเดียมซัลไฟด์ และฟอร์มาลดีไฮด์ เพื่อป้องกันการจับตัว (Anticoagulant) แต่หากเก็บรักษาระยะยาว จะเติมสารที่ทำให้น้ำยางยังเป็นของเหลวและไม่เกิดการบุดเน่าส่งกลิ่นเหม็น การรักษาคุณภาพน้ำยาง (Preservative) จะใช้สารแอมโมเนียหรือแอมโมเนียร่วมกับซิงค์ออกไซด์ TMTD กรดบอริก ซึ่งจะทำให้ยางจับตัวแยกส่วนออกจากกัน ยางที่จับตัวแล้วจะถูกแปรรูปในลักษณะต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

ยางธรรมชาติที่แปรรูปในประเทศไทยแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

2.3.5.1 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoke Sheet : RSS)

ยางแผ่นรมควันมีผลผลิตประมาณร้อยละ 80 ของยางทั่วประเทศ โดยส่วนใหญ่ได้จากการที่ชาวสวนยางเติมกรดฟอร์มิคเพื่อทำให้น้ำยางสดจับตัวและนำไปรีดให้อยู่ในรูปของยางแผ่นดิบ จากนั้นนำไปผึ่งชั่วคราวหนึ่ง เพื่อให้ความชื้นลดลง ส่วนการรมควันดำเนินการโดยโรงรมควันซึ่งบริษัท ห้างหุ้นส่วน หรือกลุ่มเกษตรกร จะเป็นผู้รวบรวมหรือรับซื้อยางแผ่นดิบแล้วนำมารมควัน การจัดชั้นคุณภาพของยางแผ่นรมควัน แบ่งออกเป็น 5 ระดับ โดยเรียกเป็นชั้น 1 ถึง ชั้น 5 ซึ่งจะพิจารณาจากการสังเกตด้วยสายตาว่ามีขนาด รูปร่าง ความหนา สี ฟองอากาศ เชื้อราบนแผ่นยาง ความสม่ำเสมอหรือตำหนิจากการรมควัน ความชื้น ความสะอาด และสิ่งแปลกปลอมปะปนมากน้อยเพียงใด

2.3.5.2 ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air-Dried Sheet : ADS)

ยางแผ่นผึ่งแห้งมีวิธีการผลิตเช่นเดียวกับการผลิตยางแผ่นรมควัน ยกเว้นการผึ่งยางให้แห้งต้องผึ่งด้วยลมร้อน ปราศจากควันไฟ และมีการเติมสารป้องกันเชื้อราลงไปในยาง แผ่นยางที่ได้จะมีลักษณะสีใส ไม่มีรอยตำหนิหรือสิ่งแปลกปลอม การจัดชั้นคุณภาพจะเป็นยางแผ่นผึ่งแห้งชั้นเดียว

2.3.5.3 ยางเครพ (Crepes)

ยางเครพที่ผลิตโดยทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.3.5.3.1 **ยางเครพที่ผลิตจากน้ำยางสด** ได้แก่ ยางโซลเครพ ยางเครพขาว และยางเครพสีจาง เป็นยางที่ไม่มีสารสีเหลือง กรรมวิธีการผลิตที่ดีจะไม่ก่อให้เกิดยางสีคล้ำหรือสีดำ มีการคัดเลือกพันธุ์ยางที่จะใช้ในการผลิต น้ำยางที่จับตัวด้วยกรดฟอร์มิก ต้องเจือจางให้มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 20% เติมสารโซเดียมไบซัลไฟด์ (Sodium bisulfite) และสารฟอกสี จากนั้นรีดเป็นแผ่นบาง ทำความสะอาดและผึ่งให้แห้งในโรงผึ่งที่สามารถควบคุมการถ่ายเทของอากาศและอุณหภูมิได้

2.3.5.3.2 **ยางเครพคุณภาพต่ำ** เป็นยางที่ทำมาจากยางที่จับตัวแล้วตามธรรมชาติ เช่น เศษยาง ขี้ยาง เป็นต้น ในกระบวนการผลิต ขณะที่ยางแผ่นผ่านเครื่องจักร จะต้องฉีดน้ำล้างยางตลอดเวลา เพื่อชะล้างทำความสะอาด ชั้นตอนสุดท้ายจะรีดยางเป็นแผ่นเครพสีน้ำตาล ผึ่งให้แห้งในโรงผึ่งที่สามารถควบคุมการถ่ายเทของอากาศและอุณหภูมิได้

2.3.5.4 ยางแท่ง (Block rubber)

ยางแท่งเป็นยางที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐาน มีการใช้เครื่องจักรในกระบวนการผลิต ปรับปรุงการบรรจุหีบห่อให้ทันสมัย สะดวกในการขนส่งและใช้งาน ยางแท่งของประเทศไทยเดิมเรียกว่า TTR (Thai Tested Rubber) ในปี พ.ศ. 2539 และต่อมาได้เปลี่ยนเป็นยางแท่ง STR (Standard Thai Rubber) การผลิตยางแท่งผลิตได้ทั้งจากน้ำยางสดและจากยางที่จับตัวกันแล้ว

2.3.5.5 ยางskim (Skim rubber)

ยางskimเป็นผลิตผลจากหางน้ำยาง ซึ่งมีปริมาณเนื้อยางแห้งประมาณ 3 – 7% อันเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำยางข้น การผลิตยางskimทำได้โดยการนำหางน้ำยางมาทำให้จับตัว ยางที่ได้จะมีสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่สูง เช่น โปรตีนทำให้ยางมีกลิ่นเหม็น และปฏิกิริยาที่ทำให้ยางคงรูปเกิดเร็วขึ้นที่เรียกว่า ยางสกอร์ช (Scorch) และถ้ามีปริมาณทองแดงสูง จะทำให้ยางเสื่อมสภาพได้เร็ว โดยทั่วไป ยางskimจะผลิตและจำหน่ายในรูปของยางแท่งและยางเครพ

2.3.5.6 ยางความหนืดคงตัว (Viscosity stabilized rubber)

ลักษณะของยางชนิดนี้มีความหนืดต่ำและคงตัว ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการบดยางผสมสารเคมี ที่เรียกว่าการบดยางให้นิ่ม (Mastication) ทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยางจะไม่เปลี่ยนแปลง

2.3.5.7 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางข้น คือ น้ำยางที่นำเอาส่วนที่เป็นของเหลวหรือเซรัม (Serum) ซึ่งมีสารจำพวกที่ไม่ใช่ยาง (Non-Rubber constituents) ประมาณ 5% และนำออกจากน้ำยางสด เพื่อให้ได้ส่วนที่เป็นครีมหรือส่วนที่ข้นของน้ำยางทำให้ได้เนื้อยางที่มีปริมาณเนื้อยางแห้งสูงถึง 60% เพราะน้ำยางสด โดยปกติจะมีปริมาณเนื้อยางแห้งอยู่ระหว่าง 25 - 45% (หรือเฉลี่ย 35% โดยประมาณ) ซึ่งหากน้ำยางสดนั้นมีปริมาณเนื้อยางแห้งน้อยกว่า 25% จะไม่แนะนำให้นำไปผลิตน้ำยางข้น

การผลิตน้ำยางข้น มีอยู่ 4 วิธี ได้แก่ วิธีการระเหยน้ำ (Evaporation) วิธีการทำให้เกิดครีม (Creaming) วิธีการปั่น (Centrifuging) และวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodecantation) แต่วิธีการปั่นน้ำยางเป็นวิธีที่นิยมและทำให้เป็นการค้ามากที่สุดคิดเป็นปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 ของการผลิตน้ำยางข้นทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำยางข้นที่ผลิตในประเทศไทยจะเป็นน้ำยางข้นที่ได้จากวิธีการปั่นน้ำยางเพียงอย่างเดียว สารเคมีที่นิยมใช้ในการเก็บรักษาสภาพน้ำยางข้น คือ แอมโมเนียและแอมโมเนียร่วมกับสารช่วยบางชนิด ซึ่งจะมีทั้งชนิดแอมโมเนียมาก (High Ammonia : HA) คือใช้แอมโมเนีย 0.7% ต่อน้ำหนักยาง และชนิดแอมโมเนียน้อย (Low Ammonia : LA) คือใช้แอมโมเนีย 0.2% ต่อน้ำหนักยางร่วมกับสารช่วยอื่น ๆ

สำหรับการเก็บน้ำยางข้นเพื่อรอการขนถ่ายและขนส่งต่อไปนั้น จะเก็บในถังขนาดต่าง ๆ ตั้งแต่ความจุ 200-14,000 ลิตร ที่แห้งและสะอาด ในกรณีที่เป็นผิวโลหะ ภาชนะที่ใช้เก็บน้ำยางข้น ควรเคลือบผนังด้านในด้วยสารที่ทนกรดอ่อน ๆ เช่น สารเคลือบประเภทปิทุเมนและอีพอกซีเรซิน น้ำยางข้นที่เก็บไว้โดยไม่ถูกรบกวนมักจะมีปัญหาการเกิดครีมขึ้นบนผิวหน้า เนื่องจากอนุภาคของยางลอยขึ้นสู่ผิวหน้าทำให้ส่วนนั้นข้นมากขึ้น จึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกวนน้ำยางภายในถัง ประกอบด้วยใบพัดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-0.75 ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ถัง การกวนควรใช้ความเร็วต่ำประมาณ 15-30 รอบต่อนาที ระยะเวลาและความถี่ของการกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเก็บน้ำยาง ถ้าอุณหภูมิในการเก็บสูง น้ำยางจะเกิดครีม

ขึ้นได้เร็ว หากเก็บน้ำยางไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ควรกวนน้ำยางทุกวัน ๆ ละ 30 นาที
 ดังนั้น ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10-15 องศาเซลเซียส และกึ่งถังเพื่อเป็นการกวนน้ำยางสดปาดห้ละ
 ครั้ง พยายามอย่าทิ้งน้ำยางไว้โดยไม่ถูกรบกวนเป็นระยะเวลาและควรพยายามหลีกเลี่ยงการ
 เก็บในที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส การสังเกตว่าน้ำยางเสียสภาพแล้วหรือไม่ สามารถ
 พิจารณาได้จากกลิ่น หากน้ำยางเสียสภาพแล้วจะมีกลิ่นบูดเน่า แต่หากยังสภาพดีจะมีกลิ่นหวาน
 นอกจากนี้ ยังสามารถสังเกตสีของน้ำยางได้ ถ้าเสียสภาพจะมีสิ่งสกปรกเจือปนหรือมีสีเทาอมฟ้า

2.3.6 ปัญหาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงจะอ่อน
 ตัวขณะที่อุณหภูมิต่ำจะแตกเปราะ อีกทั้งปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มสูงขึ้นใน
 ปัจจุบัน ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดปัญหาชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ ทำให้ต้องเสีย
 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสูงมากขึ้น ลักษณะความเสียหายที่พบบิดังนี้

2.3.6.1 ผิวทางเยิ้ม (Bleeding) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุแอสฟัลต์ในผิวทาง
 แอสฟัลต์คอนกรีตไหลขึ้นมารวมกันที่ผิวหน้าเมื่ออุณหภูมิสูงหลังจากได้รับน้ำหนักบรรทุก โดย
 แอสฟัลต์จะไหลเยิ้ม ทำให้ผิวทางลื่น เกิดจากแอสฟัลต์มีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) และมี
 ค่าความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) สูงมาก หรือ
 ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt content) ที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมไม่ถูกต้อง อาจมี
 ปริมาณมากเกินไป นอกจากนี้ อาจมีสาเหตุมาจากวัสดุแอสฟัลต์มีจุดอ่อนตัว (Softening point)
 ต่ำทำให้แอสฟัลต์อ่อนตัวง่าย ก่อให้เกิดร่องล้อ (Rutting) ที่ผิวทางขึ้นได้

2.3.6.2 ผิวทางเกิดการยุบตัวถาวร (Permanent deformation) การยุบตัวถาวร
 เป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นผิวทางหรือชั้นโครงสร้างทางอย่างถาวร โดยทั่วไป
 มักเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักบรรทุกที่แล่นผ่านหรือบริเวณที่มีการหยุดรถของรถบรรทุกหนัก
 การยุบตัวถาวรสามารถเกิดขึ้นเฉพาะที่ชั้นผิวทางหรือเฉพาะที่ชั้นโครงสร้างทางหรือทั้งชั้นผิวทาง
 และชั้นโครงสร้างทางได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยการที่ชั้นทางนั้นใช้วัสดุในการก่อสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพ
 ที่ดีพอ ทำให้เกิดการยุบตัวเนื่องจากการทับถมหรือเกิดการไหลตัวของชั้นทางนั้นอย่างถาวร อาจ
 เกิดหลังจากที่ผิวทางมีการไหลเยิ้ม (Bleeding) ก็ได้ โดยทั่วไป การยุบตัวถาวรจะมีอยู่ 2 ชนิด
 ได้แก่ การยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักบรรทุกขนานกับทิศทางจราจรที่เรียกว่า
 ร่องล้อ (Rutting) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทาง

ของจราจรและมักจะเกิดบริเวณที่การจราจรหยุดหรือเคลื่อนตัวช้าที่เรียกว่า Shoving ส่วนมากตามถนนในพื้นที่นอกเมืองจะพบการยุบตัวถาวรชนิด Rutting มากกว่าเพราะการจราจรเคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงกว่า ส่วนพื้นที่ในเมืองนั้นมักพบทั้ง Rutting และ Shoving โดยเฉพาะบริเวณตามทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร ป้ายรถประจำทางหรือบริเวณที่มีการจราจรติดขัดเป็นประจำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการหยุดจอดบ่อยครั้งของการจราจรที่มีน้ำหนักบรรทุกมาก ทำให้เกิด Shoving ได้ง่าย ซึ่งคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์นั้นก็มีส่วนสำคัญเช่นกันที่จะส่งผลต่อการยุบตัวอย่างถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

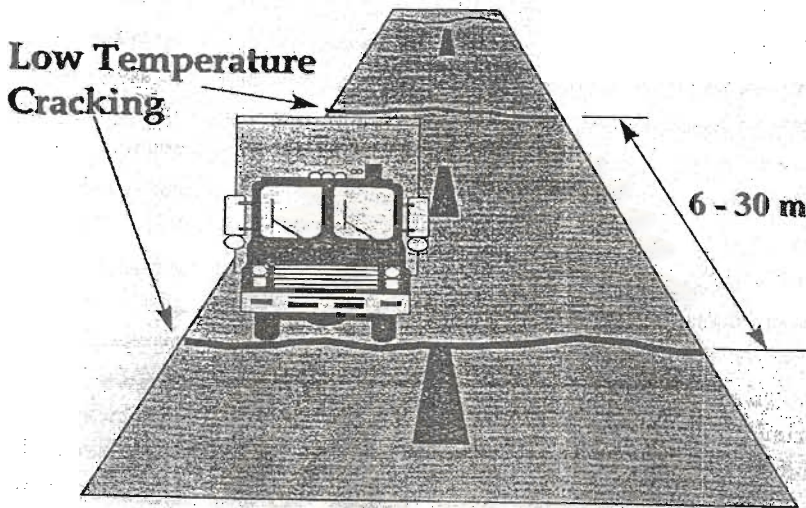


รูปที่ 2.8 การยุบตัวถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

2.3.6.3 ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal cracking)

การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น สาเหตุเกิดมาจากแรงเค้นดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เย็นจัด (ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง) อย่างรวดเร็ว เมื่อแรงเค้นดึงนี้มีค่ามากเกินกว่าค่ากำลังรับแรงดึงของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถรับได้ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น ลักษณะของรอยแตกร้าวจะเป็นรอยแตกตามแนวขวางกับทิศทางการจราจร ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นผลโดยตรงมาจากคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์จะมีลักษณะแข็งและเปราะง่ายต่อการแตกร้าว

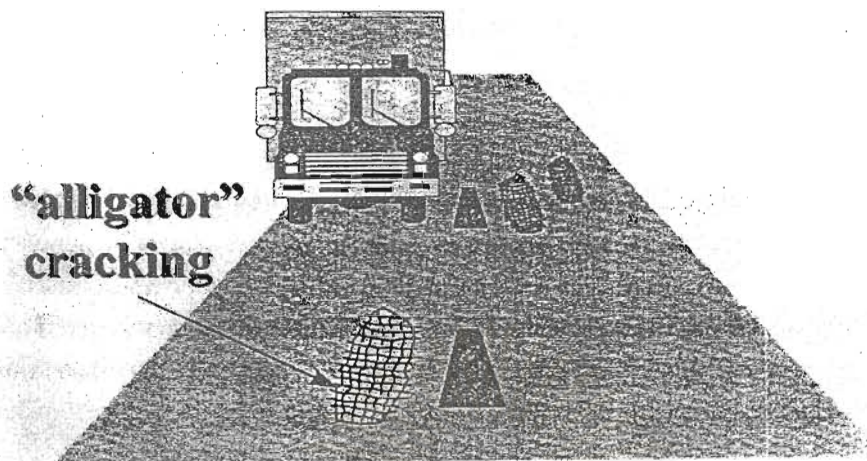
วัสดุแอสฟัลต์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเกรด แหล่งน้ำมันดิบ อายุ และอัตราการเกิดความเครียดของวัสดุแอสฟัลต์ จากการสังเกตพบว่า วัสดุแอสฟัลต์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวสูงเช่นกัน



รูปที่ 2.9 การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

2.3.6.4 ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) การแตกร้าวเนื่องจากความล้าจากการรับน้ำหนักบรรทุกบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เกิดจากการที่ผิวทางต้องรับน้ำหนักจากการจราจรซ้ำไปซ้ำมาเป็นระยะเวลาจนเกิดความล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักในลักษณะซ้ำซาก ได้แก่

- การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง
- คุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณช่องว่างระหว่างวัสดุผสมรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- คุณภาพในสนามของวัสดุชั้นทาง
- อุณหภูมิ
- ปริมาณการจราจร



รูปที่ 2.10 การแตกร้าวเนื่องจากความล้าของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

2.3.6.5 การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น (Moisture damage) การ

ทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้นนั้นไม่ใช่ความเสียหายของถนน แต่เป็นผลกระทบหลักที่จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น เนื่องจากความชื้นจะทำลายการยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุมวลรวมกับวัสดุแอสฟัลต์ ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุมวลรวมจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เรียกว่า Raveling เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อน เนื่องจากวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของวัสดุแอสฟัลต์ ถูกแรงเฉือนจากล้อรถตะกุนหลุดออก ทำให้ผิวทางมีลักษณะหยาบขรุขระ มีลักษณะเป็นหน้าข้าวตัง มีหินใหญ่โผล่ ความเสียหายดังกล่าวนี้จะทำให้โครงสร้างชั้นทางมีกำลังลดลงนำไปสู่การแตกร้าวหรือการยุบตัวอย่างถาวรในแนวร่องล้อต่อไป

2.3.6.6 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Aging) การ

เปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนี้ก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ไม่ได้ก่อความเสียหายโดยตรงแก่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแต่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ในระยะเวลาต่อมา เพราะแอสฟัลต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการแข็งเปราะ แม้ว่าการแข็งขึ้นของแอสฟัลต์ดังกล่าวจะเป็นผลดีต่อการต้านทานต่อการยุบตัวอย่างถาวร แต่หากเกิดการแข็งตัวมากเกินไปจนเปราะแล้ว จะทำให้เกิดการแตกร้าวและนำไปสู่การหลุดลอกได้ (Stripping) ภาวะการเกิด Aging นี้อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างขั้นตอนการผสมแอสฟัลต์กับมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และในระหว่างการใช้งานในสนาม ภาวะ Aging สามารถเกิดได้จาก 7 ปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้

- **ปฏิกิริยา Oxidation** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากออกซิเจนทำปฏิกิริยากับวัสดุ แอสฟัลต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยานี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ แอสฟัลต์ อุณหภูมิ และอัตราการกระจายตัวของออกซิเจน นอกจากนี้ ความพรุนของวัสดุ มวลรวมก็มีส่วนเกี่ยวข้องด้วย ที่อุณหภูมิและความดันปกติ ปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจน และแอสฟัลต์จะเกิดขึ้นช้ามาก อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยานี้มีผลทำให้ฟิล์มของแอสฟัลต์บน ผิวทางมีความแข็งเป็นพิเศษ และหากไม่มีการรบกวนใด ๆ แล้วฟิล์มนี้จะทำหน้าที่สกัดกั้น ออกซิเจน เป็นผลให้ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยานี้ไม่ให้เกิดต่อเนื่องลงไปในชั้นผิวทางได้ แต่หากผิวทางเกิดแข็งเปราะขึ้นและเกิดรอยแตกแล้วจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Oxidation ต่อเนื่องในชั้นทางและเกิดการแตกร้าวอย่างต่อเนื่องได้
- **ปฏิกิริยา Volatilization** เป็นปฏิกิริยาการแยกระเหยของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุล เบาจากวัสดุแอสฟัลต์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในระหว่างการผสมแอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากแอสฟัลต์อยู่ใน ลักษณะของฟิล์มที่บางทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา
- **ปฏิกิริยา Polymerization** เป็นปฏิกิริยาที่โมเลกุลขนาดเล็กของแอสฟัลต์หลาย ๆ โมเลกุลมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลให้เกิดการแข็งตัวขึ้น
- **ปฏิกิริยา Thixotropy หรือ Steric hardening** เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของวัสดุแอสฟัลต์ มีการยึดเกาะกันแน่นเมื่อถูกปล่อยไว้โดยปราศจากการรบกวนเป็นระยะเวลาสั้น ถนนที่ ปราศจากการสัญจรเป็นเวลานานจะเกิดการแข็งเปราะอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับ ถนนแบบเดียวกันที่มีการสัญจรไปมา
- **ปฏิกิริยา Syneresis** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแอสฟัลต์ โดยเกิดจากส่วนที่ โมเลกุลเบาแยกตัวจากโมเลกุลหนักมาสู่ผิวของวัสดุแอสฟัลต์ และระเหยออกไป เป็นผล ให้แอสฟัลต์โดยรวมเกิดการแข็งขึ้น
- **ปฏิกิริยา Separation** เป็นปฏิกิริยาการแยกตัวออกไปของส่วนที่เป็นของเหลวใน แอสฟัลต์เช่นกัน แต่ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากความพรุนของวัสดุมวลรวม
- **ปฏิกิริยา Physical hardening** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการที่วัสดุแอสฟัลต์อยู่ ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ แม้ว่าอุณหภูมิจะคงที่แต่แอสฟัลต์จะมีการแข็งตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ดังนั้น การแก้ไขปัญหาค่าความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเฉพาะถนนที่มี ปริมาณการจราจรและปริมาณรถบรรทุกหนักสูง วิธีหนึ่งก็คือ ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ แอสฟัลต์ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) เพื่อให้มีคุณสมบัติดังนี้

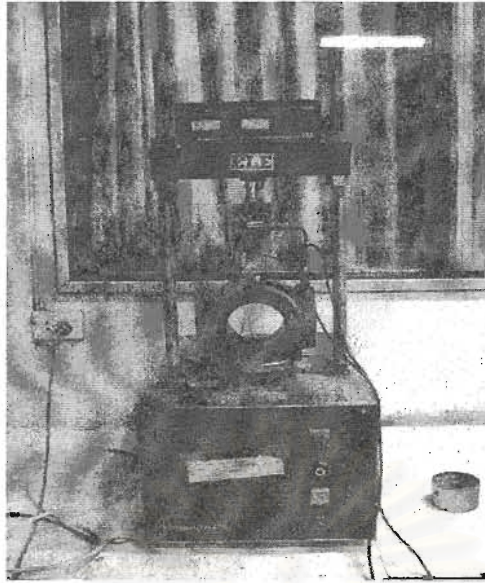
- เพิ่มความหนืด (Viscosity)
- ลดความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility)
- เพิ่มจุดอ่อนตัว (Softening point)
- เพิ่มความยืดหยุ่น (Elasticity)
- เพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion)
- เพิ่มการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเนื่องจากอายุการใช้งาน (Aging resistance)
- เพิ่มความแข็งแรง (Stiffness)
- เพิ่มเสถียรภาพ (Stability)

2.3.7 การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

แนวคิดมูลฐานของวิธีมาร์แชลในการออกแบบวัสดุส่วนผสมสำหรับถนนแอสฟัลต์ กำหนดขึ้นโดยนาย บรูซ มาร์แชล วิศวกรปิโตรเลียม กรมทางหลวงรัฐมิสซิสซิปปี ต่อมา the U.S. Corps of Engineers ได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมแล้วปรับปรุงวิธีการและพัฒนาหลักเกณฑ์ในการออกแบบส่วนผสมจนกระทั่งวิธีการทดสอบให้ได้มาตรฐาน และได้กำหนดเป็นมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1559 และ AASHTO T245 ขึ้น

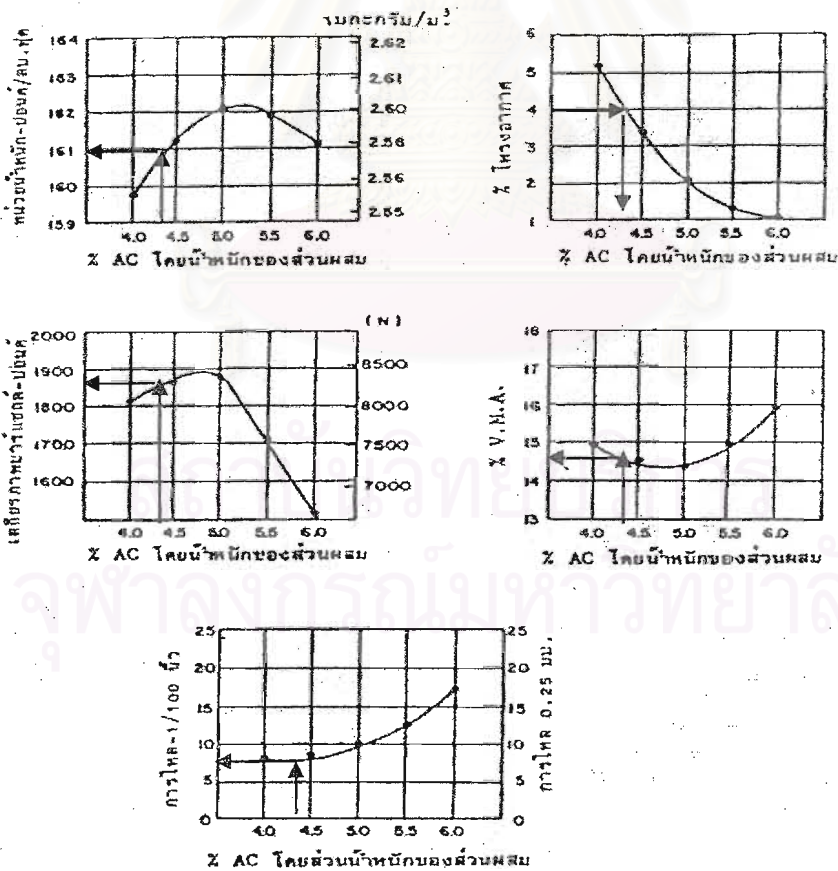
วิธีมาร์แชลนี้ใช้กับถนนแอสฟัลต์ที่ผสมแบบร้อน (Hot Mix Asphalt : HMA) ซึ่งประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมที่มีการจัดขนาดคละแน่น ที่มีขนาดมวลรวมโตสุด 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) หรือน้อยกว่า วิธีการนี้ใช้ได้ทั้งการออกแบบในห้องปฏิบัติการและการควบคุมในสนาม

การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล เป็นวิธีการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ เสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air void) หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) และค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (VFA) ในส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวมชนิดต่าง ๆ เพื่อนำไปหาค่าร้อยละของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม (Optimum asphalt content) ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 4 โดยเครื่องทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบและทำการคำนวณ ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดสอบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังต่อไปนี้



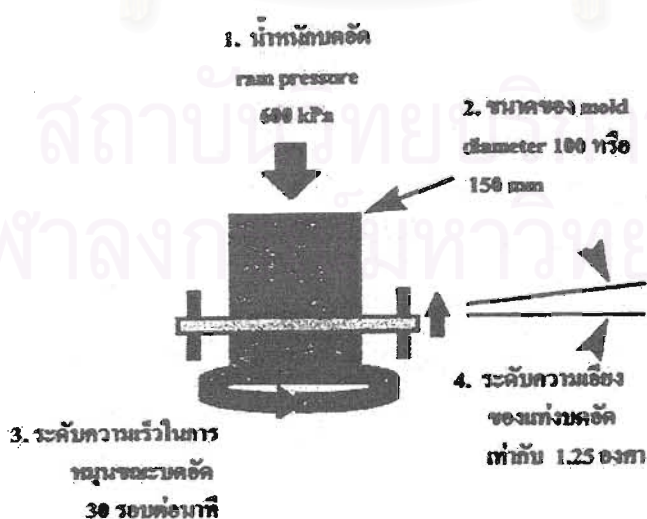
รูปที่ 2.12 กราฟตัวอย่างข้อมูลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล

หมายเหตุ

- ส่วนผสมที่ใช้ได้ต้องเป็นไปตามเกณฑ์การออกแบบทุกประการ ไม่ใช่ผ่านเพียงแค่เฉพาะค่าเสถียรภาพเท่านั้น
- การจำแนกปริมาณจราจรแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้ เบาบางเมื่อ $EAL < 10^4$ ปานกลางเมื่อ EAL ตั้งแต่ 10^4 ถึง 10^6 และหนาแน่นเมื่อ $EAL > 10^6$
- ขนาดอนุภาคโตสุดที่ใช้เรียกของมวลรวม (Nominal maximum size) คือขนาดที่ใหญ่กว่าตะแกรงอันแรกที่มีวัสดุมวลรวมค้างมากกว่าร้อยละ 10

2.3.8 การบดอัดก้อนวัสดุตัวอย่างโดย Superpave Gyrotory Compactor (SGC)

เครื่อง SGC เป็นเครื่องมือกลกึ่งอัตโนมัติที่สามารถควบคุมการให้น้ำหนักกดที่คงที่ โดยกระบวนการบดอัดจะเริ่มขึ้นเมื่อนำส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะทำการบดอัดบรรจุลงในแบบ (Mold) ซึ่งมีทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 และ 150 มิลลิเมตร จากนั้นนำ Mold ดังกล่าวเข้าติดตั้งกับส่วนฐานรับก้อนตัวอย่าง (Rotation base) ซึ่งส่วนฐานนี้จะหมุนในอัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที และจะรองรับ Mold ไว้ขณะทำการบดอัด นอกจากนี้ ที่ฐานจะมีขอบเพื่อลึอกเข้ากับ Bearing ที่ทำหน้าที่บังคับวัสดุผสมใน Mold ให้ทำมุมเอียง 1.25 องศากับหัวของ Loading ram ที่ควบคุมความดันกดลงบนวัสดุใน Mold ด้วยความดันคงที่ 0.6 MPa เพื่อทำการบดอัดวัสดุในการหมุนแต่ละรอบ และมีระบบการวัดความสูงก้อนตัวอย่างขณะทำการบดอัดและบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 การบดอัดดังกล่าวเป็นการลอกเลียนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากสภาพจริงในสนามที่ล้อเหล็กของรถบดอัดทำกับผิวถนนขณะทำการบดอัด

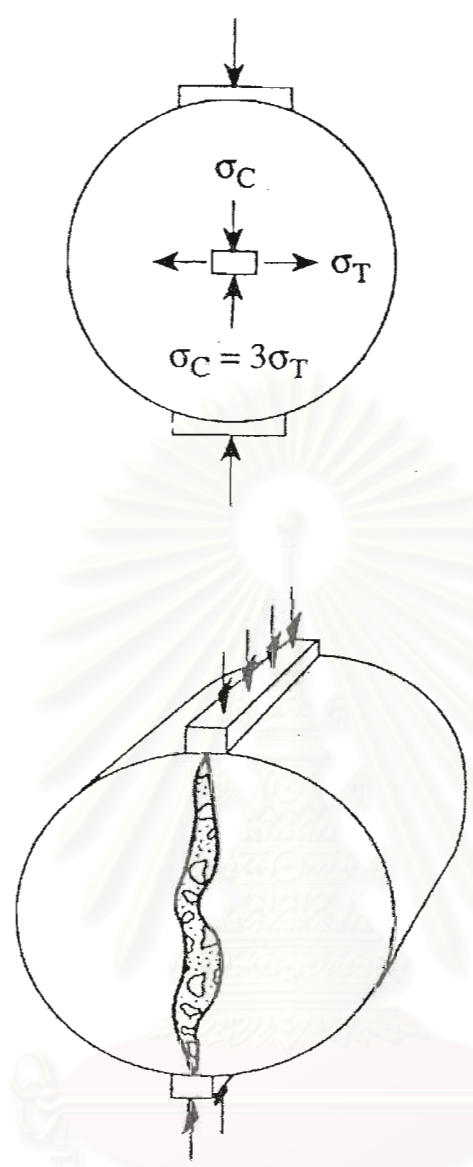


รูปที่ 2.13 ลักษณะการทำงานในการบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyrotory Compactor (SGC)

2.3.9 การทดสอบโดย Indirect Tensile Test

2.3.9.1 ทฤษฎี

การทดสอบแบบ Indirect Tensile Test เป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักที่เป็น Compression load ซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้งแบบ Static หรือแบบ Repeated / Dynamic load ก็ได้ แล้วแต่กรณี โดยให้ Load กระทำในแนวขนานตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวตั้งของก้อนวัสดุทดสอบ แต่จากทฤษฎีที่ Stresses พัฒนาขึ้นเนื่องจากการกระทำของ Line load ที่กระทำต่อก้อนวัสดุทดสอบทรงกระบอก ในทางปฏิบัติหากยึดการ Load ของก้อนวัสดุทดสอบตามลักษณะ Line load แล้วจะทำให้จุดแตกหักของวัสดุเกิดขึ้นที่ตำแหน่งขอบผิวของก้อนวัสดุทดสอบที่ทำการ Load ผลที่ได้จะไม่ถูกต้องตามคุณสมบัติจริงของวัสดุที่ควรจะเป็น ดังนั้น Load ต้องกระทำผ่านแท่งก้นน้ำหนักที่เป็นเหล็กสแตนเลสที่มีขนาดแนะนำให้ใช้ดังนี้ สำหรับกรณีก้อนวัสดุทดสอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร หรือใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร สำหรับกรณีที่ก้อนวัสดุทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตร โดยที่แท่งก้นน้ำหนักดังกล่าวต้องมีด้านสัมผัสกับผิวของก้อนวัสดุทดสอบซึ่งเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเท่ากับรัศมีของก้อนวัสดุทดสอบ ทำให้สามารถแนบกันได้สนิทพอดี เพื่อประโยชน์ในการกระจายน้ำหนักและในการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำคงที่ การ Load ในลักษณะนี้จะทำให้เกิด Tensile stress ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการ Load หรือแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้ง ทำให้ก้อนวัสดุทดสอบเกิดการแตกแยกขึ้นตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเนื่องจากการป้อน Single load หรือ Repeated load ก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยลักษณะการกระจายของ Stresses ที่เกิดขึ้นภายในก้อนวัสดุทดสอบขณะทำการทดสอบทั้งในแนวราบและแนวตั้ง จะสังเกตเห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางของก้อนวัสดุทดสอบ Compressive stress ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่าของ Tensile stress ที่เกิดขึ้นในแนวราบ ผลจากทฤษฎีพอจะสรุปสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณหาค่า Tensile strength ค่า Tensile strain ค่า Modulus of Elasticity และค่า Poisson's Ratio ได้ โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

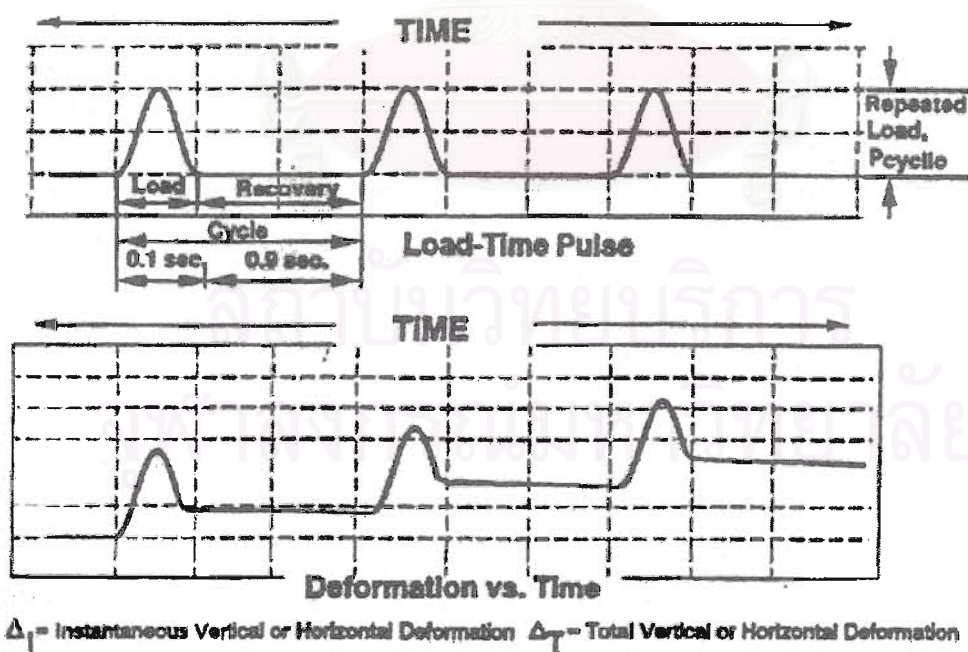


รูปที่ 2.14 การป้อนน้ำหนักและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบด้วย Indirect Tensile Test

2.3.9.2 การทดสอบโดยทั่วไป

การทดสอบแบบ Static หรือการใช้แรงกดในอัตราคงที่นั้น จะเหมาะกับการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากผลของอุณหภูมิ (Thermal cracking) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature) การศึกษานี้จะพิจารณาการทดสอบแบบ Repeated หรือ Dynamic load ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์หาความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้ และสามารถใช้กับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้ โดยจะให้น้ำหนักทดสอบที่คงที่ค่าหนึ่งที่ไม่

ถึงกับทำลายก่อนวัสดุทดสอบ จากนั้นกระทำการ Load และ Unload ซ้ำไปมา โดยตรวจสอบและบันทึกค่า Deformation ทั้งแนวราบและแนวตั้ง แต่จะให้ความสนใจเฉพาะในส่วนของค่า Recoverable deformation ซึ่งพิจารณาได้จากสมมติฐานที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Deformation มีลักษณะเป็นเส้นตรง เพื่อใช้ค่าเหล่านี้ในการคำนวณหาค่า Resilient Modulus อีกทั้งการทดสอบนี้ยังสามารถใช้ประมาณค่า Permanent deformation ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก Repeated load ได้อีกด้วย โดยปกติ Repeated stress ที่กระทำกับก้อนวัสดุทดสอบจะป้อนในรูปลักษณะ Haversine wave โดยที่มีการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อรักษาสภาพการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งกดน้ำหนักกับผิวของก้อนวัสดุทดสอบ สำหรับลักษณะของความสัมพันธ์ของการ Loading เทียบกับเวลาและความสัมพันธ์ของค่า Deformation ที่เกิดขึ้นกับก้อนวัสดุทดสอบเทียบกับเวลานั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 แต่ทั้งนี้จะแนะนำให้เลือกช่วงระยะเวลาการ Loading ที่สั้น ๆ มาใช้ในการทดสอบถ้าเครื่องมือทดสอบสามารถทำได้ เนื่องจากว่าการทดสอบด้วยระยะเวลาการ Loading ที่สั้นจะให้ค่า Fatigue life ที่สูงขึ้นใกล้เคียงกับค่า Fatigue life ที่เกิดขึ้นจริงในสนาม เพราะโดยปกติค่า Fatigue life ที่วิเคราะห์ได้จากการประมาณผลการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ มีแนวโน้มที่จะต่ำกว่าค่าที่เกิดจากสภาพการใช้งานจริงในสนาม สำหรับระยะเวลาการ Loading ที่มักใช้ในการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.4 วินาที และใช้อัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 24 – 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ของจังหวะการให้ Load และ Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ

Indirect Tensile Test แบบ Repeated Load

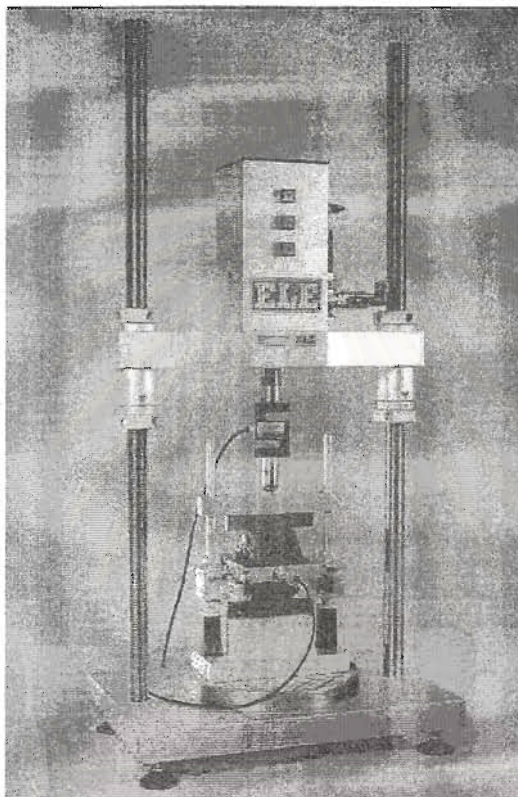
2.3.9.3 การทดสอบแบบ Repeated หรือ Dynamic load Indirect Tensile Test

เครื่อง Loading ต้องสามารถควบคุมการป้อน Load ในระดับที่กำหนดได้ พร้อมทั้งสามารถควบคุมให้มีระยะเวลาการ Load ตลอดจนความถี่ในการ Load ได้ตามที่ต้องการ โดยส่วนใหญ่เครื่องมือที่ใช้จะเป็นระบบ Electro-Hydraulic แต่ระบบ Electro-Pneumatic load ก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน แต่หากมีการทดสอบวัสดุที่อุณหภูมิต่ำซึ่งต้องใช้ปริมาณการ Load มากแล้วจำเป็นต้องคำนึงถึงขอบเขตความสามารถในการให้ Load ของเครื่องด้วย

หัวสำหรับ Loading ต้องมีแท่งเหล็กรองรับเพื่อถ่ายน้ำหนักจากหัวสำหรับ Loading ไปสู่ก้อนตัวอย่างวัสดุทดสอบทั้งด้านบนและด้านล่างของก้อนตัวอย่าง โดยแท่งเหล็กรองรับนั้นมีด้านที่สัมผัสกับวัสดุทดสอบเป็นส่วนเว้าที่มีรัศมีมีความโค้งเดียวกันกับรัศมีมีความโค้งของก้อนตัวอย่าง โดยปกติขนาดก้อนตัวอย่างที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร หรือ 150 มิลลิเมตร ทำให้ขนาดความกว้างของแท่งเหล็กที่เหมาะสมจะเป็น 13 มิลลิเมตร หรือ 19 มิลลิเมตร สำหรับก้อนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร หรือ 150 มิลลิเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ขอบแท่งเหล็กควรเจียให้มนเพื่อไม่ให้ความคมของขอบแท่งเหล็กกดตัดแท่งตัวอย่างระหว่างทดสอบ ในระหว่างทำการทดสอบจำเป็นต้องรักษาแนวตำแหน่งของแท่งเหล็กให้คงที่ทั้งแนวขนานและในแนวตั้ง สำหรับในการ Preload ก้อนตัวอย่างวัสดุทดสอบนั้น ควรควบคุมให้ Preload เพียงเล็กน้อยเพื่อไม่ให้เกิด Creep deformation ก่อนการทดสอบจริง สำหรับหัว Loading ของก้อนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรนั้น หากต้องการประหยัดอาจปรับแต่งหัวทดสอบก้อนวัสดุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ Marshall stability มาใช้ได้แต่ต้องพิจารณาถึงการลดน้ำหนักของหัวทดสอบที่กระทำกับก้อนตัวอย่างไม่ให้มีน้ำหนักมากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบที่อุณหภูมิสูง

ระบบการตรวจวัดค่าทดสอบ ความสามารถในการวัดค่า Repeated load ที่กระทำต่อก้อนตัวอย่างรวมถึงการวัดให้ได้ค่า Instantaneous resilient vertical และ Horizontal deformation ที่ถูกต้องนั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า Resilient Poisson's Ratio และ Resilient modulus สำหรับการวัดค่าการให้ Load นั้นหากเป็นการใช้ Load cell ที่ทำงานด้วย Pneumatic หรือ Hydraulic pressure แล้วมักจะสามารถบันทึกการให้ Load ได้โดยอัตโนมัติจากการใช้ Pressure transducer ความสามารถในการวัดค่าเพื่อให้ได้ค่าสูงสุดและต่ำสุดเป็นสิ่งจำเป็น ส่วนการวัดค่า Deformations นั้นไม่ว่าจะเป็นค่า Deformations ในแนว Horizontal หรือแนว Vertical สามารถวัดได้จากการใช้เครื่องมือ Linear Variable Differential

Transducers (LVDT's) หรืออาจใช้เครื่องมืออื่นที่มีความเหมาะสม สำหรับการวัดค่า Horizontal deformation นั้นจำเป็นต้องมีความสามารถในการวัดให้ได้ละเอียดถึง 0.00025 มิลลิเมตร ดังนั้นจุดสัมผัสของเครื่องมือกับผิวของก้อนวัสดุทดสอบจึงจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ การใช้กาวเพื่อช่วยยึดสัมผัสจึงอาจกระทำได้เพื่อให้เกิดความแน่ใจ โดยในรูปที่ 2.16 ได้แสดงการติดตั้งวัสดุทดสอบและลักษณะเครื่องมือ Indirect Tensile Test



รูปที่ 2.16 การติดตั้งวัสดุทดสอบและลักษณะเครื่องมือ Indirect Tensile Test

2.3.9.4 ผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธี Repeated Load Indirect Tensile Test

2.3.9.4.1 ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus : MR)

ค่าโมดูลัสคืนตัวมีความสำคัญอย่างมากในการหาพฤติกรรมของวัสดุงานทาง เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความอ่อนไหวในการตอบสนองต่อน้ำหนักที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีแรงดึงทางอ้อม สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$MR = \frac{(\nu + 0.27) \times P}{L \times \Delta H} \quad (2.1)$$

เมื่อ	MR	=	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)
	ν	=	สัดส่วนบัวของ (Poisson's Ratio)
	P	=	ระดับน้ำหนัก (N)
	T	=	ความหนาของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
	ΔH	=	ค่าการคืนตัวแนวราบ (Resilient horizontal deformation) (มิลลิเมตร)

สำหรับค่าสัดส่วนบัวของ (Poisson's Ratio) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\nu = 3.59 \frac{\Delta H}{\Delta V} - 0.27 \quad (2.2)$$

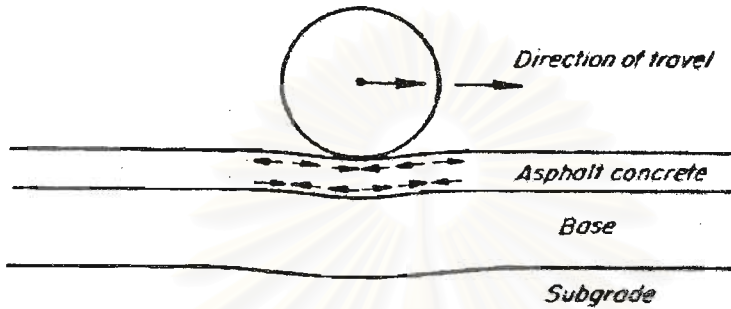
เมื่อ	ν	=	สัดส่วนบัวของ (Poisson's Ratio)
	ΔH	=	ค่าการคืนตัวแนวราบ (Resilient horizontal deformation)
	ΔV	=	ค่าการคืนตัวแนวตั้ง (Resilient vertical deformation)

ทั้งนี้ค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ขึ้นอยู่กับการนิยามค่าการคืนตัวแนวราบ (Resilient horizontal deformation) ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

- *Instantaneous resilient modulus* เป็นค่าโมดูลัสคืนตัวที่คำนวณมาจากค่าการคืนตัวแนวราบที่เกิดขึ้นในระหว่างช่วงที่มีการป้อนน้ำหนักทดสอบ
- *Total resilient modulus* เป็นค่าโมดูลัสคืนตัวที่คำนวณมาจากค่าการคืนตัวแนวราบ ทั้งที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงที่มีการป้อนน้ำหนักทดสอบ และรวมไปถึงการคืนตัวในระหว่างช่วงเวลาพัก (Rest time) จนกระทั่งถึงรอบการป้อนน้ำหนักครั้งต่อไป อาจกล่าวได้ว่าเป็นค่าการคืนตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้นในช่วง 1 รอบของการทดสอบ

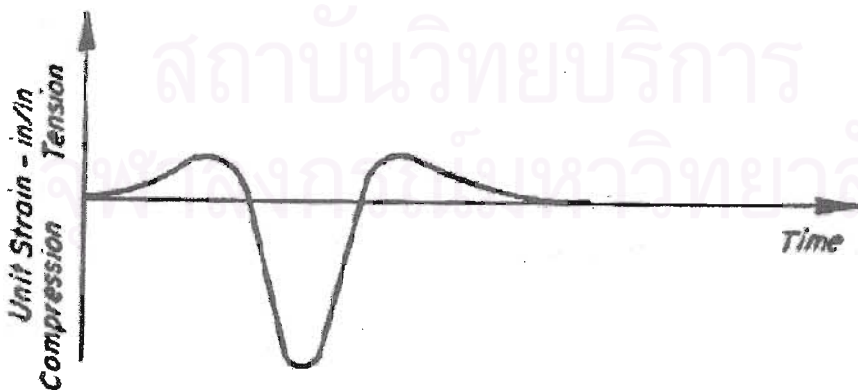
2.3.9.4.2 คุณสมบัติด้านความล้า (Fatigue property)

เป็นปรากฏการณ์การแตกร้าวของวัสดุผิวทางที่เกิดขึ้นภายใต้ความเค้นซึ่งพัฒนามาจากน้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) ที่มีระดับน้ำหนักน้อยกว่าค่า Tensile strength ของวัสดุ



รูปที่ 2.17 ลักษณะของ Repeated stress ที่เกิดบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

จากรูปที่ 2.17 ซึ่งแสดงลักษณะของ Repeated stress ที่เกิดขึ้นบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องมาจาก Moving axle load แสดงให้เห็น Compressive stress ที่เกิดขึ้นตรงจุดใต้ล้อบนผิวของแอสฟัลต์คอนกรีต ตรงกันข้ามกับบริเวณข้างเคียงล้อที่จะเกิดเป็น Tensile stress ค่า Maximum compressive strain ที่เกิดขึ้นจะมีค่าประมาณ 4-5 เท่าของ Tensile strain ดังแสดงในรูปที่ 2.18 แต่เมื่อพิจารณาที่ผิวด้านใต้ของแอสฟัลต์คอนกรีต ลักษณะที่เกิดขึ้นจะเป็นในทางตรงกันข้าม กล่าวคือค่า Maximum strain ที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นผลมาจาก Tension



รูปที่ 2.18 ค่าระดับของ Tensile stress และ Maximum compressive stress

ในเรื่องที่เกี่ยวกับคุณสมบัติด้านความล้า (Fatigue property) มีค่าศัพท์ 2 ค่าที่ต้องทราบ คือ Service life และ Fracture life สามารถให้คำนิยามได้ดังนี้

- *Service life หรือ Fatigue life* คือ จำนวนครั้งของ Repeated load ที่ทำให้ค่า Resilient Modulus (MR) ของแอสฟัลต์คอนกรีตลดลง 50 % จากค่า MR เริ่มต้นสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ หรือเป็นจำนวนครั้งของ Repeated load ที่ทำให้มีการเริ่มต้นของรอยแตกร้าว (Crack) เกิดขึ้นในแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการทดสอบในสนาม
- *Fracture life* คือ จำนวนครั้งของ Repeated load ที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวอย่างสมบูรณ์ (Completely fracture) ในแอสฟัลต์คอนกรีต

ทั้งค่า Service life และ Fracture life นั้นสามารถหาได้จากการทดสอบโดยการให้น้ำหนักในลักษณะต่าง ๆ (Load condition) ถ้าการป้อนน้ำหนักตลอดการทดสอบนั้นมีระดับที่คงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ จะเรียกว่าการป้อนน้ำหนักแบบ Simple loading แต่ถ้าลักษณะการป้อนน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ทำการทดสอบ จะเรียกว่าการป้อนน้ำหนักแบบ Compound loading การให้น้ำหนักในลักษณะนี้ไม่เพียงแต่มีการเปลี่ยนแปลงระดับ Stress เท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในระหว่างการทดสอบด้วย

รูปแบบการป้อนน้ำหนัก (Mode of loading)

สำหรับการทดสอบ Fatigue ในห้องปฏิบัติการมีการควบคุมการป้อนน้ำหนักอยู่ 2 วิธี คือ

- **แบบ Control stress** กระทำโดยการป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำในปริมาณคงที่ โดยปกติการทดสอบแบบนี้เหมาะสำหรับการใช้ทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะนำไปใช้ก่อสร้างถนนที่มีความหนาแน่น (มากกว่า 150 มิลลิเมตร)
- **แบบ Control strain** กระทำโดยการป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำในปริมาณที่ทำให้เกิด Repeated deformation หรือ Strain แก่ก้อนวัสดุทดสอบอย่างคงที่ โดยปกติการทดสอบแบบนี้เหมาะสำหรับการใช้ทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะนำไปใช้ก่อสร้างถนนที่มีความหนาน้อย (น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร)

2.3.10 การทดสอบโดย Dynamic Shear Rheometer (DSR)

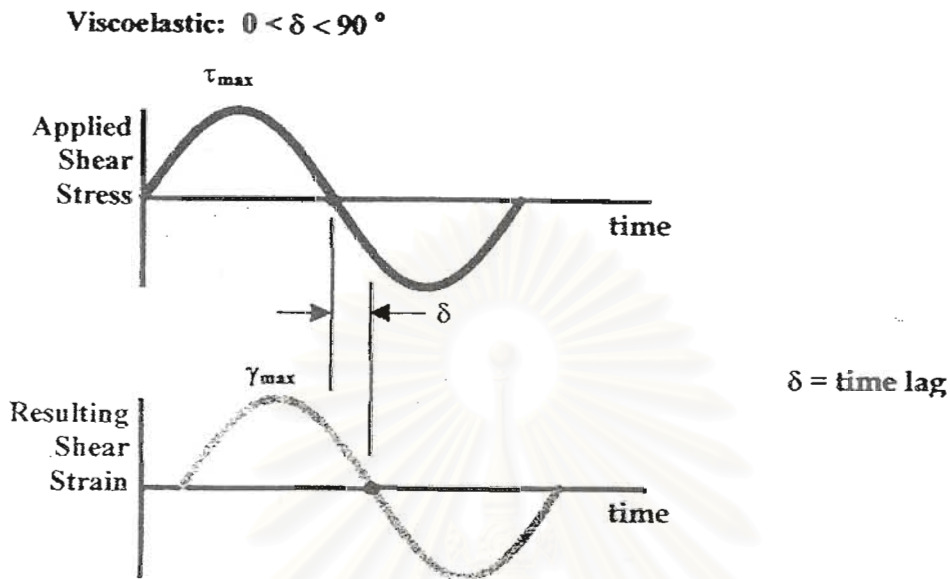
เครื่อง Dynamic Shear Rheometer (DSR) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาคุณสมบัติการไหลเชิง Rheology ของวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาของน้ำหนักที่มากกระทำ วัสดุเชื่อมประสานจะมีพฤติกรรมแบบ Visco-elastic กล่าวคือมีพฤติกรรมเป็นทั้งของเหลวหนืดและของแข็งยืดหยุ่น ตัวอย่างเช่น วัสดุแอสฟัลต์ ยาง โพลีเมอร์ และวัสดุโมดิไฟด์แอสฟัลต์ต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO TP5 หรือ ASTM P246 ที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (5–40 องศาเซลเซียส) และที่ช่วงอุณหภูมิสูง (46-85 องศาเซลเซียส) โดยมีหลักการทำงานของ การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.19 เครื่อง Dynamic Shear Rheometer (DSR)

จากการใช้เครื่องมือดังกล่าวในการทดสอบวัสดุจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ค่า G^* และค่า δ ซึ่งค่า G^* คือ Complex shear modulus ให้แสดงถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) ทั้งหมดของวัสดุเมื่อได้รับแรงเฉือนแบบกระทำซ้ำ (Repeated Shear) โดยมีค่าตั้งแต่ 100 Pa – 10 MPa ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็น Elastic (Recoverable) และส่วนที่เป็น Viscous (Non-Recoverable) โดยพฤติกรรมของวัสดุช่วง Elastic จะทำให้ได้ค่า G^* มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) ที่คงที่ เมื่อควบคุมด้วยหน่วยการเคลื่อนตัว (Strain Sweep

Control) ส่วน δ คือ Phase angle มีค่า $0 < \delta < 90$ องศา ใช้เป็นตัววัดถึงความสัมพันธ์ของ Deforming ระหว่าง Recoverable กับ Non-Recoverable ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และมีสูตรดังนี้



รูปที่ 2.20 ลักษณะของค่า Phase angle (δ)

$$G^* = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad (2.3)$$

ซึ่ง

$$\tau_{\max} = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (2.4)$$

และ

$$\gamma_{\max} = \frac{\theta r}{h} \quad (2.5)$$

การคำนวณค่า Dynamic modulus (E^*) สามารถใช้สูตร ดังนี้

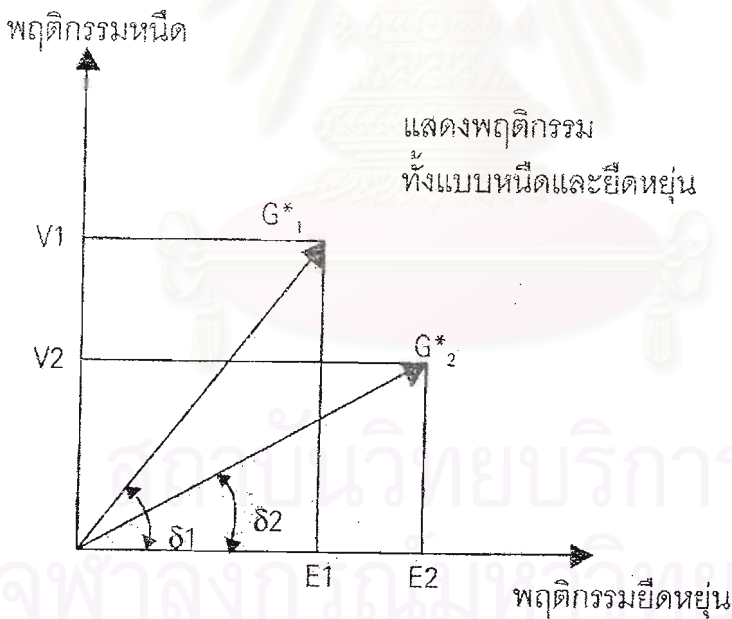
$$G^* = \frac{E^*}{2(1+\nu)} \quad (2.6)$$

โดยที่

τ	คือ	Shear stress
γ	คือ	Shear strain
T	คือ	Maximum applied torque

r	คือ	Radius of binder specimen/plate (12.5 or 4 mm)
h	คือ	Specimen height (1 or 2 mm)
ν	คือ	Poisson's Ratio
θ	คือ	Deflection (Rotation) angle
E^*	คือ	Dynamic modulus

โดยปกติค่า G^* จะหมายถึงความแข็งแรง (Stiffness) ของวัสดุ ส่วนค่า δ จะหมายถึงพฤติกรรมของวัสดุ เมื่อค่า δ มีมุน้อยเข้าใกล้ 0 องศา แสดงว่าวัสดุมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น ขณะที่ถ้าค่า δ มีมุนมากเข้าใกล้ 90 องศา แสดงว่าวัสดุมีพฤติกรรมแบบความหนืด สำหรับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั่วไป จะมีค่า δ อยู่ในช่วง 0-90 องศา โดยที่อุณหภูมิต่ำจะมีความยืดหยุ่นมากกว่า ค่า δ จะค่อนข้างต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิสูงจะเป็นแบบหนืดมากกว่า ค่า δ จะค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าวัสดุชนิดที่ 1 มีความแข็งแรงและหนืดกว่าวัสดุชนิดที่ 2 ที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า

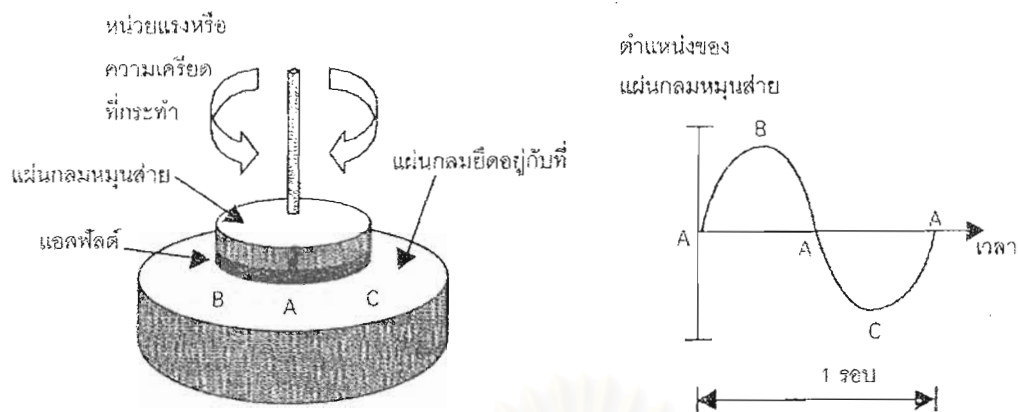


รูปที่ 2.21 ค่า Phase angle δ ที่สะท้อนถึงพฤติกรรมของวัสดุ

ดังนั้น ทั้งค่า G^* และค่า Phase angle (δ) จึงมีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อต้านทานต่อความเสียหายของถนนได้ ในกรณีการเสียหายที่เกิดจากการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) ที่อุณหภูมิสูงสุดเทียบเท่าอุณหภูมิของถนนที่ใช้งาน ข้อกำหนดระบุให้ใช้ค่า $G^*/\sin \delta$ เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบกำหนดความสามารถในการต้านทานต่อ

การยุบตัวแบบถาวร โดยทั่วไปวัสดุแอสฟัลต์จะต้องมีค่า $G^*/\sin \delta$ สูงกว่า 1.0 kPa และหลังจากผ่านการ Aging ระยะสั้นซึ่งเป็นการจำลองสภาพการ Aging ที่เกิดขึ้นระหว่างการผสมแอสฟัลต์กับวัสดุผสมรวมที่อุณหภูมิสูงด้วยเครื่อง Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) โดยเป็นการผ่านวัสดุแอสฟัลต์ในสภาพแผ่นฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 163 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 85 นาทีแล้ว ค่า $G^*/\sin \delta$ จะต้องไม่ต่ำกว่า 2.20 kPa ซึ่งพอจะเชื่อมั่นได้ว่าวัสดุแอสฟัลต์ดังกล่าวจะมีคุณสมบัติแข็งแรงเพียงพอที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในลักษณะการยุบตัวแบบถาวรที่อุณหภูมิการใช้งาน และเมื่อผิวถนนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เกิดการ Aging ของวัสดุแอสฟัลต์ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในระยะยาว เกิดสภาพแข็งเปราะทำให้เกิดความเสียหายในลักษณะการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) ได้ที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง ดังนั้นวัสดุแอสฟัลต์จะต้องได้รับการตรวจคุณสมบัติภายหลังจากการ Aging นี้ ซึ่งวัสดุแอสฟัลต์ที่ผ่าน RTFOT แล้วจะต้องนำมาผ่านเครื่อง Pressure Aging Vessel (PAV) โดยการผ่านวัสดุแอสฟัลต์ในสภาพแผ่นฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 90 – 100 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันออกซิเจนขนาด 2.07 MPa เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อเป็นการจำลองสภาพ Aging ของแอสฟัลต์บนถนน ทั้งนี้ข้อกำหนดระบุให้ใช้ค่า $G^* \sin \delta$ ที่ผ่านการ Aging ด้วยเครื่อง PAV ที่อุณหภูมิ 20 – 30 องศาเซลเซียส จะต้องไม่สูงเกินกว่า 5.0 MPa เพื่อให้แน่ใจว่าวัสดุแอสฟัลต์ที่จะนำมาใช้งานนั้น จะมีคุณสมบัติแข็งแรงเพียงพอต่อการต้านทานความเสียหายในลักษณะการยุบตัวแบบถาวร และเมื่อเกิดการ Aging ในระหว่างการใช้งานจะไม่มีผลให้เกิดความแข็งเปราะมากเกินไปจนกระทั่งทำให้เกิดความเสียหายในลักษณะของการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้

วิธีการทดสอบ ทำโดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อให้เหลวพอที่จะสามารถเทได้ เทลงบนแผ่น Plate ซึ่งถูกยึดแน่นให้คงที่ จากนั้นรอให้แอสฟัลต์ซีเมนต์แข็งตัวใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที เมื่อตัวอย่างแข็งตัวแล้วให้นำแผ่น Plate อีกแผ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร สำหรับใช้ในการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิสูงมาประกบในลักษณะแซนวิชหนา 1 มิลลิเมตร หรือใช้แผ่น Plate ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิปานกลาง มาประกบหนา 2 มิลลิเมตร ในระหว่างนั้นให้ปาดแอสฟัลต์ที่เกินออกจากแผ่น Plate โดยใช้ Trimmer ในการทำงานแผ่น Plate ตัวบนจะทำการส่ายไปมา (Oscillating) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 จากการให้ค่า Stress หรือ Strain ที่คงที่ในลักษณะของ Torque โดยใช้อัตราเร็ว 1.6 รอบต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าที่ใช้จำลองสภาพความเร็วของขดยานบนทางหลวงที่ความเร็ว 55 mph หรือ 90 km/hr หรือที่ความถี่ 10 Rad/Sec สำหรับการจราจรที่มีความเร็วสูง ๆ โดยเครื่องสามารถใช้ความถี่ได้ตั้งแต่ช่วง 1 – 100 Rad/Sec ซึ่งใน 1 Cycle ที่สมบูรณ์จะเป็นการเคลื่อนที่จากจุด A ไปจุด B และกลับมาที่จุด A และจากจุด A ไปจุด C และกลับมาที่จุด A อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 2.22 หลักการทำงานของเครื่องทดสอบ Dynamic Shear Rheometer (DSR)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการในการศึกษา

สำหรับวิธีการในการศึกษา ได้แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ประกอบด้วย การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมยางพาราในรูปของน้ำยางข้น วัสดุ PMA และวัสดุผสมรวม จากนั้นจะเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจากการบดอัดด้วยวิธีมาร์แชลและการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory compactor จากขนาดศิลปะของวัสดุผสมรวมที่ได้เลือกไว้ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงสำหรับชั้นผิวทาง สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางข้นในปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ และวัสดุ PMA นั้น ค่าที่จะนำมาศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ ค่า Indirect tensile strength ค่า Resilient Modulus (MR) ค่า Fatigue life และ ค่า Permanent deformation ที่ได้จากการใช้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM-5P) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยจะขอกล่าวรายละเอียดของขั้นตอนในการศึกษาต่าง ๆ ตามลำดับ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ลักษณะเครื่อง Universal Testing Machine (UTM-5P)

3.1 การเตรียมวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางข้น

วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง มาตรฐานเลขที่ มอก. 851-2542 นำแอสฟัลต์ซีเมนต์ดังกล่าวมาผสมกับยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของน้ำยางข้นในปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ เป็นวัสดุ Natural Rubber Asphalt (NRA) โดยน้ำยางข้นที่นำมาใช้ศึกษานี้เป็นน้ำยางข้นชนิดแอมโมเนียสูง (High Ammonia : HA) ที่ได้จากการบ่มให้มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% ตามมาตรฐาน มอก. 980-2533 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของน้ำยางข้นธรรมชาติชนิด HA

Properties	Unit	Test Results	ISO Limits
- Total Solid Content	% by weight	61.9	61.5 min.
- Dry Rubber Content	% by weight	60.42	60.0 min.
- Non Rubber Content	% by weight	1.27	2.0 max.
- Ammonia Content (on total weight)	% by weight	0.63	0.60 min.
- Ammonia Content (on water phase)	% by weight	1.64	0.60 min.
- Mechanical Stability time @ 5.5% TS	Sec.	1,108	650 min.
- Volatile Fatty Acid Number	VFA number	0.051	0.20 max.
- Potassium Hydroxide Number	KOH number	0.57	1.0 max.
- pH of Latex		10.05	
- Specific Gravity at 25 ^o C		0.942	
- Sludge Content	% (m/m)	0.002	0.10 max.
Coagulum Content	% (m/m)	0.001	0.05 max.
- Copper Content	mg/Kg of total solid	0.61	8.0 max.
- Manganese Content	mg/Kg of total solid	2.38	8.0 max.
Additional Test			
- Magnesium Content on Solid	ppm.	19	
- Viscosity at 61 TSC, 25 ^o C by Brookfield LVT			
Spindle No. 1			
Speed 6 rpm.	Cps.	155	
Speed 30 rpm.	Cps.	98	
Speed 60 rpm.	Cps.	735	

วิธีการผสมและข้อแนะนำ

- ให้ความร้อนแก่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์จนมีอุณหภูมิประมาณ 140 - 150 องศาเซลเซียส ด้วย Hot plate โดยปริมาณแอสฟัลต์ที่อยู่ในภาชนะที่ใช้ผสมควรมีระดับเพียง 2 ใน 3 ของภาชนะผสมเท่านั้น เพื่อเผื่อปริมาณของส่วนผสมที่จะเพิ่มขึ้นและฟองที่จะเกิดขึ้น จากนั้นทำการกวนแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูง (High shear rate mechanical mixer) ด้วยความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เครื่องผสมจะมีลักษณะใบพัดคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อใช้กวนและเฉือนอนุภาคของส่วนผสม จากนั้นจะตีย้อนกลับขึ้นมาที่ผิวหน้าและหมุนกวนกลับลงไปอีกครั้งเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันตลอดทั้งภาชนะ



รูปที่ 3.2 ลักษณะใบพัดของเครื่องผสมแรงเฉือนสูง

- ผสมน้ำยางข้นที่ได้ตรงไว้ลงไปในตัววัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยผสมอย่างช้า ๆ ในอัตราประมาณ 2 - 3 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการกวนส่วนผสมตลอดช่วงระยะเวลาการผสมและรักษา ระดับของอุณหภูมิที่ใช้ผสมไว้ให้คงที่ตลอด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทั้งนี้ต้องระวังการเติมน้ำยางข้นที่ละมาก ๆ เนื่องจากในน้ำยางข้นจะมีปริมาณน้ำอยู่เกือบ 40% และอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ซึ่งทำให้เกิดการเดือดฟุ้งพล่านและมีฟองในระหว่างการผสม อาจก่อให้เกิดอันตรายได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

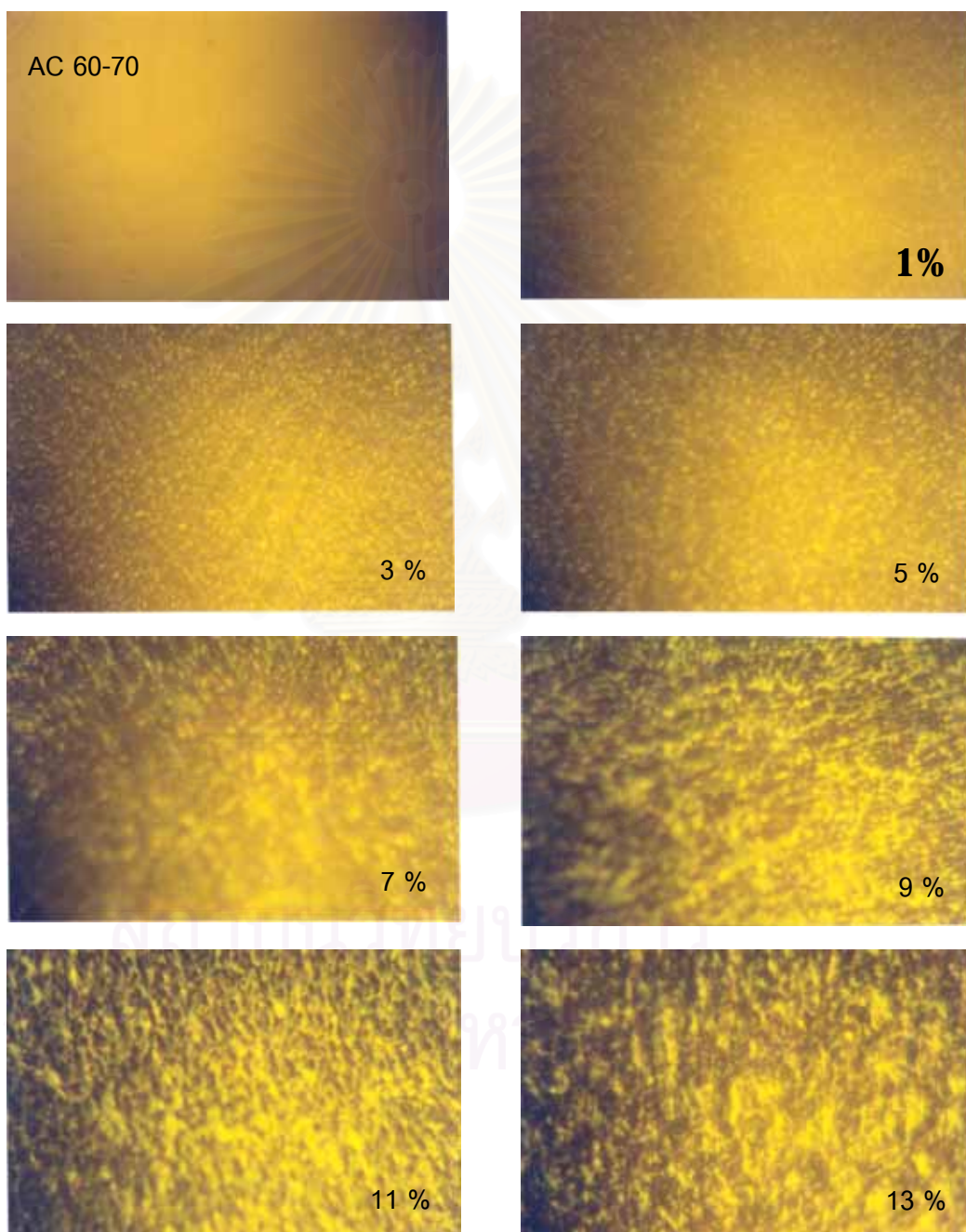


รูปที่ 3.3 การผสมน้ำยางข้นกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์



รูปที่ 3.4 ลักษณะของส่วนผสมเมื่อน้ำยางข้นเกิดการเดือดและไต่ขึ้นแกนเครื่องผสม

- เมื่อผสมน้ำยางขึ้นหมดแล้ว จะต้องกวนต่ออีกประมาณ 20 - 30 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 40 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.5 หากส่วนผสมเข้ากันดีอนุภาคของเนื้อยางจะมีลักษณะกระจายเป็นจุดเล็ก ๆ อยู่ทั่วไปในวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์

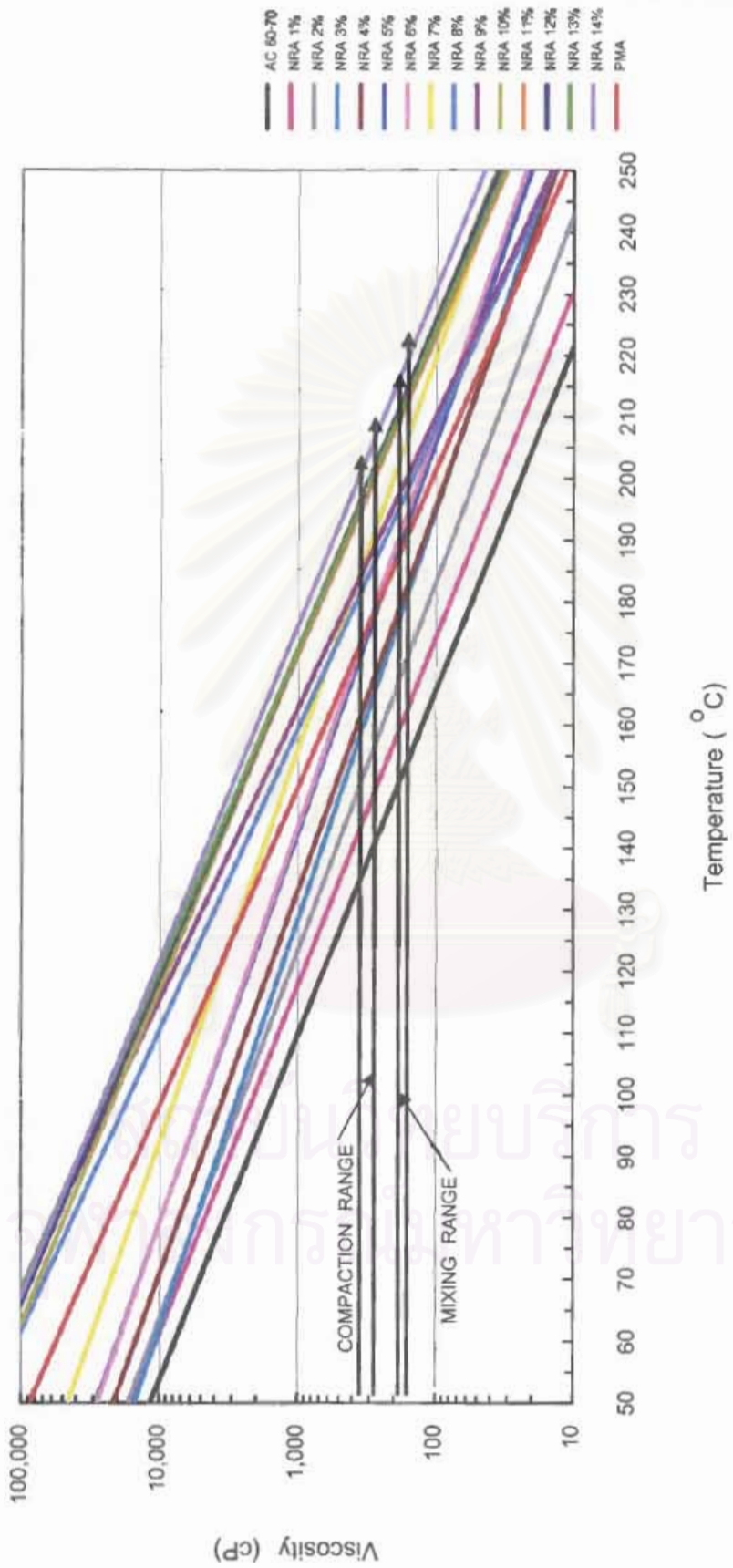


รูปที่ 3.5 ตัวอย่างสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่าของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ และวัสดุ NRA ที่ปริมาณน้ำยางขึ้นสัดส่วนต่าง ๆ

- การผสมน้ำยางข้นในปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนผสมจะมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันลดลง จากภาพพื้นฐานวิทยาดังกล่าวจะเห็นว่าอนุภาคเนื้อยางใหญ่ขึ้น และภาพรวมของส่วนผสมมีลักษณะหยาบขึ้น ดังนั้น เมื่อผสมน้ำยางข้นในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจึงต้องใช้คุณสมบัติในการผสมสูงขึ้นเพื่อให้ส่วนผสมมีความเหลวพอที่จะผสมจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้มากที่สุด อีกทั้งเพื่อให้ส่วนผสมมีค่าความหนืดในการผสมใกล้เคียงกับค่าความหนืดที่ใช้ผสมวัสดุแอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทาง (Guideline) ในการพิจารณาใช้คุณสมบัติสำหรับผสมวัสดุ NRA ที่ปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ หรือ วัสดุ PMA กับวัสดุมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อใช้งานต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ

- เหตุที่อุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์ช่วงเริ่มต้นในการผสมควรอยู่ในช่วง 140 – 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำยางชั้นจะสามารถละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับแอสฟัลต์ได้ดี แม้ว่าช่วงอุณหภูมิ 80 – 90 องศาเซลเซียส วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์จะสามารถเหลวและไหลได้อีกทั้งอุณหภูมิดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำในน้ำยางชั้น ซึ่งอาจสามารถลดการพวยพุ่งของฟองได้ก็ตาม แต่จากการทดลองเริ่มผสมที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก คือช่วง 85 – 95 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเทน้ำยางชั้นลงไปในแอสฟัลต์ซีเมนต์ น้ำยางชั้นจะลอยและมีลักษณะเป็นสายสีขาวหมุนวนอยู่ที่ผิวหน้า ไม่สามารถละลายเข้ากับแอสฟัลต์ได้ทันที ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งหลังจากนั้นหากพยายามเติมน้ำยางเพิ่มลงไป เมื่ออุณหภูมิในการผสมเริ่มสูงขึ้น น้ำยางชั้นซึ่งลอยสะสมอยู่ที่ผิวหน้าของส่วนผสมจะเริ่มปะทุและเดือดเนื่องจากน้ำในน้ำยางและจะได้แกว่งเครื่องผสมขึ้นมาดังในรูปที่ 3.4 ที่ได้แสดงไปแล้วข้างต้น ทำให้ต้องหยุดเครื่องและใช้เวลานานมากขึ้นในการรอให้ฟองของส่วนผสมเริ่มยุบตัวลง จึงจะสามารถผสมน้ำยางชั้นครั้งใหม่ลงไปได้ ดังนั้น จึงควรเริ่มต้นผสมที่ช่วงอุณหภูมิ 140 – 150 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อผสมน้ำยางชั้นลงไปปริมาณน้อย ๆ ส่วนผสมจะมีการเดือดขึ้นเล็กน้อยพอที่จะสามารถควบคุมได้ และเมื่อส่วนที่เป็นน้ำระเหยหมด เนื้อยางจะมีลักษณะเป็นสายสีขาวซึ่งถูกใบพัดเขี่ยและกวนผสมรวมกับแอสฟัลต์ได้ในทันที



รูปที่ 3.7 ลักษณะของเนื้อยางที่ลอยบนผิวหน้าของส่วนผสม

- ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ไม่ควรวีให้ความร้อนแก่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ในช่วงเริ่มต้นสูงเกิน 175 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้แอสฟัลต์เกิดการ Aging และอาจทำให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์เสื่อมสภาพได้ อีกทั้งในขณะที่ทำการผสมน้ำยางชั้นลงไป จะต้องควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินกว่า 270 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าว จะทำให้เนื้อยางพาราเริ่มเสื่อมสภาพ (Degradation) และเมื่ออุณหภูมิถึงช่วง 360–380 องศาเซลเซียส เนื้อยางพาราจะเสียหาย (Breakdown) ทันที

ในการศึกษานี้ ได้ทดลองผสมน้ำยางชั้นในปริมาณเริ่มต้นที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักรวม จากนั้นได้ผสมน้ำยางชั้นเพิ่มขึ้นทีละ 1% จนสามารถผสมน้ำยางชั้นได้มากที่สุดที่ร้อยละ 14 โดยน้ำหนักรวม เนื่องจากปัญหาในการผสมดังได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการผสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการผสมน้ำยางชั้นกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์
ที่ปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ กัน

ปริมาณน้ำยางชั้น	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)
1 %	155 – 165	35
2 %	160 - 165	40
3 %	160 – 170	45
4 %	165 – 175	70
5 %	165 – 175	105
6 %	170 – 180	145
7 %	170 – 180	180
8 %	175 – 180	200
9 %	175 – 185	210
10 %	180 - 190	230
11 %	185 – 195	250
12 %	190 - 200	260
13 %	190 - 200	270
14 %	210 - 215	300

3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 วัสดุ NRA และวัสดุ PMA ที่ได้จากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับวัสดุโพลีเมอร์ชนิด Styrene Butadiene Styrene (SBS) ที่มีจำหน่ายและใช้งานในประเทศไทย โดยวัสดุทั้ง 3 ชนิดนี้ เรียกว่า วัสดุเชื่อมประสาน (Binders) สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน จะใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 ธรรมดา และวัสดุ PMA เป็นวัสดุควบคุม (Control binder) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวัสดุ NRA

ในการทดสอบทั้งหมดจะแยกออกเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ยังไม่ผ่านการอบด้วย Thin Film Oven Test (TFOT) และกากที่เหลือจากการอบด้วย Thin Film Oven Test (TFOT) ซึ่งการอบด้วย TFOT ก็เพื่อที่จะจำลองสภาพการเกิด Aging เนื่องจากความร้อนของวัสดุเชื่อมประสาน สำหรับค่า Dynamic shear stiffness ที่ได้จากการใช้เครื่อง Dynamic Shear Rheometer (DSR) จะทำการทดสอบทั้งในช่วงอุณหภูมิปานกลาง ได้แก่ 20 25 30 35 และ 40 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิสูง ได้แก่ 46 52 58 64 70 และ 76 องศาเซลเซียส ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT วัสดุเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิดจะได้รับการทดสอบคุณสมบัติ ต่าง ๆ ดังรายละเอียดที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.3 ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 851-2542 และมาตรฐาน ทล.-ก. 408/2536 ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง

ตารางที่ 3.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

ลำดับที่	คุณลักษณะ	วิธีการทดสอบ
1	Penetration at 25°C, 100 gm., 5 sec	DH-T 403
2	Softening point, Ring and Ball	ASTM D36
3	Penetration Index	NTL-181
4	Ductility at 13°C, 5 cm/min	DH-T 405
5	Ductility at 25°C, 5 cm/min	DH-T 405
6	Torsional recovery at 25°C	NTL-329
7	Float test at 60°C	ASTM D139
8	Toughness/Tenacity test, 25°C Toughness Tenacity	ESM NE-31
9	Brookfield viscosity, Shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21 135°C at 165°C	ASTM D4402
10	Storage stability at 165°C, 120 hrs Difference in softening point	NTL-328
11	Density at 25°C	ASTM D70
12	Specific Gravity at 25°C	ASTM D70
13	Flash point, Cleveland Open Cup	ASTM D92
14	Fire point, Cleveland Open Cup	ASTM D92
15	Solubility in trichloroethylene	DH-T 409
16	Dynamic shear stiffness 20, 25, 30, 35 40, 46, 52, 58, 64, 70 และ 76° C	AASHTO TP5
Test On Residue From Thin Film Oven Test		
17	Dynamic shear stiffness 20, 25, 30, 35 40, 46, 52, 58, 64, 70 และ 76° C	AASHTO TP5
18	Weight loss	ASTM D1754
19	Retained penetration at 25°C	DH-T 403
20	Variation in softening point	ASTM D36
21	Ductility at 13°C, 5 cm/min	DH-T405
22	Ductility at 25°C, 5 cm/min	DH-T405
23	Torsional recovery at 25°C	NTL-329

3.3 การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

ทั้งวัสดุมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด จะได้รับการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 การตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบ

คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และค่าการดูดซึม (Absorption)	ASTM C127
ค่าความสึกหรอ (Los Angeles abrasion)	ASTM C131 หรือ ทล.-ท.202/2515
ค่าความคงทน (Soundness)	AASHTO T104 หรือ ทล.-ท.213/2531
แอสฟัลต์ที่เคลือบผิว (Coating)	AASHTO T182
ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index : FI)	ทล.-ท.210/2518
ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index : EI)	ทล.-ท.211/2518

ตารางที่ 3.5 การตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด

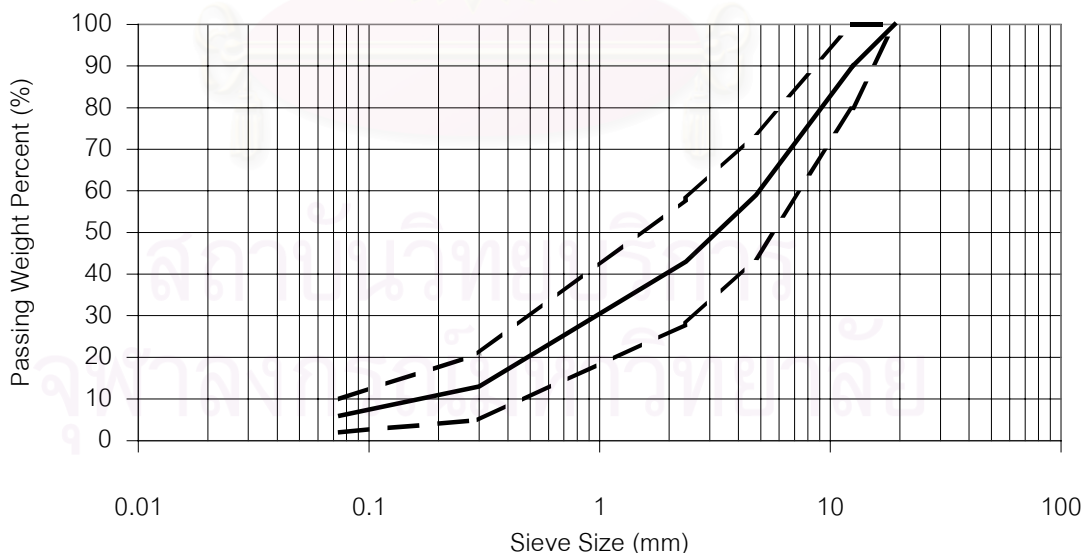
คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และค่าการดูดซึม (Absorption)	ASTM C128
ค่าสมมูลย์ของทราย (Sand equivalent)	AASHTO T176 หรือ ทล.-ท.203/2515
ค่าความคงทน (Soundness)	AASHTO T104 หรือ ทล.-ท.213/2531

3.4 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

ขนาดคละ (Gradation) ของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นไปตามขนาดคละสำหรับชั้นผิวทางตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวัสดุมวลรวมมีขนาด 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.6 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร นิ้ว	12.5 1/2
สำหรับชั้นทาง		Wearing course
ความหนา	มิลลิเมตร	40 - 70
ขนาดตะแกรง	มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
19	(3/4)	100
12.5	(1/2)	80 - 100
9.5	(3/8)	-
4.75	(เบอร์ 4)	44 - 74
2.36	(เบอร์ 8)	28 - 58
1.18	(เบอร์ 16)	-
0.6	(เบอร์ 30)	-
0.3	(เบอร์ 50)	5 - 21
0.15	(เบอร์ 100)	-
0.075	(เบอร์ 200)	2 - 10
ปริมาณแอสฟัลต์ร้อยละโดยมวลของมวลรวม		3.0 - 7.0



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุมวลรวม

3.5 การเตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น จะทำการผสมวัสดุเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิดกับวัสดุมวลรวมที่ได้รับการทดสอบคุณสมบัติและมีขนาดคละดังที่ได้แสดงไว้แล้วข้างต้น โดยทำการผสมแบบร้อน (Hot mix) เพื่อเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ในการเตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

3.5.1 การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

ทำการบดอัดส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชล โดยใช้จำนวนรอบการบดอัดตามเกณฑ์เทียบเท่าที่ปริมาณการจราจรสูง (Heavy traffic criteria) ดังแสดงในตารางที่ 2.6 ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานวิธีทดสอบ ทล.-ท. 604/2517 ของกรมทางหลวง โดยใช้แบบหล่อ (Mold) ขนาด 4 นิ้ว หรือ 101.6 มิลลิเมตร เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content) ที่ค่าร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) เท่ากับ 4 รวมทั้งพิจารณาสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิด ได้แก่

- ค่า Unit weight
- ค่า Marshall stability
- ค่า Marshall flow
- ค่า % VFA
- ค่า % VMA

การบดอัดและทดสอบคุณสมบัติตามวิธีมาร์แชลนั้น ก็เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content) และพิจารณาว่าวัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวเมื่อนำไปเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว สามารถผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดนำไปใช้งานจริงได้ในประเทศไทย ซึ่งในปัจจุบันยังคงใช้วิธีมาร์แชลนี้สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดแล้ว จะทำการบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory compactor เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไป

3.5.2 การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเครื่อง Gyratory compactor

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลแล้ว เลือกค่าที่ครอบคลุมอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content) อย่างน้อย 3 ค่าและทำการบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่อง Gyratory compactor เพื่อให้ได้ร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) เท่ากับ 7 ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณช่องว่างอากาศของผิวทางที่ก่อสร้างเสร็จใหม่โดยทั่วไป ใช้ Mold ขนาด 4 นิ้ว หรือ 101.6 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไป โดยจะต้องบันทึกข้อมูลทางกายภาพของก้อนตัวอย่างก่อนทดสอบทุกครั้ง ได้แก่ น้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย และความสูงเฉลี่ย เป็นต้น สำหรับจำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละส่วนผสม ได้แสดงรายละเอียดดังในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

รายการศึกษาเปรียบเทียบ	อย่างน้อย 3 Binder content
วิธีมาร์แชล	อย่างน้อย 18 ก้อนตัวอย่าง
การทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength)	Binder content ละ 3 ก้อนตัวอย่าง
ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus : MR)	Binder content ละ 3 ก้อนตัวอย่าง
ค่า Fatigue life	Binder content ละ 3 ก้อนตัวอย่าง
ค่า Permanent deformation	Binder content ละ 3 ก้อนตัวอย่าง

นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบการหลุดลอก (Stripping test) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้ค่า Optimum binder content ของแต่ละส่วนผสม มาทำการผสมและบดอัดให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีค่า Theoretical maximum specific gravity และค่า Bulk specific gravity ที่เท่า ๆ กัน และปริมาณช่องว่างอากาศของก้อนตัวอย่างจะต้องอยู่ในช่วง 7 ± 1.0 % จำนวน 6 ก้อนตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 3 ก้อนตัวอย่าง คือ กลุ่ม Unconditioned และกลุ่ม Conditioned

ดังนั้น สรุปจำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดในแต่ละส่วนผสม คือ

$$18 + 3*(3+3+3+3) + 6 = 60 \text{ ก้อนตัวอย่าง}$$

3.6 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต

หลังจากเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามหัวข้อ 3.5 แล้ว ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยเครื่อง UTM-5P โดยค่าที่จะนำมาทดสอบศึกษาเปรียบเทียบ มีดังนี้

3.6.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการกำหนดระดับการป้อนน้ำหนักรในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยวิธีใช้แรงดึงทางอ้อม สำหรับวิธีการทดสอบได้อ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T283 "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage" ซึ่งกำหนดให้ใช้อัตราการป้อนน้ำหนักรให้เกิดการยุบตัวคงที่เท่ากับ 0.8333 มิลลิเมตร/วินาที หรือ 2 นิ้ว/นาที่ ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างทดสอบได้แสดงในรูปที่ 3.9 โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนก้อนตัวอย่างเกิดการพังทลายแตกเสียหาย ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความต้านทานหรือค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดได้จากสูตร

$$IDT = \frac{F}{A} = \frac{F}{(\pi DT)/2} \quad (3.1)$$

เมื่อ

IDT	=	หน่วยแรงดึงสูงสุด Indirect tensile strength (MPa)
F	=	แรงที่กระทำสูงสุด (N)
A	=	พื้นที่รองรับแรงดึงทางอ้อม (ตารางมิลลิเมตร)
T	=	ความหนา (มิลลิเมตร)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.9 ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดึงทางอ้อม

3.6.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus : MR) โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D4123-82 “Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures” และ AASHTO TP31-94 “Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension” ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 15 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งจะป้อนน้ำหนักกระทำดังตารางที่ 3.8 โดยจะจัดวางก้อนตัวอย่างในเครื่องทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ตารางที่ 3.8 ค่าหน่วยแรงที่ใช้สำหรับการทดสอบ MR ที่แต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	หน่วยแรงที่กระทำ (% ของ IDT)
15	25
25	20
35	15
45	10

รูปแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) ในรูปแบบ Haversine wave ทุก ๆ 1 วินาที (1 Hz.) ซึ่งเป็นค่าที่ ASTM D4123 แนะนำว่าเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดจากปริมาณจราจร แบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และช่วงเวลาพัก 0.9 วินาที ก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนจะทำการทดสอบ 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันในแนวเดียวกับแนวการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยจะทำการหยุดการทดสอบเมื่อจำนวนครั้งของการกดน้ำหนักถึงรอบที่ 150 เนื่องจากมาตรฐานการทดสอบบ่งชี้ว่า จำนวนครั้งดังกล่าวระดับค่าโมดูลัสคืนตัวจะอยู่ในช่วงที่คงที่ ค่าโมดูลัสคืนตัวนี้จะได้จากค่าเฉลี่ยของ 5 ค่าสุดท้าย ในการทดสอบนี้จะพิจารณาเฉพาะ Instantaneous resilient modulus

การคำนวณค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) จำเป็นที่จะต้องทราบค่าทั้ง Horizontal deformation และ Vertical deformation แต่เนื่องจากขีดจำกัดในเรื่องเครื่องมือและความซับซ้อนในการคำนวณ รวมทั้งคำแนะนำจากมาตรฐานการทดสอบ ดังนั้นจึงกำหนดให้ใช้ค่าสัดส่วนปัวซองเท่ากับ 0.35 สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 15 และ 25 องศาเซลเซียส และใช้ค่าสัดส่วนปัวซองเท่ากับ 0.40 สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส

3.6.3 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความล้า

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติความต้านทานต่อความล้า (Fatigue properties) ที่เกิดขึ้นกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม เนื่องจากการทดสอบความล้าไม่มีมาตรฐานวิธีการทดสอบที่แน่นอน การศึกษาครั้งนี้จึงกำหนดรูปแบบและลักษณะการป้อนน้ำหนักเช่นเดียวกับการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยให้น้ำหนักกระทำซ้ำที่ควบคุมหน่วยแรงคงที่ (Constant stress) จนกระทั่งก้อนตัวอย่างมีค่าโมดูลัสคืนตัวลดลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นหรือก้อนตัวอย่างเกิดความเสียหาย ขึ้นอยู่กับว่าเหตุการณ์ใดจะ

เกิดขึ้นก่อน การทดสอบจะกระทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพียงอุณหภูมิเดียว โดยใช้ค่าหน่วยแรงที่กระทำเท่ากับ 0.25 MPa ซึ่งก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

3.6.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวร

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (Permanent deformation) โดยใช้การทดสอบแบบ Repeated uniaxial loading strain test (Dynamic creep test) ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกน (Axial load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐานการทดสอบของประเทศออสเตรเลีย AS 2891.12.1-1995 “Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt : Dynamic Creep Test” ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic creep test

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

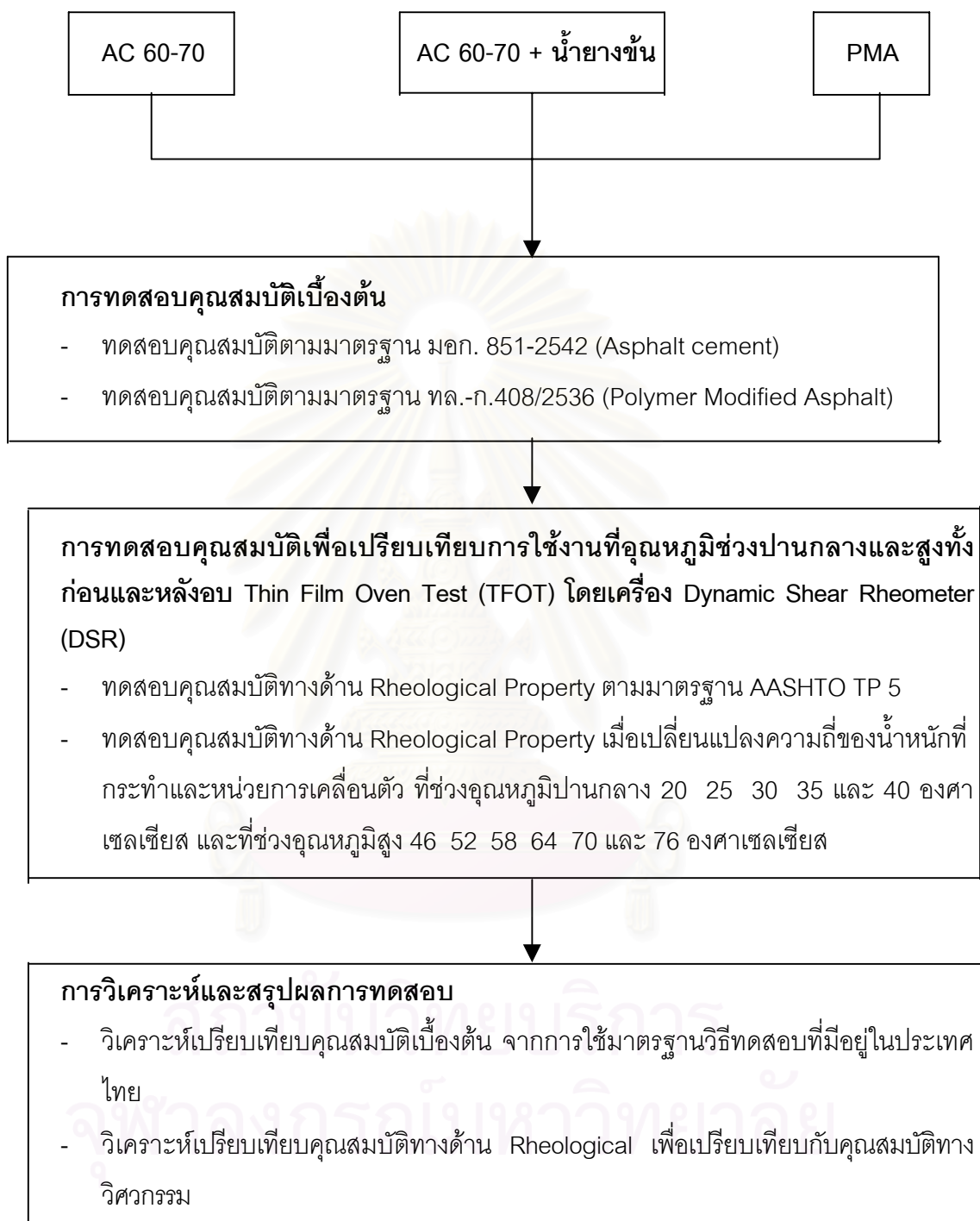
ก่อนที่จะนำก้อนตัวอย่างเข้าห้องควบคุมอุณหภูมิ จะต้องทาผิวหน้าก้อนตัวอย่างด้วย Silicone heat transfer compound ทั้ง 2 ด้าน เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างก้อนตัวอย่างกับชุดทดสอบ ซึ่งมาตรฐาน AS แนะนำให้ใช้ปริมาณ 1 กรัม สำหรับก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และ 2.25 กรัม สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร

ค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนหรือค่าการยุบตัวในการทดสอบจะถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducers (LVDT's) 2 ชุด ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของก้อนตัวอย่าง เพื่อเป็นการวัดการยุบตัวในทิศทางเดียวกับน้ำหนักที่กระทำ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปของค่าความเครียดสะสม (Accumulated strain) ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการป้อนน้ำหนัก การทดสอบจะดำเนินไปจนกระทั่งค่าความเครียดสะสม มีค่าเท่ากับ 10,000 Microstrain หรือ มีการยุบตัวคิดเป็น 1 % ของความหนาของก้อนตัวอย่าง

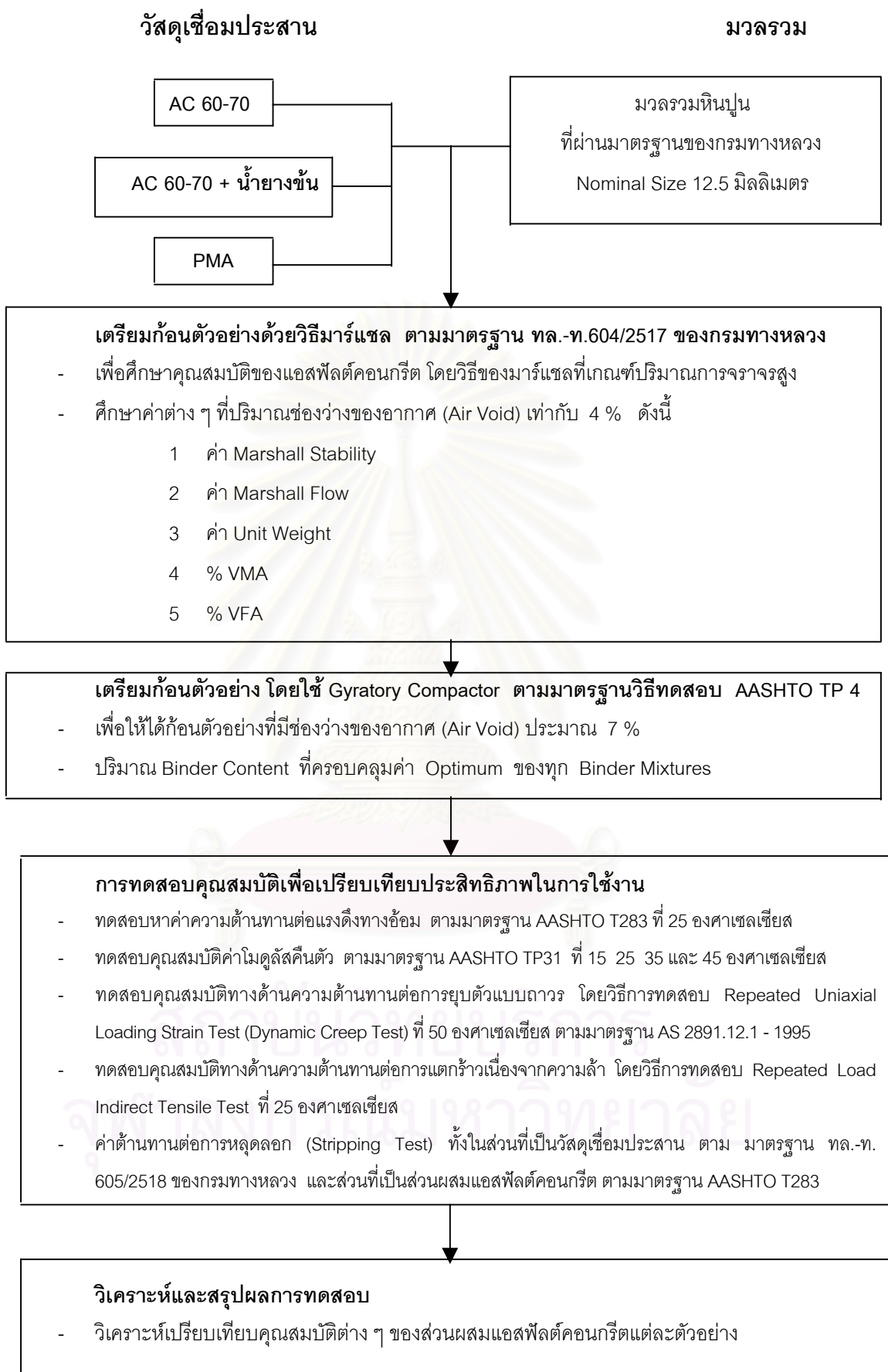
การศึกษาทั้งหมดสามารถแสดงผังโปรแกรมการศึกษาดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7 แนวทางในการดำเนินการศึกษา



รูปที่ 3.11 ผังโปรแกรมการศึกษาการทดสอบส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน



รูปที่ 3.12 ผังโปรแกรมการศึกษาการทดสอบส่วนที่เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสาน (Binders) ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา ชนิดเกรด 60-70 วัสดุ NRA และวัสดุ PMA ที่ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.1 และได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่าง ๆ กับปริมาณสัดส่วนของน้ำยางชั้นที่ผสมลงไปในวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.15

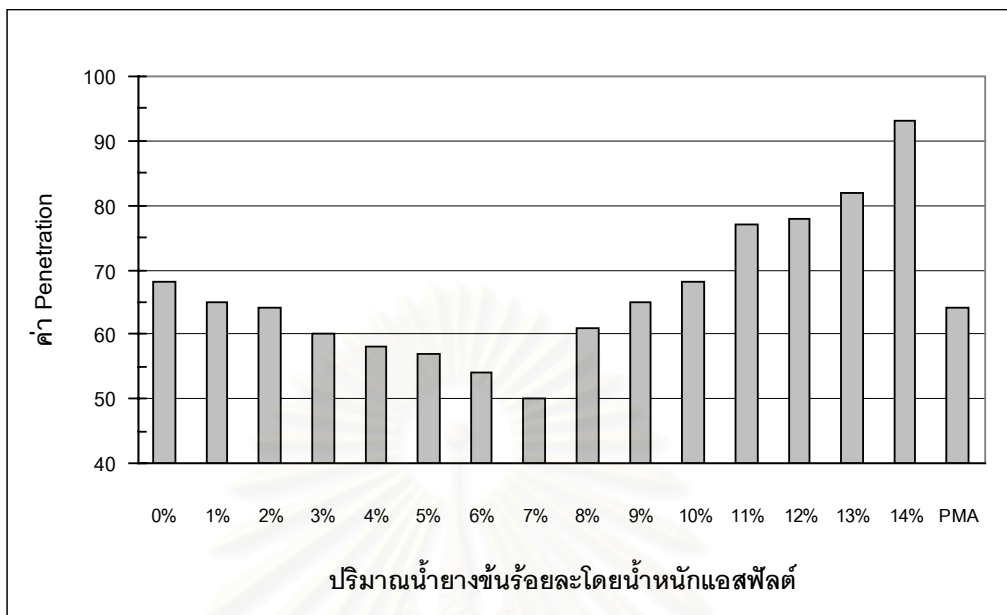


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

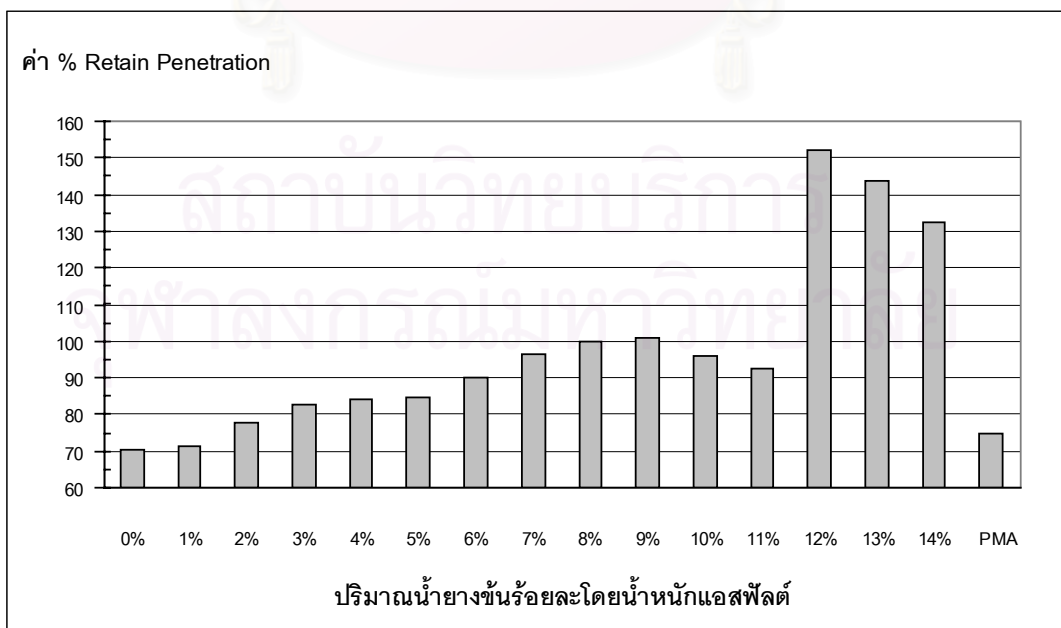
No	Properties	Unit	Min	Max	AC 6070	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA	
1	Penetration at 25°C, 100 gm., 5 sec	0.1 mm	60	70	68	65	64	60	58	57	54	50	61	65	68	77	78	82	93	64	
2	Softening point, Ring and Ball	°C	70		48	47.5	49	50	50.5	50.5	52	55	57.5	58	59.5	58	57.5	60	58.5	88.5	
3	Penetration Index	-	33.0		-0.96	-1.22	-0.91	-0.81	-0.77	-0.75	-0.49	0.02	1.07	1.27	1.78	1.79	1.76	2.47	2.54	6.12	
4	Ductility at 13°C, 5 cm/min	cm	65		> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	125.9	104.2	101.8	85.8	64.6	49.3	31.1	24.8	117	
5	Ductility at 25°C, 5 cm/min	cm	100		> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	137.9	110.8	93.6	53.3	> 150	
6	Torsional recovery at 25°C	%	70		3.33	3.89	5.83	11.39	13.06	15.00	16.39	26.25	27.22	28.33	25.00	22.36	23.33	22.64	17.50	85.00	
7	Float test at 60°C	sec	9000		326.00	373.00	375.68	484.59	519.71	687.64	734.62	1417.17	1506.80	1605.78	1758.58	2003.28	2561.35	2578.23	2565.34	> 3000	
8	Toughness/Tenacity test, 25°C																				
	Toughness	Kg.cm	200		52.460	101.094	106.704	113.244	148.284	152.070	155.872	160.400	170.365	203.566	211.420	189.294	149.189	145.027	135.267	380.667	
	Tenacity	Kg.cm	100		19.535	49.650	48.263	53.016	69.878	78.832	82.225	84.466	89.184	102.790	145.033	98.900	84.680	81.321	74.913	340.267	
9	Brookfield viscosity, Shear rate 18.6 s-1, spindle 21 at 135°C	cP	1100		352.5	492.5	635.0	792.5	930.0	1307.0	1345.0	2120.0	3140.0	3845.0	4680.0	4995.0	5020.0	5190.0	5680.0	1934.0	
	at 165°C	cP	300		102.5	145.0	200.0	280.0	307.5	440.0	460.0	717.5	765.0	895.0	1315.0	1320.0	1370.0	1377.5	1600.0	506.0	
10	Storage stability at 165°C, 120 hrs	°C																			
	Difference in softening point	°C			1.5	3.5	2.0	0.5	1.0	1.5	1.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.5	1.5	1.0	1.0	
11	Density at 25°C	gm/cc	1.000	1.050	1.029	1.032	1.035	1.027	1.030	1.029	1.027	1.020	1.012	1.017	1.009	1.015	1.011	1.012	1.001	1.020	
12	Specific Gravity at 25°C		1.003	1.053	1.032	1.035	1.038	1.030	1.033	1.032	1.030	1.023	1.015	1.020	1.012	1.018	1.014	1.015	1.004	1.023	
13	Flash point, Cleveland Open Cup	°C	220		330	351	354	350	348	340	344	332	323	328	325	322	318	322	315	328	
14	Fire point, Cleveland Open Cup	°C	220		368	390	392	377	371	368	370	365	353	358	348	349	356	352	348	351	
15	Solubility in trichloroethylene	% wt.	99.0		99.93	99.99	99.97	99.96	99.94	99.95	99.98	99.86	99.86	99.85	99.83	99.93	99.96	99.86	99.84	99.90	
Test On Residue From Thin Film Oven Test																					
16	Weight loss	% wt.		0.6	0.05	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.06	0.04	0.02	0.03	0.09	0.02	0.03	0.05	0.13	
17	Retained penetration at 25°C	%	70		70.59	71.40	77.60	82.78	83.91	84.80	90.18	96.69	100.00	100.86	96.08	92.67	152.14	143.94	132.57	75.00	
18	Variation in softening point	°C	4	4.6	+4.5	+3.5	+4.0	+3.0	+1.5	+1.0	0.0	+1.0	-2.0	-1.5	-3.0	-2.5	-1.5	-2.0	-4.5	-2.0	
19	Ductility at 13°C, 5 cm/min	cm	40		15.1	61.0	52.1	49.2	45.5	41.5	38.3	37.0	35.9	32.0	31.4	29.1	26.2	22.8	13.9	84.4	
20	Ductility at 25°C, 5 cm/min	cm	50		> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	131.1	104.8	44.4	22.7	> 150	
21	Torsional recovery at 25°C	%	60		2.78	2.78	3.33	6.11	7.50	8.33	13.06	13.89	20.97	24.44	24.44	21.39	21.67	22.22	10.14	75.14	

4.1.1 การทดสอบ Penetration



รูปที่ 4.1 ค่า Penetration ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

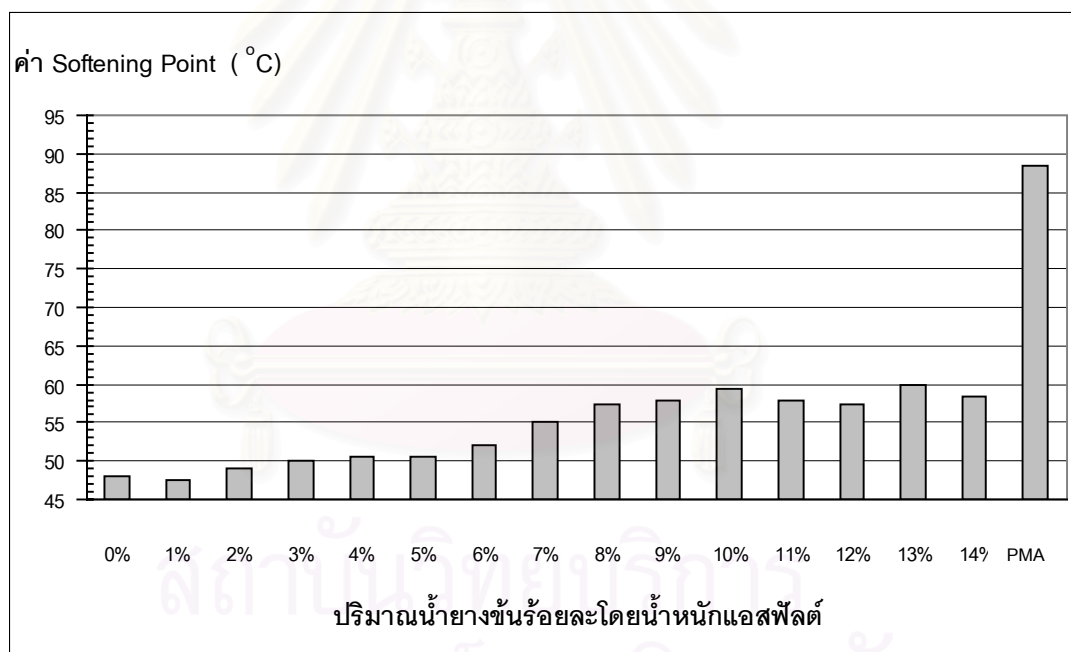
จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผสมน้ำยางชั้นลงไปในแอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณที่มากขึ้น ค่า Penetration มีแนวโน้มลดลงกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ค่าน้ำยางชั้นร้อยละ 7 หลังจากนั้นค่า Penetration มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการผสมน้ำยางชั้นในปริมาณที่มากขึ้น อาจทำให้ส่วนผสมไม่สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีพอ ส่วนที่เป็นยางพาราอาจแยกชั้นและลอยอยู่เหนือส่วนผสมทำให้มีความอ่อนนุ่ม ค่า Penetration จึงสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ร้อยละ 11-14 ค่าสูงเกินเกณฑ์เกรด 60-70



รูปที่ 4.2 ค่า % Retain Penetration ที่ผ่านการอบด้วย TFOT

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อส่วนผสมมีปริมาณน้ำยางชั้นผสมเกินร้อยละ 11 ขึ้นไป จะทำให้ค่าคงเหลือของการทดสอบ Penetration (Retain Penetration) ที่ผ่านการอบด้วย Thin Film Oven Test (TFOT) มีค่ามากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวัสดุควบคุม 2 ชนิด คือวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา กับวัสดุ PMA พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางชั้นลงไป ในส่วนผสม จะช่วยลดการเกิดภาวะ Aging ของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบด้วย TFOT ได้มากขึ้น โดยพิจารณาจากค่า Retain Penetration ที่แสดงค่าเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์หลังจากการ Aging ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงค่าเกรดของวัสดุเชื่อมประสานนั้นมีความแตกต่างกันน้อยลงเมื่อใส่สารผสมเพิ่มลงไป โดยภาวะ Aging นี้จะทำให้วัสดุมีสภาพแข็งเปราะขึ้น ขาดความยืดหยุ่นและเกิดการแตกร้าวได้ในภายหลัง รวมทั้งการยึดจับกับมวลรวมที่แสดงถึงความคงทน (Durability) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะลดลงด้วย

4.1.2 การทดสอบจุดอ่อนตัว

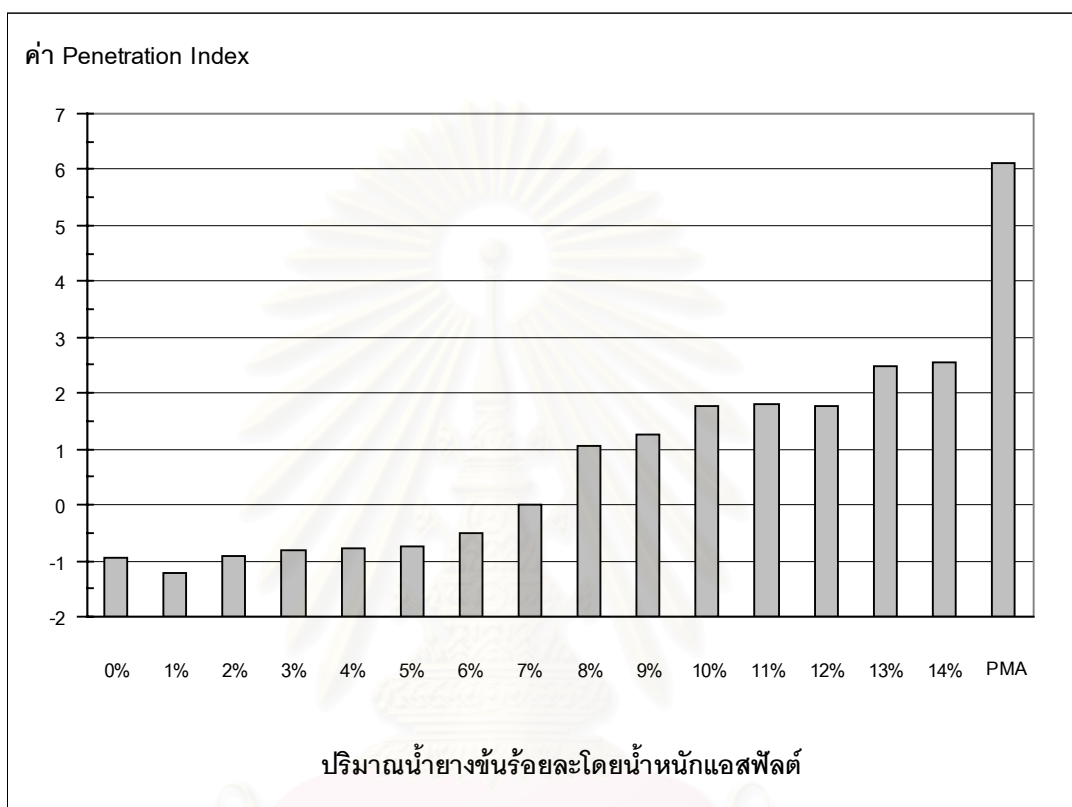


รูปที่ 4.3 ค่าจุดอ่อนตัว

ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของน้ำยางชั้นที่ผสมลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค่าจุดอ่อนตัวที่สูงเพิ่มขึ้นนี้จะสามารถช่วยให้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ที่อุณหภูมิสูงได้ดีขึ้นและช่วยป้องกันการเกิดการไหลเอิ้มของส่วนผสมได้ โดยที่ปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 13 แสดงค่าจุดอ่อนตัวที่สูงกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาถึง 25 เปอร์เซ็นต์ และแม้ว่าการผสมน้ำยางชั้นที่ปริมาณดังกล่าวสามารถ

ช่วยเพิ่มค่าจุดอ่อนตัวแก่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ก็ตาม แต่ก็ยังไม่สามารถแสดงค่าสูงเทียบเท่ากับวัสดุ PMA ได้

4.1.3 การทดสอบ Penetration Index (PI)

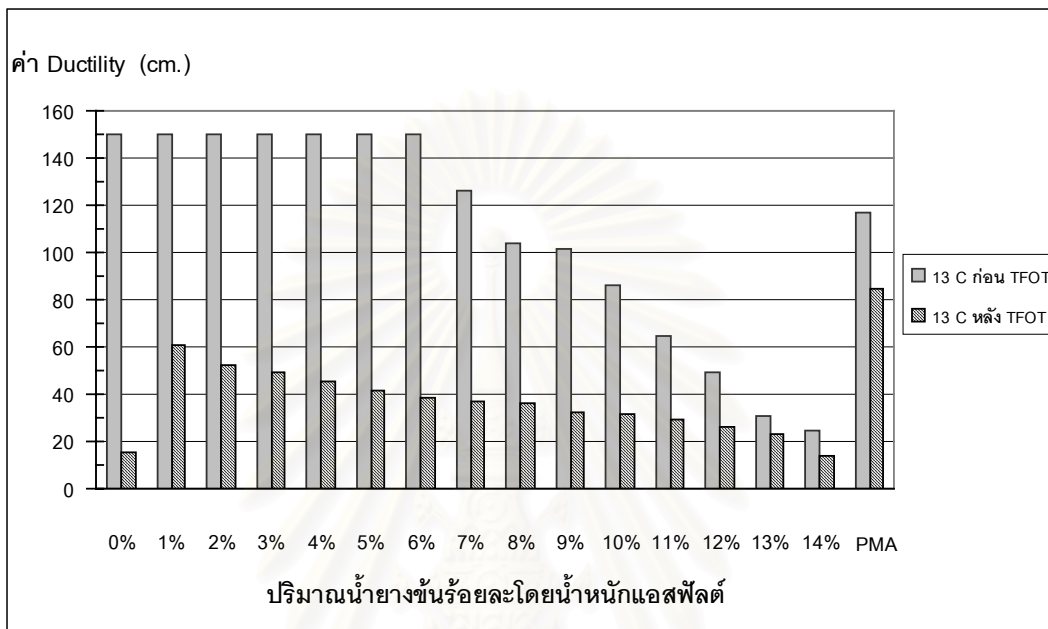


รูปที่ 4.4 ค่า Penetration Index (PI)

ค่า Penetration Index (PI) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Penetration กับค่าจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งหากอยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดเวลา เช่น อุณหภูมิในผิวทางตอนกลางวันอาจสูงถึง 60 องศาเซลเซียส ขณะที่ตอนกลางคืนอาจมีอุณหภูมิต่ำลงถึง -5 องศาเซลเซียส สภาพแวดล้อมเช่นนี้จะทำให้วัสดุผิวทางเกิดการเสียหายได้ ถ้าค่า PI ต่ำหรือติดลบแสดงว่าวัสดุชนิดนั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูง แต่ถ้าค่า PI สูงหรือมีค่าเป็นบวก กล่าวคือวัสดุนั้นมีสภาพค่อนข้างคงที่ไม่ว่าอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใดก็ตาม ซึ่งนั่นเป็นวัสดุที่พึงประสงค์ในงานทาง ส่วนค่า PI ที่มีค่าเป็น 0 จะอยู่ระหว่างวัสดุ 2 ประเภทดังกล่าว โดยทั่วไป วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา จะมีค่า PI ติดลบดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อผสมน้ำยางชั้นเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า PI สูงขึ้นเช่นเดียวกัน นั่นแสดงว่า น้ำยางชั้น

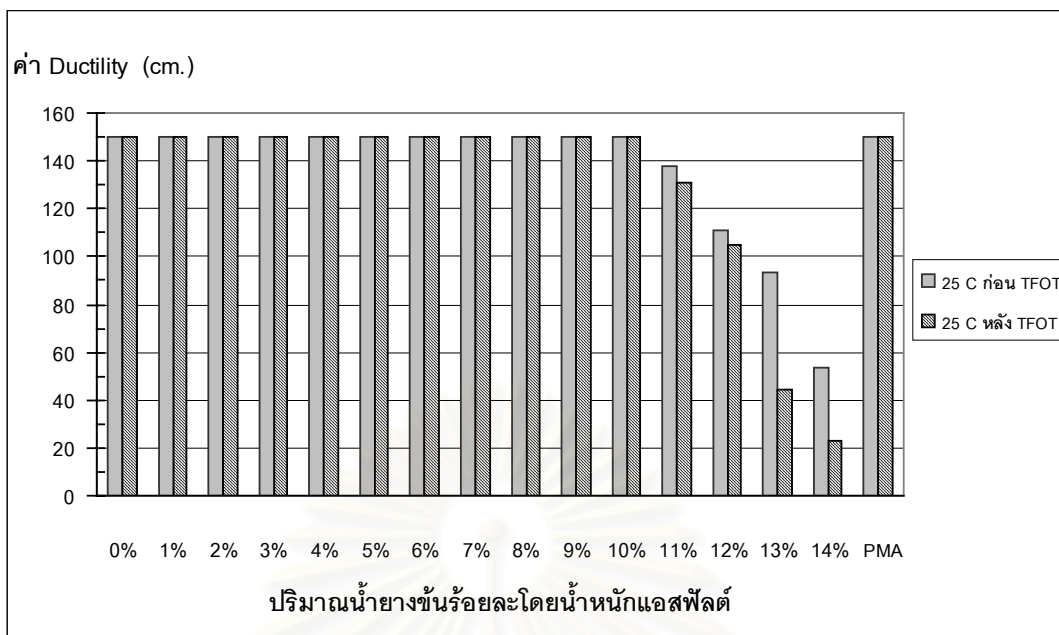
สามารถช่วยลดความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PMA จะเห็นได้ว่า วัสดุ PMA แสดงค่า PI ที่สูงกว่าวัสดุ NRA ค่อนข้างมาก

4.1.4 การทดสอบการยืดดึง



รูปที่ 4.5 ค่าการยืดดึงที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

สำหรับความสามารถยืดดึง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า การทดสอบก่อนการอบด้วย TFOT เมื่อผสมน้ำยางชั้นเกินร้อยละ 7 ค่าการยืดดึงมีแนวโน้มลดลง ขณะที่หลังจากการอบด้วย TFOT ค่าการยืดดึงจะเพิ่มขึ้นทันทีที่ผสมปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 1 หลังจากนั้นจะลดลงตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมเพิ่มลงไป อย่างไรก็ตาม ยังคงแสดงค่าการยืดดึงที่สูงกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา นั่นคือ หลังการ Aging ที่อุณหภูมิต่ำ วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีลักษณะแข็งเปราะสูง ดังนั้นการผสมน้ำยางชั้นเป็นสารผสมเพิ่มจะช่วยให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความสามารถในการยืดดึงดีขึ้น ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติดังกล่าวได้ชัดเจนกว่าการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม วัสดุ PMA ยังคงแสดงค่าการยืดดึงทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT ที่สูงกว่าทั้งวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาและวัสดุ NRA ค่อนข้างมาก

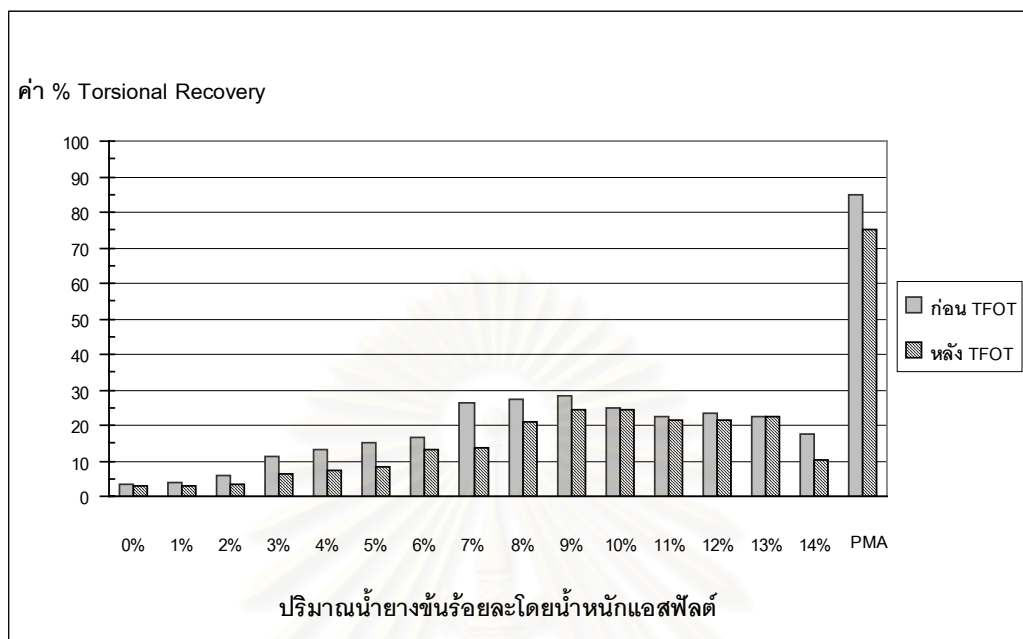


รูปที่ 4.6 ค่าการยืดดึงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าการยืดดึงมีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.6 นั่นคือเมื่อผสมน้ำยางชั้นในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 10 ค่าการยืดดึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจากการทดสอบทั้ง 2 อุณหภูมิอาจมีสาเหตุจากความเปราะบางของส่วนผสมลดลง และเมื่อนำส่วนผสมที่ผ่านการอบด้วย TFOT ซึ่งเป็นการจำลองสภาพ Aging ของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์มาทดสอบ พบว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา มีค่าการยืดดึงต่ำกว่าก่อนอบมากและมีค่าความแตกต่างกันระหว่างก่อนอบและหลังอบสูง เนื่องจากวัสดุมีสภาพแข็งเปราะมากขึ้นและความยืดหยุ่นน้อยลง แต่เมื่อผสมน้ำยางชั้นลงไปช่วยให้ค่าความแตกต่างกันดังกล่าวลดลง ขณะที่วัสดุ PMA ยังคงแสดงค่าการยืดดึงที่สูงกว่ามาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.5 การทดสอบสมบัติการคืนตัวกลับ

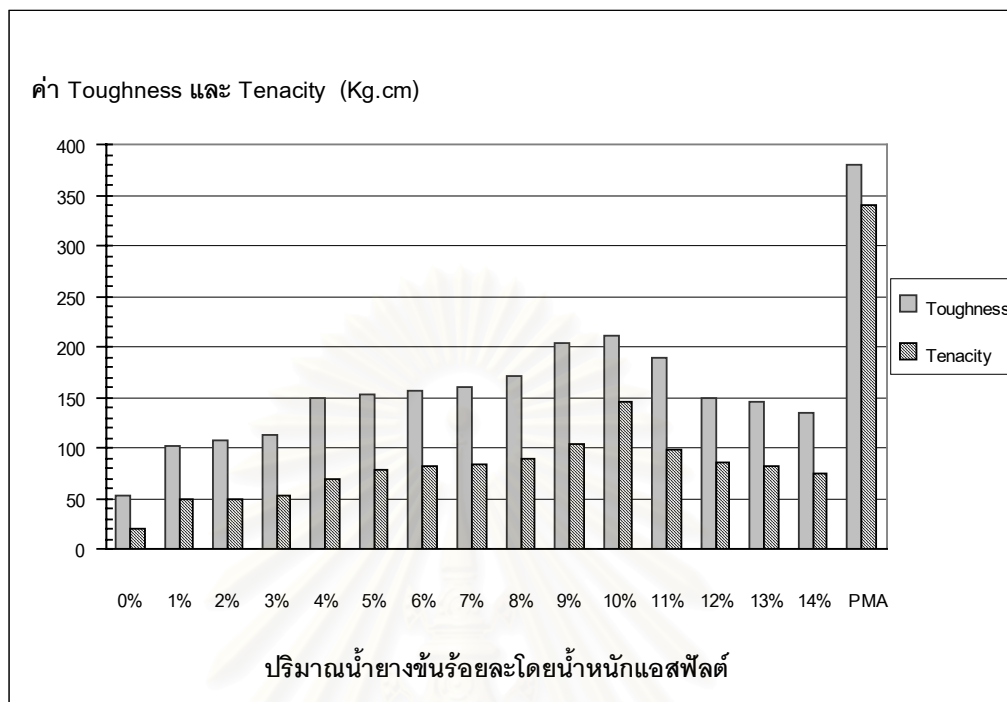


รูปที่ 4.7 ค่าร้อยละการคืนตัวกลับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละการคืนตัวกลับ (% Torsional Recovery) ซึ่งเป็นการวัดคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ พบว่ามีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งเมื่อปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมมีค่าเกินร้อยละ 9 ค่าร้อยละการคืนตัวกลับมีค่าลดลงเล็กน้อยและคงที่ อีกทั้งมีค่าความแตกต่างระหว่างก่อนอบและหลังอบด้วย TFOT ไม่มากนัก นั่นคือน้ำยางชั้นช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและช่วยลดภาวะ Aging แก้ววัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ PMA จะเห็นได้ว่า วัสดุ PMA แสดงค่าการคืนตัวกลับที่สูงกว่าวัสดุ NRA ค่อนข้างมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

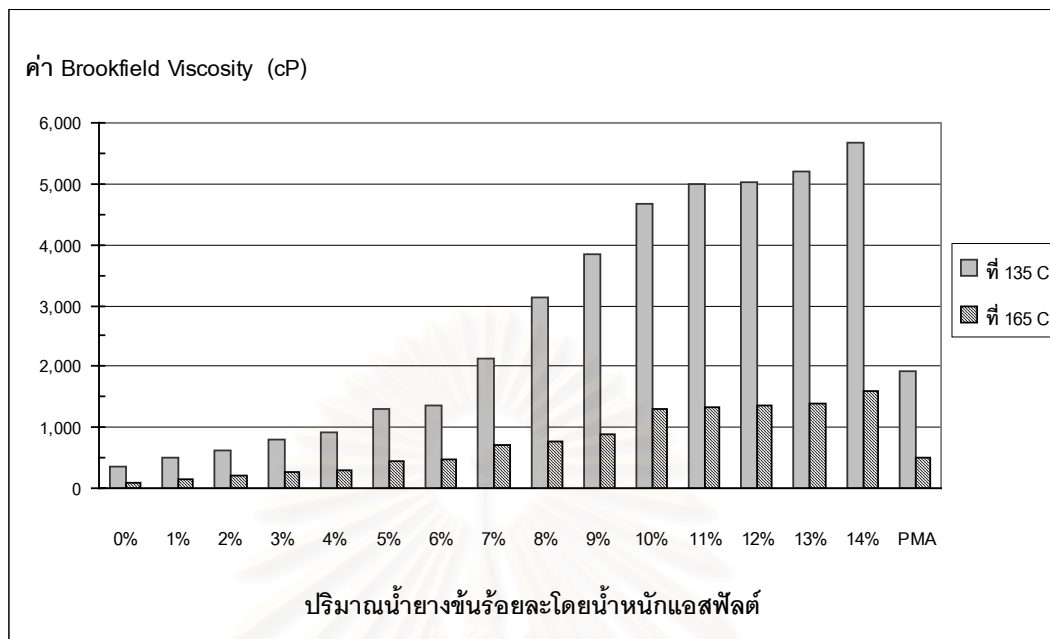
4.1.6 การทดสอบ Toughness และ Tenacity



รูปที่ 4.8 ค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการวัดคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ พบว่ามีแนวโน้มของการทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบค่าการคืนตัวกลับ กล่าวคือ มีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 10 จากนั้นค่า Toughness และ Tenacity มีค่าลดลงเล็กน้อยและคงที่ ขณะที่วัสดุ PMA ยังแสดงค่าที่สูงมากเช่นเดิม

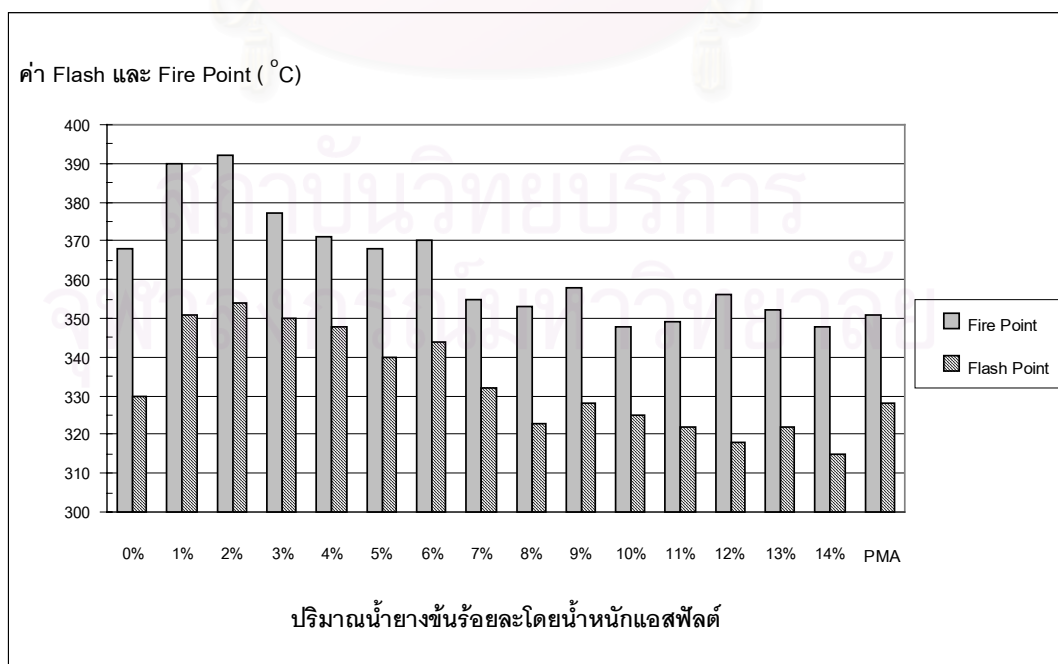
4.1.7 การทดสอบความหนืดแบบ Brookfield



รูปที่ 4.9 ค่าความหนืดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส

เมื่อผสมน้ำยางชั้นในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้วัสดุ NRA มีความหนืดสูงขึ้นด้วย ขณะที่วัสดุ PMA มีความหนืดไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา การวัดค่าความหนืดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9

4.1.8 การทดสอบจุดติดไฟและจุดวาบไฟ

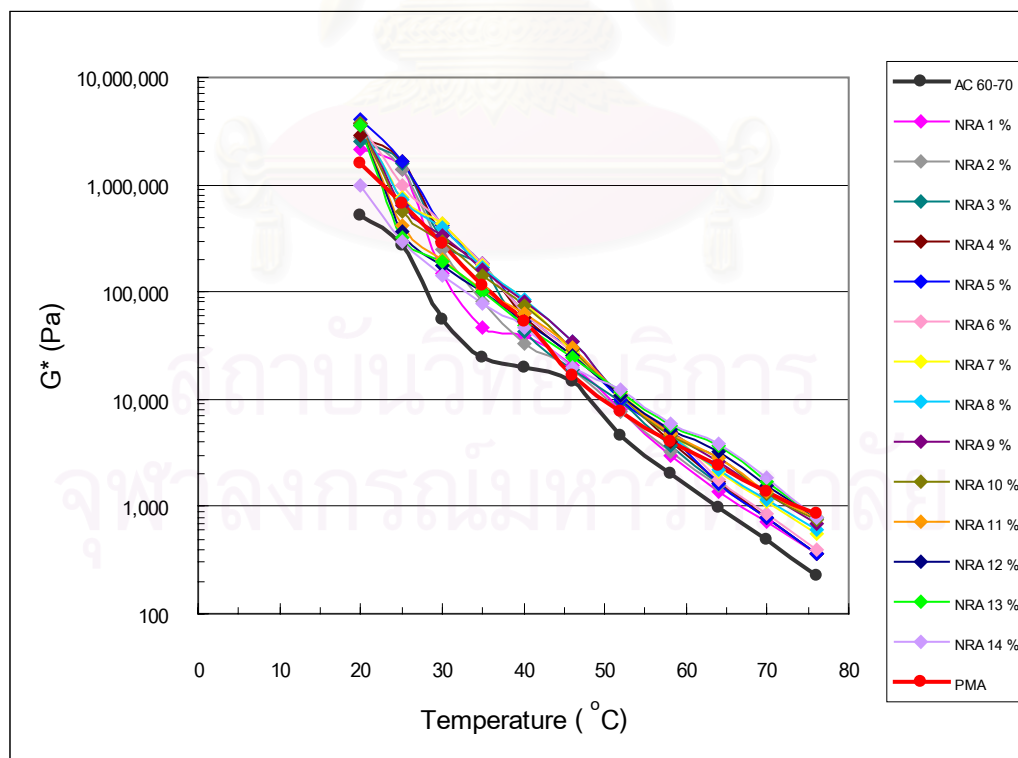


รูปที่ 4.10 จุดวาบไฟและจุดติดไฟของวัสดุเชื่อมประสาน

จากการผสมน้ำยางข้นลงไปไนวัสดุเอสพีดีซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่า มีการเปลี่ยนแปลงของค่าจุดวาบไฟ (Flash point) และจุดติดไฟ (Fire point) โดยเมื่อทำการทดสอบวัสดุเชื่อมประสานทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จากนั้นเปรียบเทียบกับวัสดุเอสพีดีซีเมนต์ธรรมดาพบว่า การผสมน้ำยางข้นช่วยเพิ่มจุดวาบไฟ แต่หากผสมน้ำยางข้นในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 8 แล้วจะทำให้จุดวาบไฟมีแนวโน้มลดลง ขณะที่จุดติดไฟมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำยางข้นที่ผสมลงไป เช่นเดียวกับวัสดุ PMA นั่นคือ การใส่วัสดุโพลีเมอร์หรือยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่มในวัสดุเอสพีดีซีเมนต์ จะทำให้วัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวมีโอกาสติดไฟได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้คือต้องไม่น้อยกว่า 220 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานวัสดุเชื่อมประสานประเภทนี้

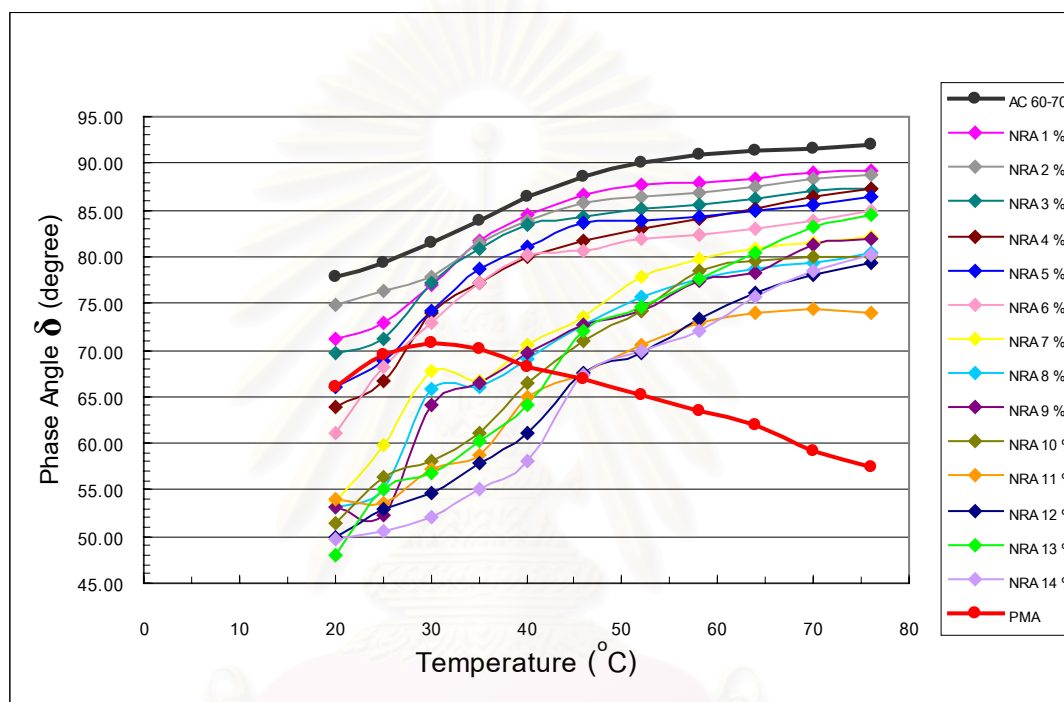
4.1.9 การทดสอบ Dynamic shear stiffness

สำหรับการทดสอบ Dynamic shear stiffness ของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT ด้วยเครื่อง Dynamic Shear Rheometer (DSR) เพื่อทำการวัดค่า Complex shear modulus (G^*) และค่ามุม Phase angle (δ) ของวัสดุ



รูปที่ 4.11 ค่า G^* ของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.11 พบว่าการผสมปริมาณน้ำยางชั้นทุกระดับจะทำให้ได้ค่า G^* ที่สูงกว่าวัสดุ แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา สำหรับในช่วงอุณหภูมิปานกลางคือ 20 - 40 องศาเซลเซียส ค่า G^* จะสูงขึ้นถึงที่ปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 5 - 6 หลังจากนั้นแนวโน้มลดลง แต่ในช่วงอุณหภูมิสูงคือ 46 - 76 องศาเซลเซียส ค่า G^* กลับเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไป ขณะที่วัสดุ PMA มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับวัสดุ NRA เพียงแต่ในช่วงอุณหภูมิปานกลางวัสดุ NRA มีค่า G^* ที่สูงกว่ากระทั่งถึงอุณหภูมิที่ 76 องศาเซลเซียส วัสดุ PMA จึงมีค่า G^* ใกล้เคียงกับวัสดุ NRA ที่ร้อยละ 14

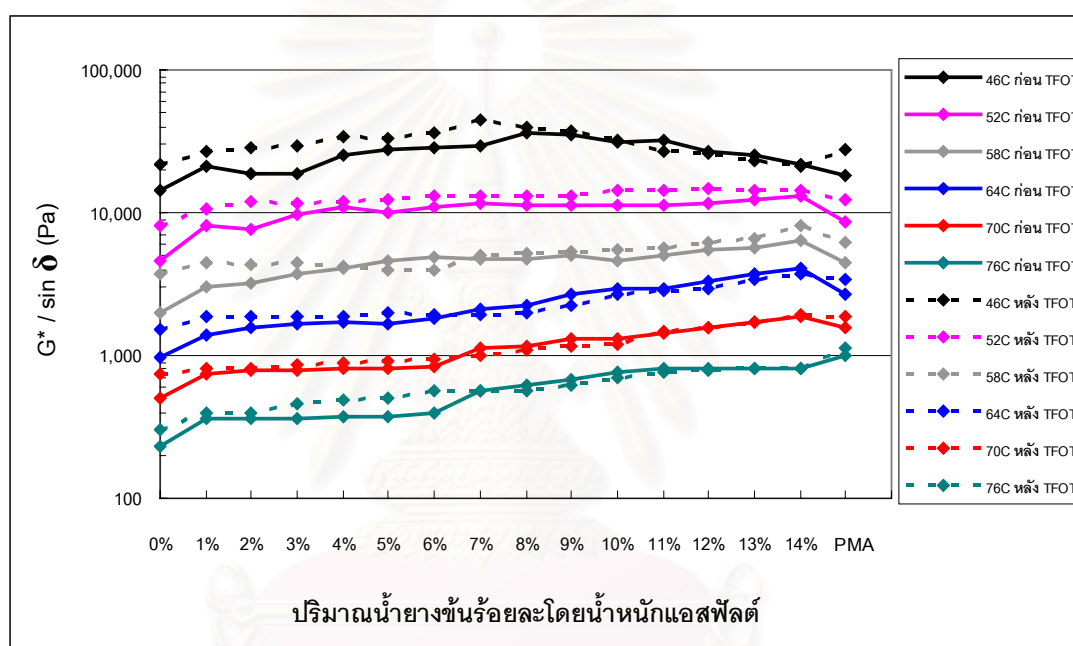


รูปที่ 4.12 ค่ามุม Phase angle (δ) ของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ค่ามุม δ มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไปจากการพิจารณา ณ ที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยวัสดุ NRA ที่ร้อยละ 14 แสดงค่ามุม δ ต่ำที่สุดในช่วงอุณหภูมิปานกลาง และวัสดุ NRA ที่ร้อยละ 11 แสดงค่ามุม δ ต่ำที่สุดในช่วงอุณหภูมิสูง ขณะที่วัสดุ PMA กลับแสดงค่ามุม δ ที่ผกผันกับอุณหภูมิ นั่นคือค่ามุม δ มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งมีทิศทางแตกต่างจากวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาและวัสดุ NRA นั่นแสดงให้เห็นว่า วัสดุโพลิเมอร์ที่ผสมลงไปแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถช่วยให้วัสดุมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นอย่างมากแม้ที่อุณหภูมิสูง

การปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยน้ำยางข้นก็เพื่อต้องการให้วัสดุนั้นมีค่า G^* เพิ่มมากขึ้นในขณะเดียวกันมีค่ามุม δ ที่ลดลง นั่นหมายความว่าวัสดุนั้นมีความแข็งแกร่ง (Stiffness) และมีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง

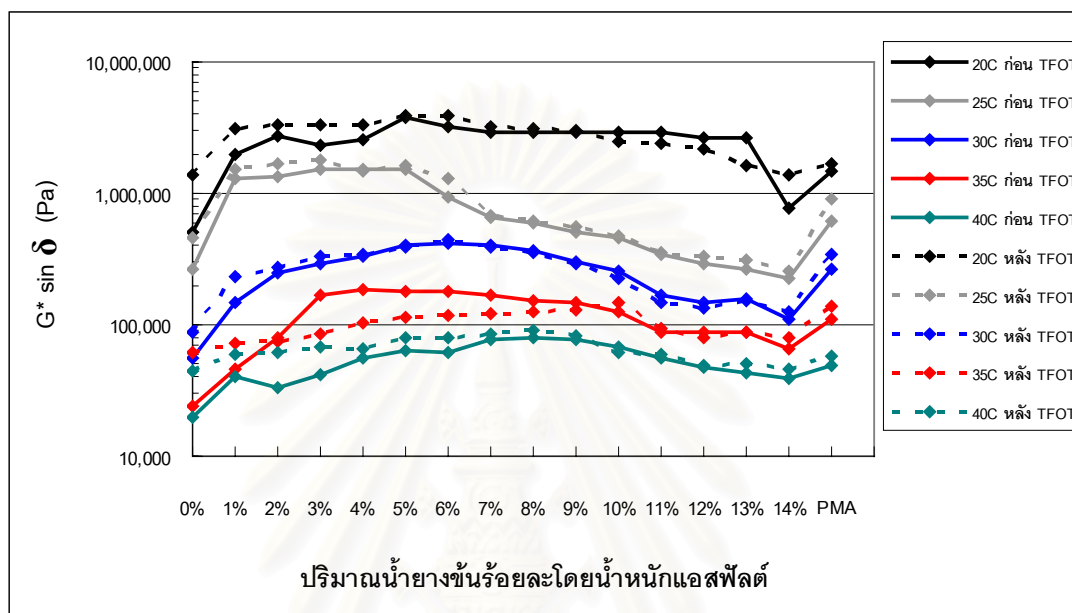
ที่ช่วงอุณหภูมิสูง ข้อกำหนดของ SHRP ได้ระบุไว้ให้ใช้ค่า $G^*/\sin \delta$ เป็นค่าความสามารถในการต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) ของวัสดุเชื่อมประสาน โดยก่อนการ Aging จะต้องมีค่า $G^*/\sin \delta$ ไม่น้อยกว่า 1,000 Pa และหลังจากการ Aging จะต้องมีค่า $G^*/\sin \delta$ ไม่น้อยกว่า 2,200 Pa



รูปที่ 4.13 ค่า $G^*/\sin \delta$ ของวัสดุ NRA ทั้งก่อนและหลังจากการอบด้วย TFOT ที่อุณหภูมิสูง

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างระหว่างค่า $G^*/\sin \delta$ ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำยางข้นที่ผสมลงไปในทุกอุณหภูมิ นั่นคือเป็นการช่วยลดการเกิดภาวะ Aging ได้ นอกจากนี้ ค่า $G^*/\sin \delta$ ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแข็งแรงของวัสดุ มีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณน้ำยางข้น จากข้อกำหนดของ SHRP พบว่า วัสดุ NRA ที่ร้อยละ 7 ขึ้นไปมีค่า $G^*/\sin \delta$ มากกว่า 1,000 Pa นั่นคือ สามารถนำวัสดุ NRA ดังกล่าวไปใช้งานได้ที่สภาวะอุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส ขณะที่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาสามารถนำไปใช้งานได้ ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไม่เกิน 64 องศาเซลเซียส ดังนั้น การผสมน้ำยางข้นเกินร้อยละ 7 ช่วยเพิ่มความแข็งแรงแก่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้สามารถนำไปใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมากขึ้นได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการยุบตัวแบบถาวร ขณะที่วัสดุ PMA สามารถนำไปใช้งานได้ ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงถึง 76 องศาเซลเซียส

ที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง ข้อกำหนดของ SHRP ได้ระบุไว้ให้ใช้ค่า $G^* \sin \delta$ เป็นค่าความ สามารถในการต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking) ของวัสดุเชื่อม ประสานหลังจากการ Aging โดยจะต้องมีค่า $G^* \sin \delta$ ไม่สูงเกินกว่า 5,000,000 Pa ดังแสดงในรูปที่ 4.14

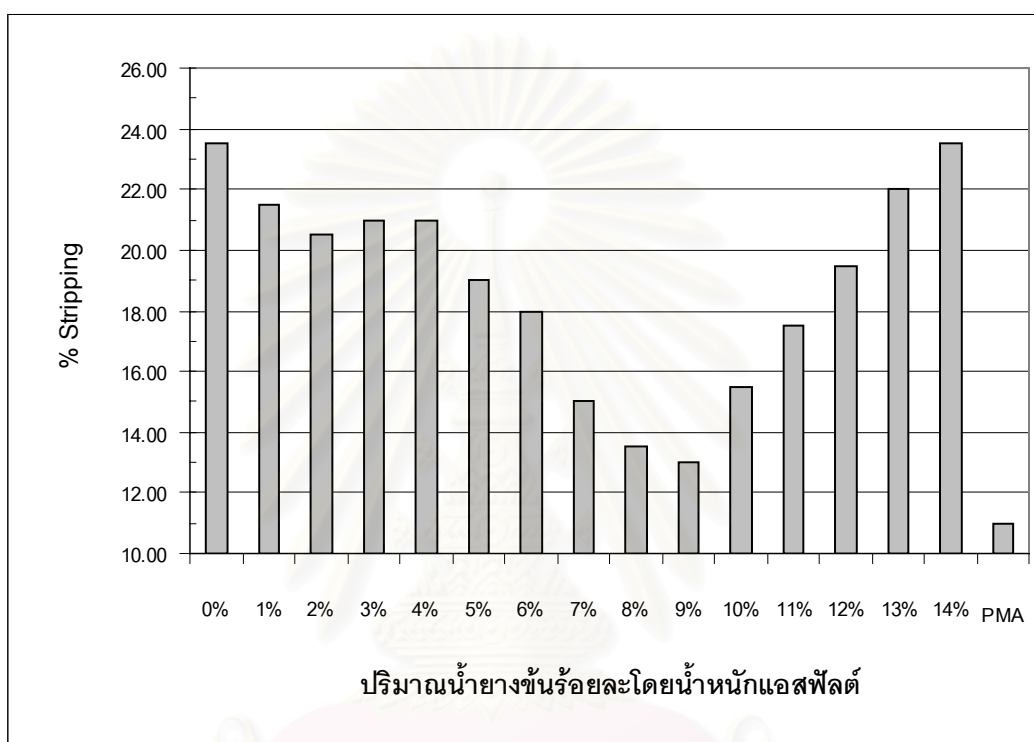


รูปที่ 4.14 ค่า $G^* \sin \delta$ ของวัสดุ NRA ทั้งก่อนและหลังจากการอบด้วย TFOT ที่อุณหภูมิปานกลาง

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างระหว่างค่า $G^* \sin \delta$ ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไปในทุกอุณหภูมิ นั่นคือเป็นการช่วยลดการเกิดภาวะ Aging ได้ และค่า $G^* \sin \delta$ ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแข็งแรงของวัสดุเชื่อมประสานมีแนวโน้มสูงขึ้นและเริ่มคงที่ ที่ช่วงปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 5 - 9 จากนั้น ค่า $G^* \sin \delta$ มีแนวโน้มลดลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ผิวทางมักเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า พบว่าค่า $G^* \sin \delta$ มีแนวโน้มลดลงทันทีเมื่อผสมน้ำยางชั้นเกินร้อยละ 5 นั้นเป็นการแสดงให้เห็นว่า น้ำยางชั้นช่วยให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา แต่เมื่อผสมน้ำยางชั้นในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้วัสดุไม่แข็งแรงมากเกินไปจนเกิดภาวะแข็งเปราะที่อุณหภูมิปานกลางได้ และจากข้อกำหนดของ SHRP พบว่า ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสของวัสดุ NRA ที่ผ่านการอบด้วย TFOT ที่ปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 5 - 8 ที่มีค่าสูงกว่าข้อกำหนดของ SHRP เล็กน้อย

4.1.10 การทดสอบการหลุดลอกด้วยวิธีแบบถาด

การทดสอบคุณสมบัติการหลุดลอกของวัสดุผสมร่วมกับวัสดุเชื่อมประสาน ได้ทำการทดสอบด้วยวิธีแบบถาด (Plate stripping test) ตามมาตรฐาน ทล.-ท.605/2518 โดยผลการทดสอบได้แสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ค่า % Stripping ของวัสดุเชื่อมประสาน

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผสมน้ำยางชั้นลงไปวัสดุเอสฟัลด์ซีเมนต์จะสามารถช่วยลดค่า % Stripping หรือร้อยละของการหลุดลอกได้ โดยเมื่อผสมน้ำยางชั้นร้อยละ 9 สามารถลดค่า % Stripping ได้มากที่สุดถึง 45 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณเมื่อเทียบกับวัสดุเอสฟัลด์ซีเมนต์ธรรมดา แต่หากผสมน้ำยางชั้นเกินร้อยละ 9 แล้ว ส่วนผสมจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลงทำให้ค่า % Stripping มีแนวโน้มสูงขึ้น นั่นคือความสามารถในการยึดจับกับมวลรวมมีค่าลดลง ขณะที่วัสดุ PMA แสดงค่า % Stripping ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุเอสฟัลด์ซีเมนต์ธรรมดาและวัสดุ NRA

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึ่มของวัสดุมวลรวม

ประเภทของมวลรวม	คุณสมบัติ				วิธีการทดสอบ
	Bulk Specific Gravity (Dry)	Bulk Specific Gravity (SSD)	Apparent Specific Gravity	% Water Absorbition	
มวลรวมหยาบ					ASTM C127
- ผ่านตะแกรง 3/4" ค้างบนตะแกรง 1/2"	2.702	2.711	2.726	0.33	
- ผ่านตะแกรง 1/2" ค้างบนตะแกรง เบอร์ 4	2.661	2.686	2.730	0.96	
มวลรวมละเอียด					ASTM C128
- ผ่านตะแกรง เบอร์ 4 ค้างบนตะแกรง เบอร์ 8	2.597	2.644	2.725	1.81	
- ผ่านตะแกรง เบอร์ 8 ค้างบนตะแกรง เบอร์ 50	2.473	2.514	2.579	1.65	
- ผ่านตะแกรง เบอร์ 50 ค้างบนตะแกรง เบอร์ 200	2.304	2.378	2.488	3.20	
เฉลี่ย	2.588	2.623	2.681	0.93	

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

ลำดับ ที่	คุณลักษณะ	ค่า ที่ได้	เกณฑ์ตามข้อกำหนด ของกรมทางหลวง	วิธีการทดสอบ
มวลรวมหยาบ				
1	ค่าความสึกหรอของมวลรวม ร้อยละ			
	- ผ่านตะแกรง 3/4" ค้างบนตะแกรง 1/2" - ผ่านตะแกรง 1/2" ค้างบนตะแกรง เบอร์ 4	22.41 28.20	≤ 40	ASTM C131 หรือ ทล.-ท.202/2515
2	ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Soundness) ร้อยละ			
	- ผ่านตะแกรง 3/4" ค้างบนตะแกรง 1/2" - ผ่านตะแกรง 1/2" ค้างบนตะแกรง เบอร์ 4	0.90 1.80	≤ 9	AASHTO T104 หรือ ทล.-ท.213/2531
3	แอสฟัลต์ที่เคลือบผิว (Coating) ร้อยละ	> 95	≥ 95	AASHTO T182
4	ดัชนีความแบนของมวลรวม (FI)	26.67	≤ 30	ทล.-ท.210/2518
5	ดัชนีความยาวของมวลรวม (EI)	28.70	≤ 30	ทล.-ท.211/2518
มวลรวมละเอียด				
1	ค่าสัมมูลย์ของทราย ร้อยละ	58	≥ 50	AASHTO T176 หรือ ทล.-ท.203/2515
2	ค่าของส่วนที่ไม่คงทน (Soundness) ร้อยละ			
	- ผ่านตะแกรง เบอร์ 4 ค้างบนตะแกรง เบอร์ 8 - ผ่านตะแกรง เบอร์ 8 ค้างบนตะแกรง เบอร์ 50	1.18 2.36	≤ 9	AASHTO T104 หรือ ทล.-ท.213/2531

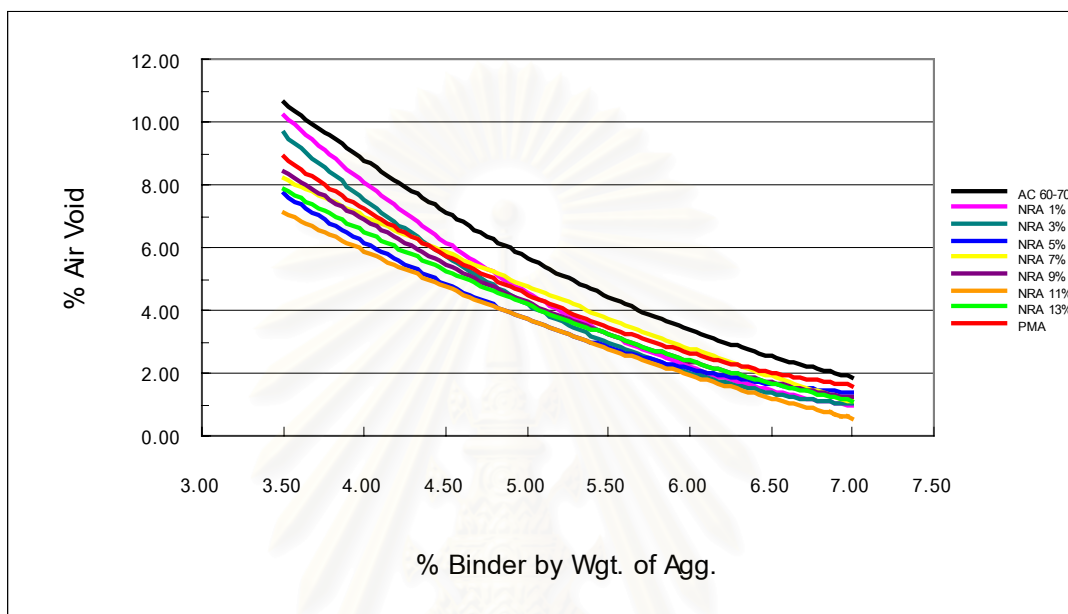
เมื่อพิจารณาผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม ทั้งมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด จะเห็นว่าผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการก่อสร้างทางในประเทศไทยทุกประการ สามารถนำไปก่อสร้างชั้นผิวทาง (Wearing course) ได้

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ พบว่า วัสดุ NRA ที่ปริมาณสัดส่วน 1-14% โดยน้ำหนักรวม มีค่าการทดสอบใกล้เคียงกัน จึงได้ทำการแบ่งช่วงสัดส่วนปริมาณของวัสดุ NRA ออกเป็น 1% 3% 5% 7% 9% 11% และ 13% โดยน้ำหนักรวม จากนั้นนำวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ มาผสมกับวัสดุมวลรวมที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เบื้องต้นเป็น ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติด้วยวิธีมาร์แชลและการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไป

4.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

การทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล สามารถเตรียมก้อนตัวอย่างจากการบดอัดส่วนผสมโดยใช้จำนวนรอบการบดอัดตามขอบเขตเทียบเท่าที่ปริมาณการจราจรสูง (Heavy traffic criteria) เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content)



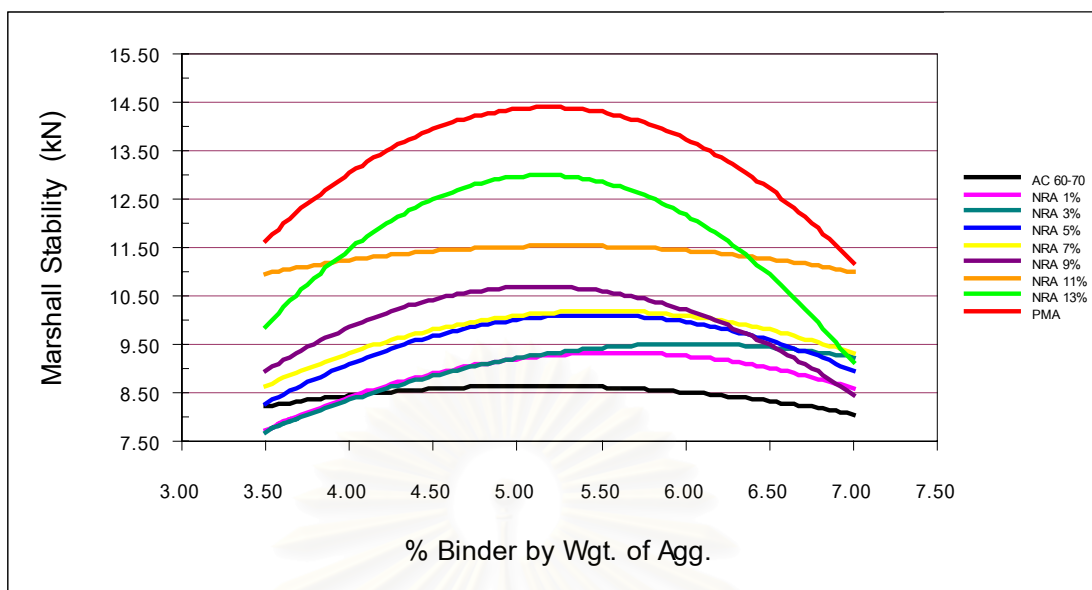
รูปที่ 4.16 ค่าร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสาน โดยนำหน้าของมวลรวม

จากรูปที่ 4.16 ที่ค่าร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากับ 4 ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

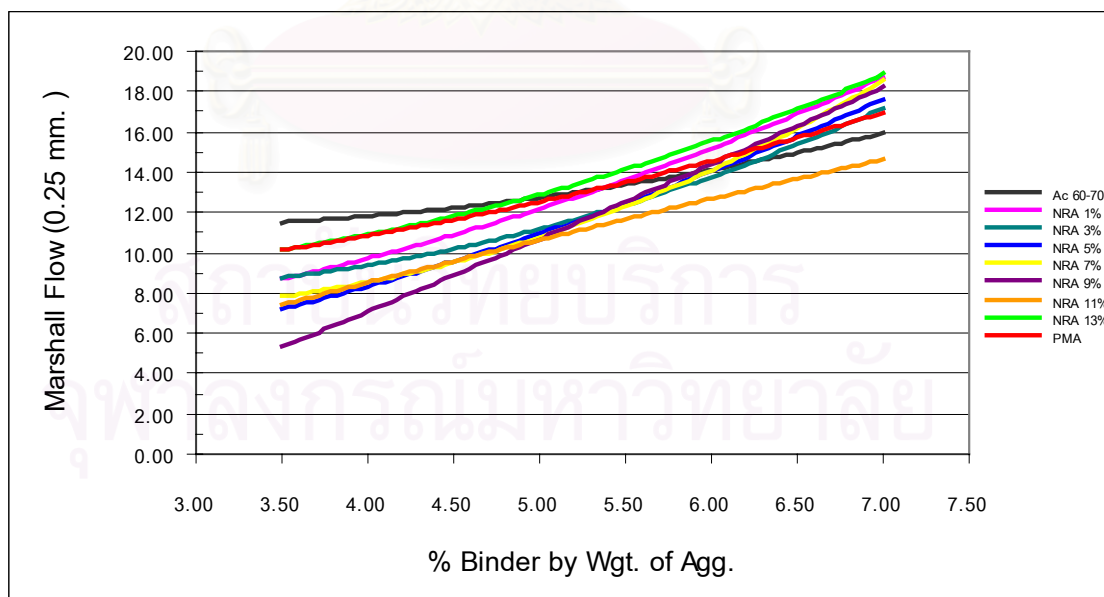
Properties at % Air Void = 4%	Criteria		0%	1%	3%	5%	7%	9%	11%	13%	PMA
	Min.	Max.									
% Binder Content	-	-	5.70	5.30	5.20	5.00	5.35	5.20	4.90	5.00	5.40
Marshall Stability (kN)	8.00	-	8.60	9.30	9.30	10.00	10.20	10.70	11.52	13.00	14.40
Marshall Flow (0.25 mm.)	8	14	13.70	13.60	11.80	11.00	12.00	11.50	10.50	13.00	13.50
% VMA	13	-	14.85	13.70	13.35	13.15	14.10	13.70	13.20	13.65	14.00
% VFA	65	75	73.00	72.00	70.00	70.00	70.00	69.00	70.00	69.00	73.00
Unit Weight (Mg/m ³)	-	-	2.330	2.354	2.358	2.362	2.342	2.350	2.360	2.346	2.350

จกตารางที่ 4.4 สามารถนำค่าผลการทดสอบต่าง ๆ มาแสดงความสัมพันธ์กับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยนำหน้าของมวลรวม (% binder by weight of aggregate) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.21



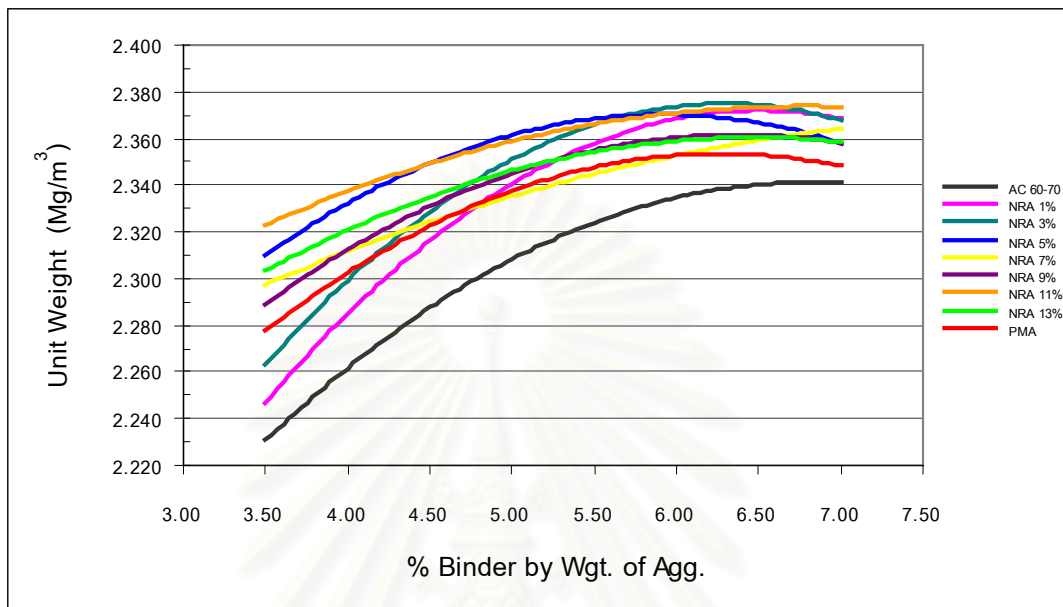
รูปที่ 4.17 ค่าเสถียรภาพมาร์แชลกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่า ค่าเสถียรภาพมาร์แชลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไป นั่นคือ น้ำยางชั้นช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น ขณะที่วัสดุ PMA แสดงค่าเสถียรภาพมาร์แชลสูงที่สุด



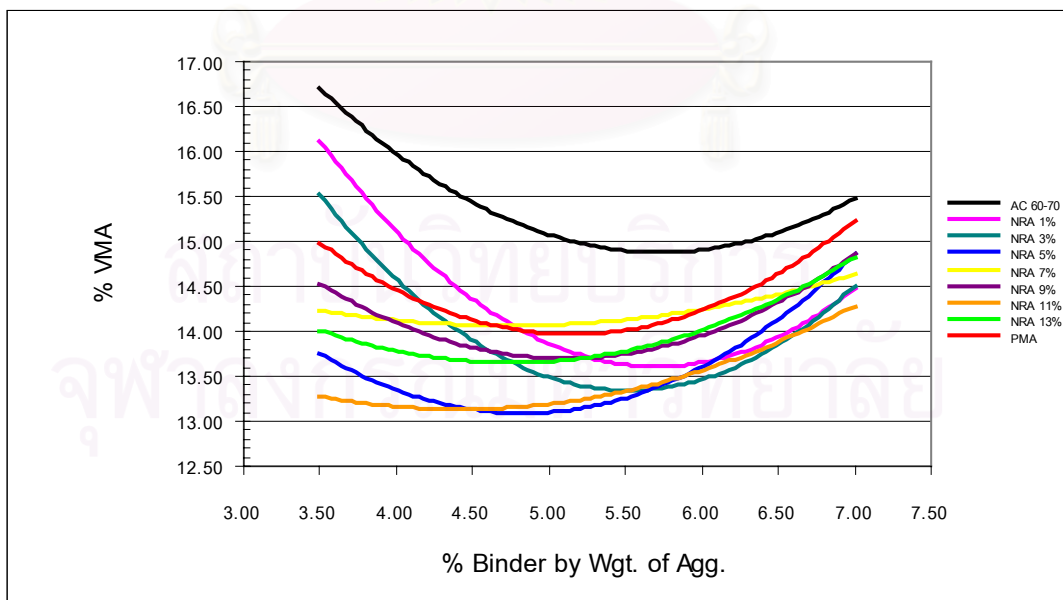
รูปที่ 4.18 ค่าการไหลมาร์แชลกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม

สำหรับค่าการไหลมาร์แชลด์แสดงในรูปที่ 4.18 เมื่อพิจารณาที่จุด Optimum binder content พบว่าวัสดุ NRA และวัสดุ PMA ล้วนแล้วแต่แสดงค่าการไหลที่ต่ำกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา นั่นคือช่วยลดการเสียรูปของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อถูกน้ำหนักรถทำได้



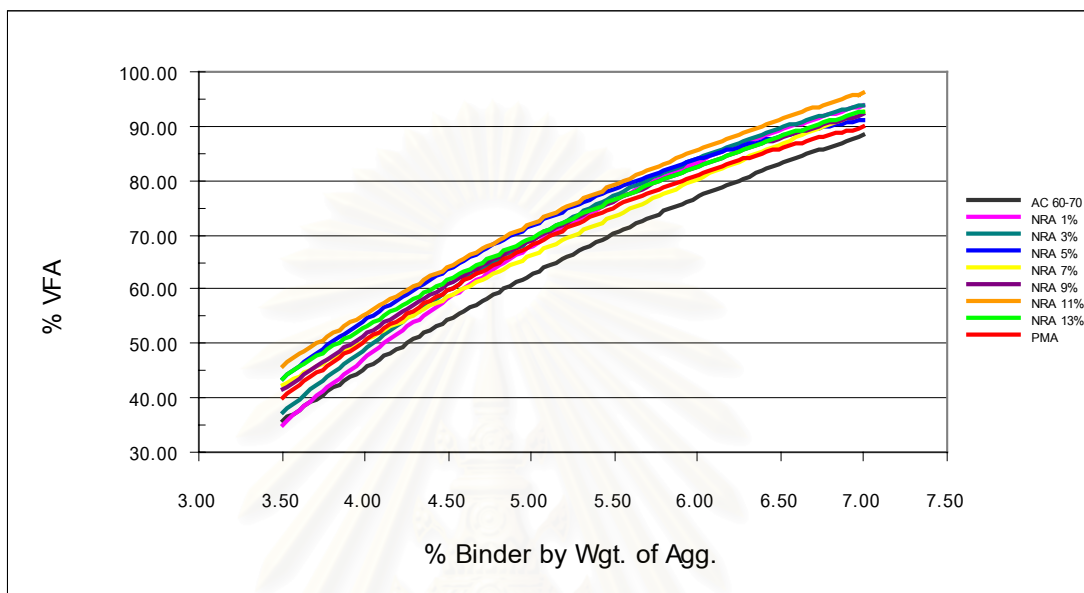
รูปที่ 4.19 ค่าหน่วยน้ำหนักกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม

จากรูปที่ 4.19 วัสดุ NRA และวัสดุ PMA ล้วนแล้วแต่แสดงค่าหน่วยน้ำหนักที่มากกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาอย่างชัดเจน นั่นคือช่วยเพิ่มความหนาแน่นแก่แอสฟัลต์คอนกรีตได้

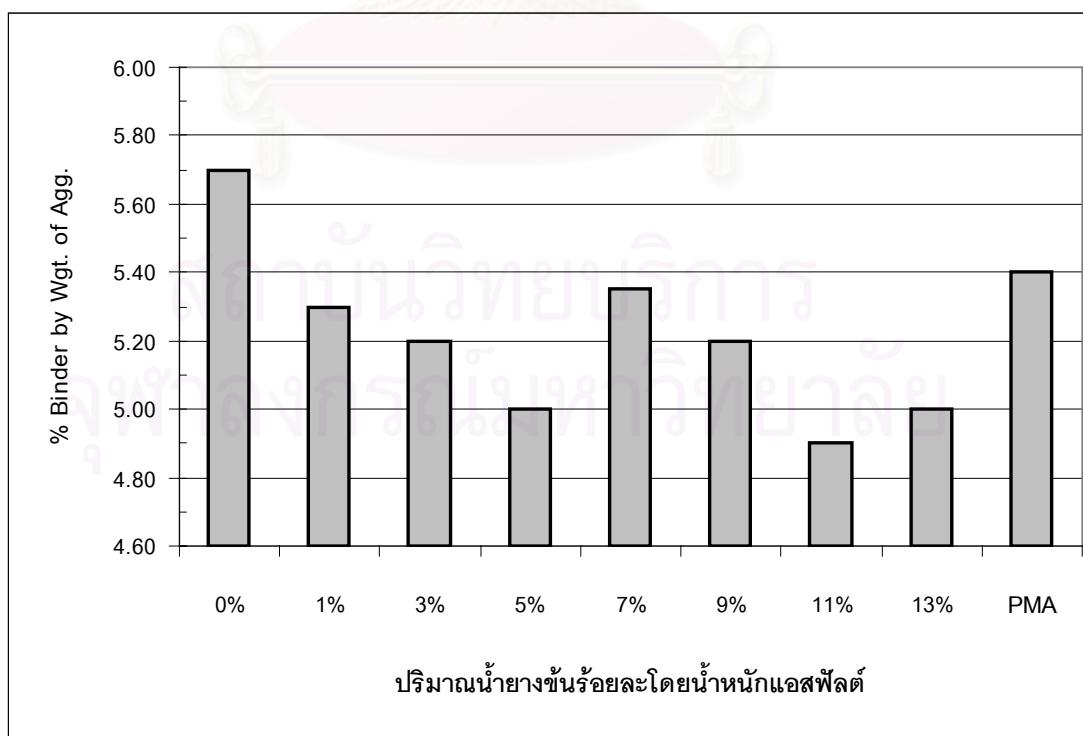


รูปที่ 4.20 ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมกับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม

สำหรับค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (% VMA) และค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (% VFA) ของทั้งวัสดุ NRA และวัสดุ PMA ล้วนแล้วแต่แสดงค่าที่น้อยกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา เมื่อพิจารณาที่จุด Optimum binder content ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21



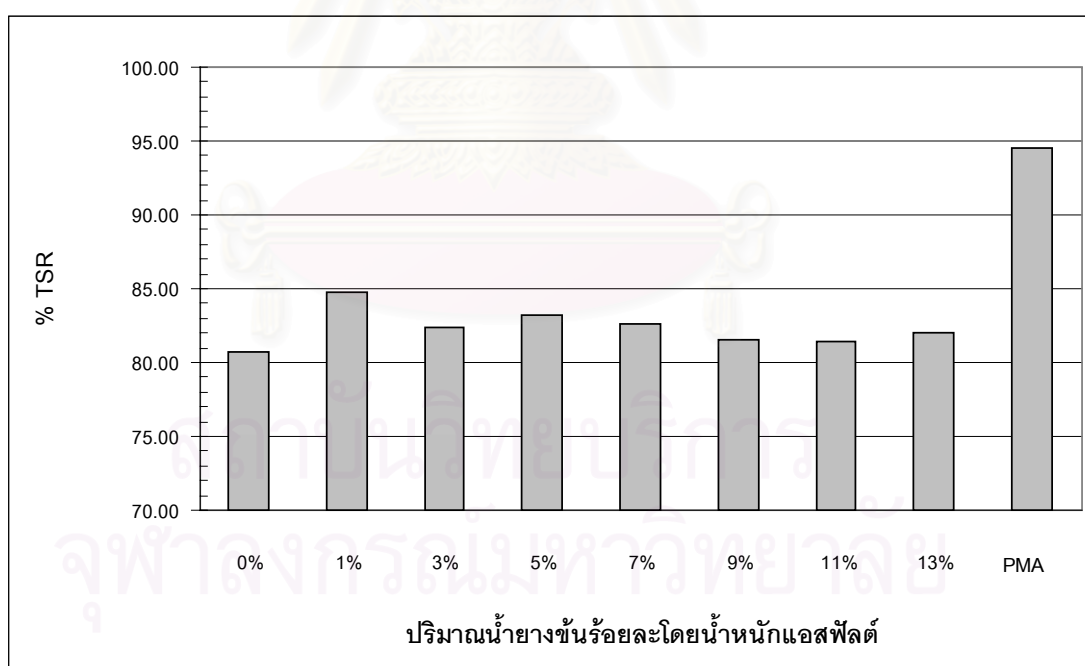
รูปที่ 4.21 ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับค่าร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยน้ำหนักของมวลรวม



รูปที่ 4.22 ปริมาณ Optimum binder content ในแต่ละส่วนผสม

ดังนั้น จากผลการทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลได้แสดงให้เห็นว่า ทุกส่วนผสมมีค่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดทุกประการ เมื่อพิจารณาที่ค่าร้อยละของปริมาณช่องว่าง อากาศเท่ากับ 4 วัสดุ NRA และวัสดุ PMA มีแนวโน้มที่จะใช้ Optimum binder content น้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ทำให้ประหยัดขึ้น ขณะที่ช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพ ค่าหน่วยน้ำหนักให้สูงขึ้น และลดการไหลซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) เมื่อถูกน้ำหนักกระทำได้

การทดสอบ Tensile Strength Ratio (TSR) เป็นการทดสอบหากำลัง (Strength) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่จุด Optimum binder content ในลักษณะของ Diametral tensile strength ด้วยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) ที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้รับผลกระทบจากปัจจัยของน้ำและความชื้น กำลังของวัสดุที่ได้นี้จะบ่งชี้ถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวมในขณะที่มีสภาพความชื้นอยู่ ทำให้สามารถนำไปใช้วัด Long-term stripping susceptibility ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ ตามมาตรฐานการทดสอบ AASHTO T 283 โดยกำหนดให้กำลังที่เหลืออยู่จากการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เทียบกับกำลังที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80



รูปที่ 4.23 ค่า Tensile Strength Ratio (TSR) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่า ทุกส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่า TSR ผ่านตามข้อกำหนด วัสดุ NRA มีแนวโน้มของค่า TSR ลดลงและเริ่มคงที่หลังจากที่ผสมปริมาณน้ำยางชั้นเกิน

ร้อยละ 1 ลงไป ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมน้อยลงเมื่อผสมน้ำยางข้นในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า TSR ทุกค่าในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยน้ำยางข้นล้วนสูงกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา ขณะที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ PMA แสดงค่า TSR สูงที่สุด นั่นคือเมื่อทำการผสมน้ำยางข้นหรือวัสดุโพลีเมอร์ลงไปวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์จะช่วยให้ได้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีแรงยึดเหนี่ยวกับวัสดุมวลรวมสูงมากขึ้น ช่วยป้องกันการหลุดลอกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความชื้นได้

4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

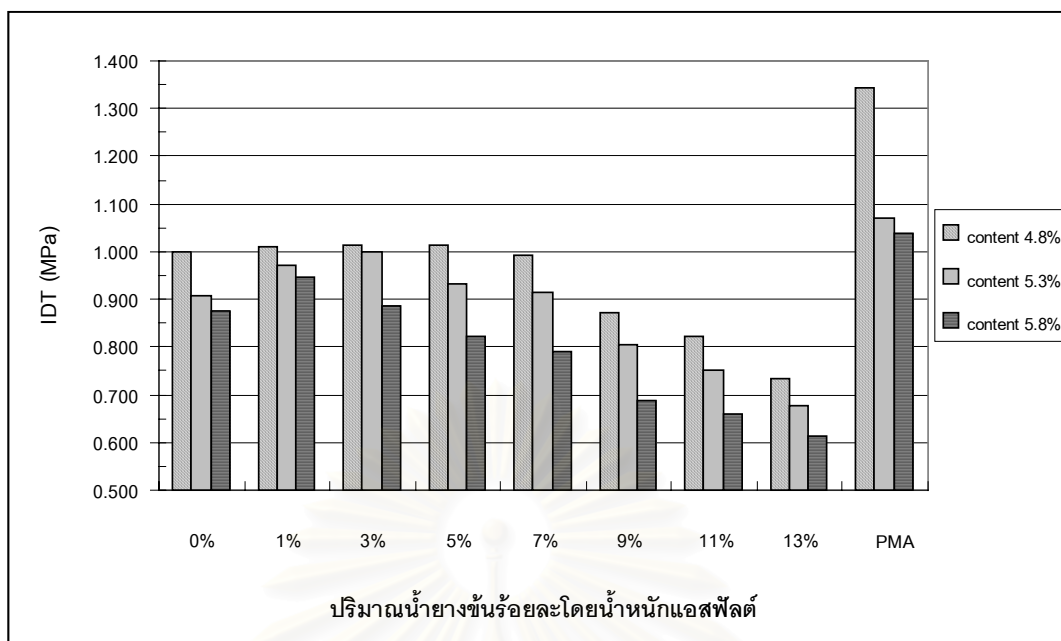
เนื่องจากค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล มีค่าแตกต่างกัน คือช่วงร้อยละ 4.90 – 5.70 โดยน้ำหนักมวลรวม ดังนั้น จึงใช้ค่า Binder content ที่ครอบคลุมค่า Optimum binder content 3 ระดับคือ 4.80% 5.30% และ 5.80% โดยน้ำหนักมวลรวมนำมาทำการบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่อง Gyratory compactor เพื่อให้ได้ร้อยละปริมาณของช่องว่างอากาศ เท่ากับ 7 ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณช่องว่างอากาศของผิวทางที่ก่อสร้างเสร็จใหม่โดยทั่วไป นอกจากนี้ การบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่อง Gyratory compactor จะช่วยให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ทำให้สามารถเตรียมก้อนตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ทุกก้อน จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไป

4.3.2.1 การทดสอบแรงดึงทางอ้อม

ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength : IDT) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และได้้นำค่ามาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึงทางอ้อมกับปริมาณ Binder content

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

% Binder Content by Weight of Aggregates	Indirect Tensile Strength (Mpa)								
	AC 60-70	1%	3%	5%	7%	9%	11%	13%	PMA
4.80	1.001	1.010	1.014	1.015	0.993	0.872	0.821	0.735	1.344
5.30	0.906	0.973	0.999	0.931	0.913	0.803	0.753	0.676	1.070
5.80	0.875	0.947	0.885	0.823	0.791	0.689	0.658	0.615	1.039



รูปที่ 4.24 ค่าแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

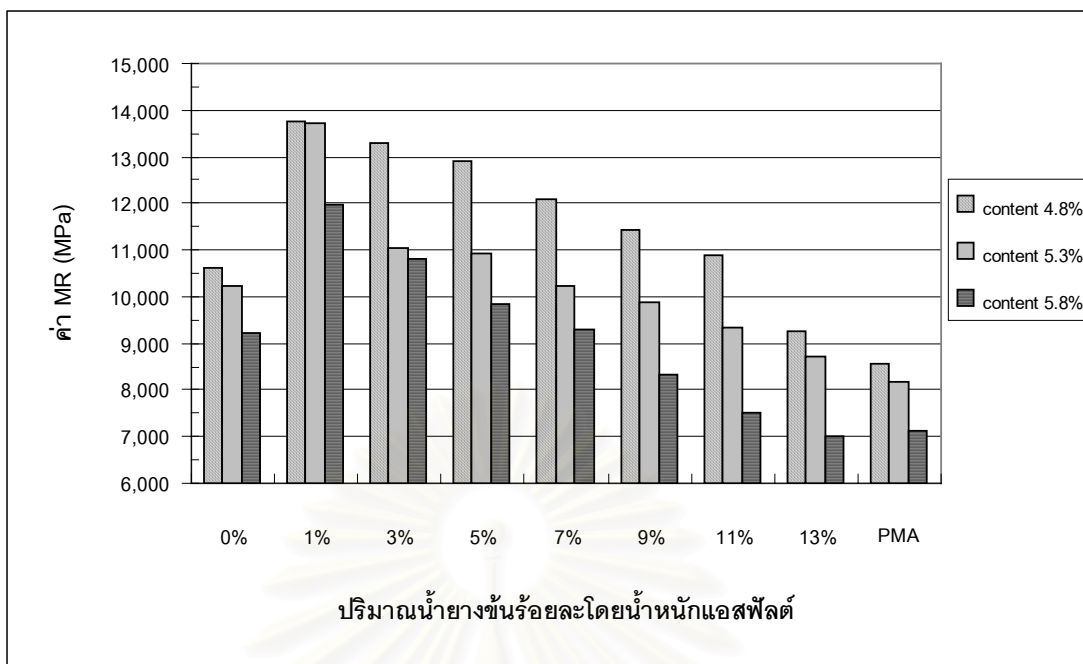
จากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่า ค่าแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Binder content นั่นคือเมื่อส่วนผสมเฝ้มมากขึ้น จะทำให้รับกำลังได้น้อยลง และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ NRA จะเริ่มมีค่าแรงดึงทางอ้อมสูงขึ้นตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไป กระทั่งถึงที่ปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 3 ค่าแรงดึงทางอ้อมมีแนวโน้มลดลง และเมื่อผสมปริมาณน้ำยางชั้นเกินร้อยละ 7 ลงไปจะทำให้ได้ค่าแรงดึงทางอ้อมที่ต่ำกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุส่วนผสมลดลงเมื่อผสมน้ำยางชั้นในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น โดยมีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบ TSR

4.3.2.2 การทดสอบโมดูลัสคืนตัว

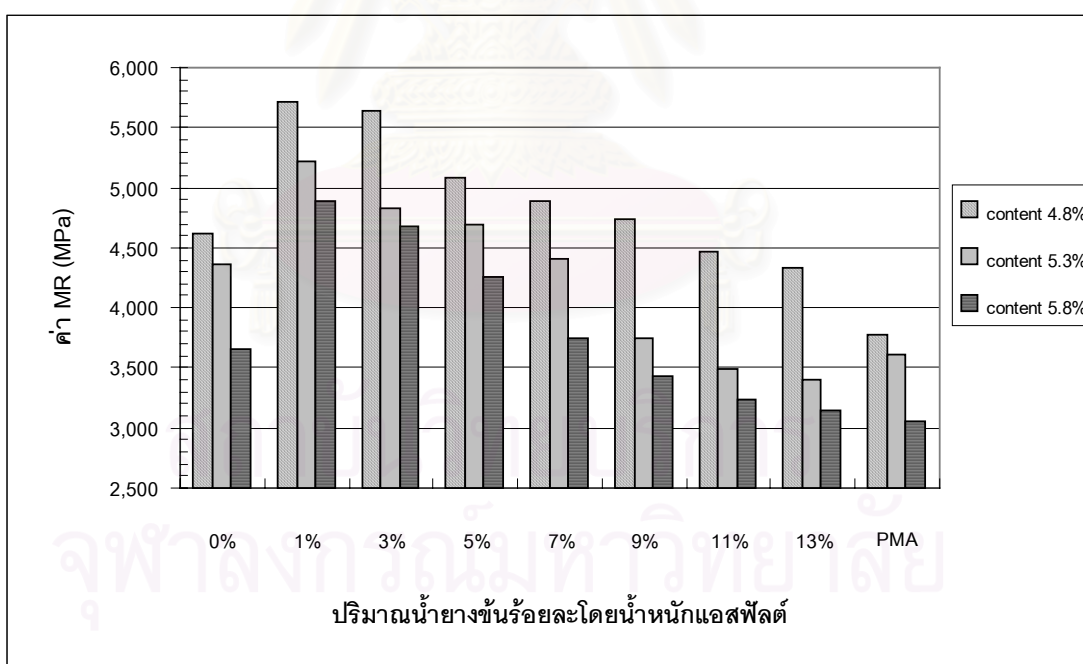
การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus : MR) ได้ทำการทดสอบที่ 4 อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Repeated load indirect tensile test โดยแรงกระทำในการทดสอบจะใช้ค่าแรงดึงทางอ้อมที่ทดสอบจนก้อนตัวอย่างแตกเสียหาย (Failure) เป็นค่าแรงอ้างอิง โดยกำหนดให้เป็นร้อยละของแรงดึงทางอ้อม ได้แก่ 25% 20% 15% และ 10% สำหรับที่อุณหภูมิทดสอบ 15 25 35 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งใน 1 ก้อนตัวอย่างจะกระทำการทดสอบ 2 แนวที่ตั้งฉากกัน โดยค่าโมดูลัสคืนตัวจะวัดจากค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายเมื่อจำนวนรอบการทดสอบถึง 150 รอบ ซึ่งเป็นจำนวนรอบที่ค่าโมดูลัสคืนตัวเริ่มมีค่าคงที่ โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆ

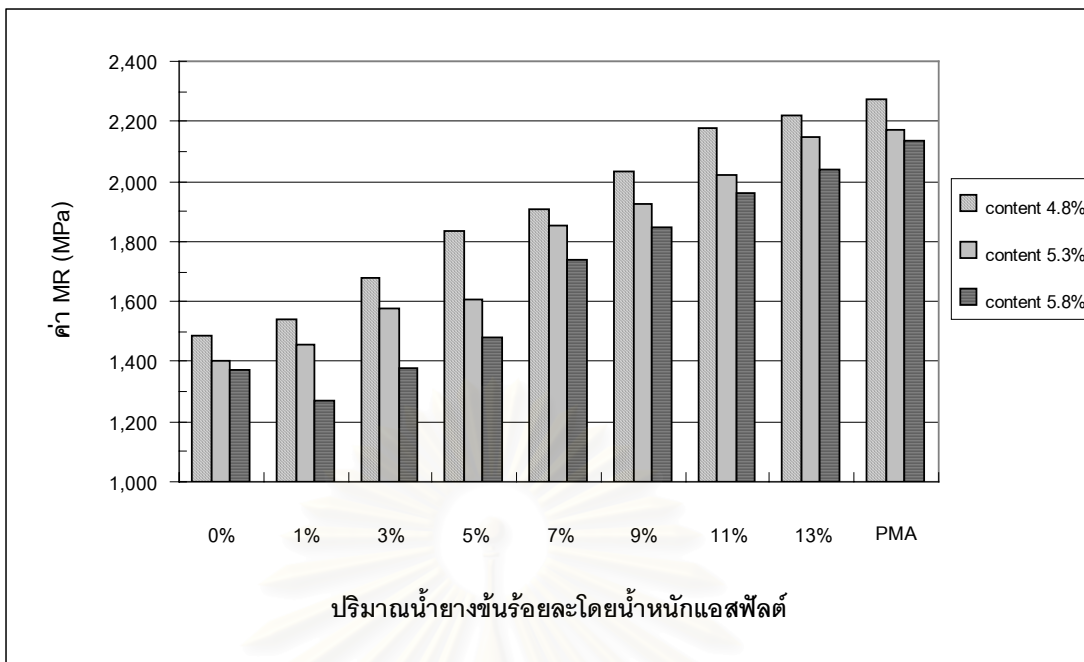
% Binder Content by Weight of Aggregates	Temperature (°C)	Resilient Modulus (MPa)										
		AC 60-70	1%	3%	5%	7%	9%	11%	13%	PMA		
4.80	15	10600.333	13766.467	13299.633	12895.267	12073.133	11446.667	10896.467	9251.100	8551.633		
	25	4622.167	5718.067	5642.733	5076.767	4882.067	4739.500	4461.400	4337.100	3774.833		
	35	1484.833	1541.667	1679.667	1836.367	1908.333	2033.600	2178.333	2221.233	2273.600		
	45	616.200	690.050	705.270	725.043	826.050	896.970	917.050	1032.473	1147.857		
5.30	15	10222.800	13706.133	11026.267	10924.633	10246.133	9880.200	9349.100	8714.233	8172.867		
	25	4363.567	5219.600	4829.267	4686.800	4409.600	3742.700	3492.933	3398.733	3610.867		
	35	1403.933	1456.167	1574.900	1609.233	1852.833	1926.833	2019.500	2146.367	2170.700		
	45	578.305	655.730	696.130	711.273	758.730	817.893	900.730	988.907	1042.463		
5.80	15	9223.000	11991.167	10811.233	9855.433	9304.500	8325.567	7521.167	7008.667	7111.767		
	25	3663.467	4885.200	4682.267	4254.367	3748.533	3431.800	3231.867	3152.600	3055.667		
	35	1374.900	1273.033	1379.933	1479.667	1738.367	1846.133	1963.033	2040.167	2133.767		
	45	540.460	608.193	650.330	683.710	741.527	768.993	834.860	925.630	1005.663		



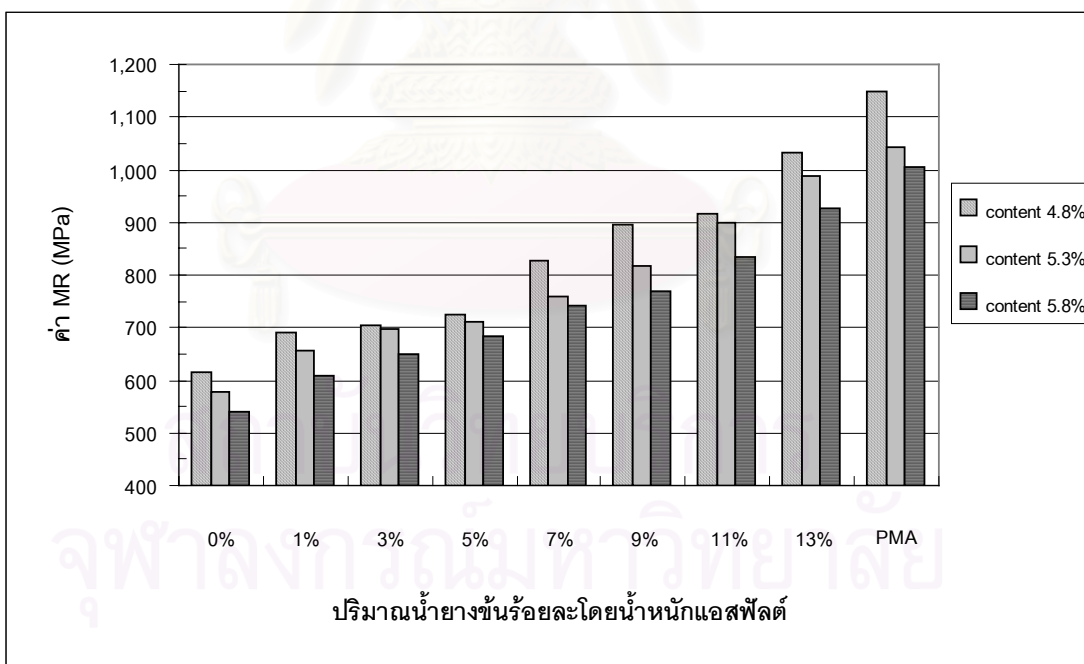
รูปที่ 4.25 ค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 ค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 ค่าโมดูลัสคั้นตัวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.28 ค่าโมดูลัสคั้นตัวที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นว่า ที่ทุกอุณหภูมิการทดสอบค่าโมดูลัสคืบตัวของ ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Binder content เนื่องจากส่วนผสมเยิ้มมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา ที่อุณหภูมิ 15 และ 25 องศาเซลเซียส พบว่าค่าโมดูลัสคืบตัวของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ PMA แสดงค่าที่น้อยที่สุด ขณะที่วัสดุ NRA สามารถช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสคืบตัวให้กับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตให้สูงขึ้นเฉพาะที่ปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 1 จากนั้นค่าโมดูลัสคืบตัวมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งที่ปริมาณน้ำยางชั้นเกินร้อยละ 9 ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ NRA มีค่าโมดูลัสคืบตัวน้อยกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การผสมน้ำยางชั้นช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าโมดูลัสคืบตัวลดลงตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสม ก็เพื่อไม่ให้วัสดุแข็งเกินไปจนขาดสมบัติยืดหยุ่นในช่วงอุณหภูมิต่ำและปานกลาง คือที่ 15 และ 25 องศาเซลเซียส ที่จะทำให้เกิดการเสียหายเนื่องจากการแตกร้าวได้

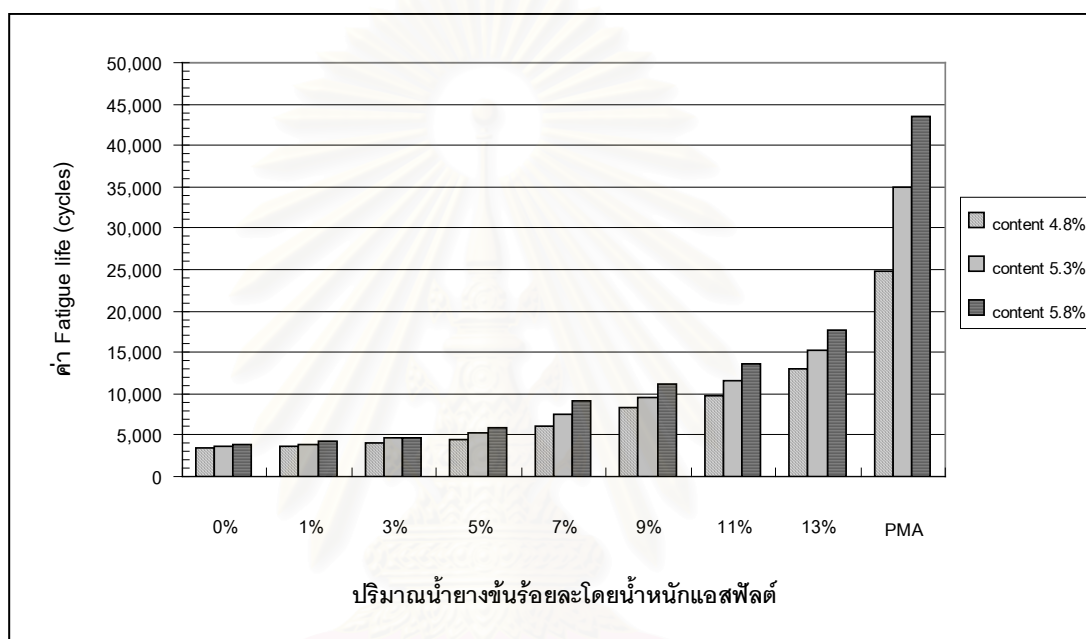
ที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส ค่าโมดูลัสคืบตัวของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ NRA และวัสดุ PMA แสดงค่าที่สูงขึ้น โดยค่าโมดูลัสคืบตัวของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ NRA มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสม และมีค่าสูงสุดที่ปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 13 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำและปานกลาง ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดามีคุณสมบัติยืดหยุ่นดีเพียงพออยู่แล้ว แต่หากได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยน้ำยางชั้น จะทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตดังกล่าวมีความยืดหยุ่นเพียงพอเพื่อดำเนินการต่อการแตกร้าวได้ ขณะที่ช่วงอุณหภูมิสูงสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น

4.3.2.3 การทดสอบความล้า

การทดสอบความล้า (Fatigue test) มีการทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบโมดูลัสคืบตัว ด้วยวิธี Repeated load indirect tensile test โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และในรูปที่ 4.29 แสดงจำนวนรอบในการรับน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความล้า

% Binder Content by Weight of Aggregates	Fatigue Life (Cycles)								
	AC 60-70	1%	3%	5%	7%	9%	11%	13%	PMA
4.80	3408	3562	4125	4533	6139	8260	9771	13064	24887
5.30	3688	3886	4578	5192	7452	9652	11622	15276	35002
5.80	3904	4230	4757	5964	9110	11146	13646	17711	43576



รูปที่ 4.29 ค่าความล้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.29 พบว่า ความสามารถในการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Binder content เนื่องจากส่วนผสมมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานมากขึ้น ทำให้สามารถรับแรงกระทำจากน้ำหนักกระทำซ้ำได้มากขึ้น กล่าวคือปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่มากขึ้นนี้จะช่วยให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีความยืดหยุ่นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม คาดว่าหากมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมากเกินไปจนแข็งขึ้น ความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำซ้ำจะมีแนวโน้มลดลง

ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ NRA มีแนวโน้มในการรับน้ำหนักกระทำซ้ำได้มากขึ้นตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไป โดยที่ปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 13 ได้แสดงจำนวนรอบในการรับน้ำหนักกระทำซ้ำสูงกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาถึง 4 เท่าโดยประมาณ เช่นเดียวกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ PMA ที่

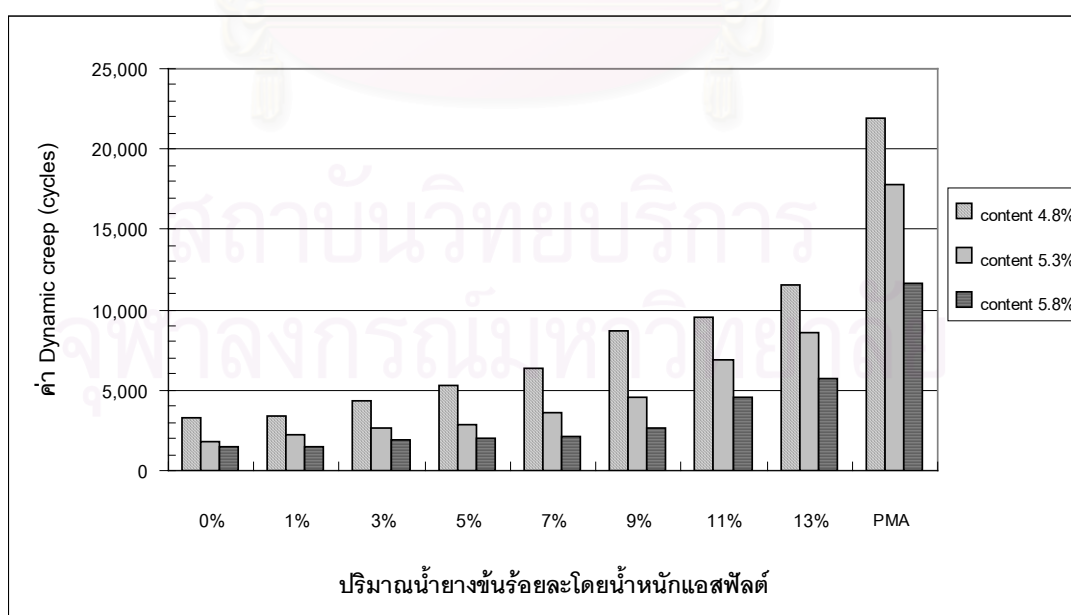
แสดงความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำซ้ำได้สูงกว่ามาก นั่นคือเมื่อเพิ่มปริมาณสารผสมเพิ่มลงไปในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วจะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุได้มากขึ้น

4.3.2.4 การทดสอบการยุบตัวแบบถาวร

การทดสอบการยุบตัวแบบถาวร (Permanent deformation) จะพิจารณาจำนวนรอบในการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำตามแนวแกนของก้อนตัวอย่างทดสอบ ที่ทำให้อ่อนตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดสะสม (Accumulated strain) และมีการยุบตัวคิดเป็น 1% ของความสูงก้อนตัวอย่าง หรือที่ 1% Accumulated strain ด้วยการทำทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการยุบตัวแบบถาวร

% Binder Content by Weight of Aggregates	Dynamic Creep (Cycles)								
	AC 60-70	1%	3%	5%	7%	9%	11%	13%	PMA
4.80	3239	3425	4395	5281	6349	8672	9525	11581	21933
5.30	1773	2269	2679	2887	3603	4509	6936	8557	17803
5.80	1440	1469	1858	1985	2169	2602	4503	5733	11643



รูปที่ 4.30 ค่า Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่า จำนวนรอบในการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ Binder content เนื่องจากส่วนผสมมีความเหนียวมากขึ้น จึงทำให้ยุบตัวได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการใช้งานแล้ว ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ NRA แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการยืดอายุการใช้งานของผิวทางออกไปได้ โดยมีลักษณะแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไป ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา พบว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณน้ำยางชั้นร้อยละ 13 ผสมอยู่ ได้แสดงประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีกว่าถึง 4 เท่าโดยประมาณ ซึ่งมีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดสอบความล้า ขณะที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุ PMA ยังคงแสดงประสิทธิภาพที่สูงกว่ามาก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับยางพาราในรูปแบบของน้ำยางชั้นในปริมาณสัดส่วนต่าง ๆ เป็นวัสดุ Natural Rubber Asphalt (NRA) เปรียบเทียบกับวัสดุควบคุม 2 ชนิด คือ วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาชนิดเกรด 60-70 และวัสดุ Polymer Modified Asphalt (PMA) ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 ส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

เมื่อวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับน้ำยางชั้น อนุภาคของเนื้อยางพาราจะเกิดการรวมตัวและดูดซับส่วนที่เป็น Oily Constituents ของแอสฟัลต์ ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ของสายโซ่โพลีเมอร์ขึ้น และมีการกระจายตัวของเนื้อยางพาราในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวและหนืดมากขึ้น พบว่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

- วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์แข็งขึ้น สังเกตได้จากการทดสอบ Penetration โดยแข็งที่สุดที่ NRA 7% จากนั้นเมื่อปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมมากขึ้นเกิน 7% วัสดุมีแนวโน้มอ่อนลง เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมลดลง
- วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์มีจุดอ่อนตัวสูงขึ้น ที่ช่วงระหว่าง NRA 10 – 13% โดยมีค่าจุดอ่อนตัวระหว่าง 59.5 – 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ช่วยลดปัญหาการอ่อนตัวและไหลเยิ้มของผิวทางได้
- ค่าความหนืดที่เพิ่มขึ้น ช่วยทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถเคลือบวัสดุมวลรวมได้ฟิล์มหนาขึ้น เป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมให้สูงขึ้น ช่วยลดการหลุดลอกของมวลรวมได้ โดยที่ NRA 9% แสดงการหลุดลอกต่ำสุด ซึ่งน้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นค่าหลุดลอกมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมลดลง
- วัสดุ NRA สามารถช่วยเพิ่มการยึดติดที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะหลังจากการอบด้วย TFOT ขณะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย

TFOT เมื่อผสมน้ำยางขึ้นเกิน 10% ค่าการยึดดึงจะลดลง เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมลดลง

- การทดสอบหาค่า % Torsional recovery เป็นการทดสอบสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุ แอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยที่ NRA 9% แสดงค่า % Torsional recovery สูงสุด ซึ่งมากกว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาเกือบ 9 เท่า โดยเมื่อผสมน้ำยางขึ้นเกิน 9% ค่า % Torsional recovery มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมลดลง
- การทดสอบ Toughness และ Tenacity เป็นการทดสอบคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุ แอสฟัลต์ซีเมนต์ โดยที่ NRA 10% แสดงค่าสูงสุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา พบว่า NRA 10% มีค่า Toughness สูงกว่า 4 เท่า ขณะที่ค่า Tenacity สูงกว่าถึง 7 เท่า จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อผสมน้ำยางขึ้นเกิน 10% เนื่องจากความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสมลดลง
- วัสดุ NRA สามารถช่วยลดภาวะการเกิด Aging ของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ตามปริมาณน้ำยางขึ้นที่ผสม โดยพิจารณาจากผลการทดสอบต่าง ๆ ที่ผ่านการอบด้วย TFOT คุณสมบัติของวัสดุ NRA จะมีค่าความแตกต่างระหว่างก่อนอบและหลังอบลดลง
- วัสดุ NRA สามารถช่วยลดความว่องไวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ จากการวัดค่า Penetration Index (PI) โดยแสดงค่าสูงขึ้นตามปริมาณน้ำยางขึ้นที่ผสม คือที่ NRA 14% มีค่าสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาเกือบ 3 เท่า
- ลักษณะเด่นที่สำคัญของการผสมน้ำยางขึ้น คือช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและเพิ่มกำลังให้แก่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิสูงตามปริมาณน้ำยางขึ้นที่ผสม ขณะเดียวกันที่อุณหภูมิต่ำช่วยทำให้วัสดุไม่แข็งเกินไปจนเกิดภาวะแข็งเปราะ จากการทดสอบด้วย Dynamic Shear Rheometer (DSR) การผสมน้ำยางขึ้นเกิน 7% สามารถนำวัสดุส่วนผสมดังกล่าวไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส
- วัสดุ PMA แสดงคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ ที่ดีกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา และวัสดุ NRA ขณะที่มีความหนืดไม่สูงนัก จึงมีความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ดีกว่า

5.1.2 ส่วนที่เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

- วัสดุ NRA สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพแก่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสม โดยมีค่าเสถียรภาพสูงสุดที่ NRA 13% คือ 13 kN ซึ่งสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาถึง 50 เปอร์เซ็นต์
- วัสดุ NRA สามารถช่วยเพิ่มความหนาแน่นแก่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ โดยแสดงค่าสูงสุดที่ NRA 11%
- วัสดุ NRA ใช้ปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content) ในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา ซึ่งที่ NRA 11% ใช้ปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมต่ำสุดคือ 4.90 % โดยน้ำหนักรวม ขณะที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาใช้ปริมาณ 5.70% โดยน้ำหนักรวม
- สำหรับประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น การผสมน้ำยางชั้นช่วยลดการหลุดลอกของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้และยังช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังช่วยให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 4 เท่าโดยประมาณ ที่ปริมาณน้ำยางชั้น 13% โดยพิจารณาจากการทดสอบคุณสมบัติด้านความล้าและการยุบตัวแบบถาวร

นอกจากนี้ พบว่าเมื่อปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมลงไปในวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวของส่วนผสมจะลดลง ทำให้การทดสอบในบางคุณสมบัติมีผลลดลงหรือเกิดความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมกับวัสดุ PMA พบว่า โดยส่วนใหญ่วัสดุ PMA แสดงค่าที่ดีกว่าวัสดุ NRA โดยเฉพาะความยืดหยุ่นและการทดสอบที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งประสิทธิภาพในการใช้งานด้วย

ถึงแม้ว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมน้ำยางชั้น หรือวัสดุ NRA จะน้อยกว่าวัสดุ PMA ก็ตาม แต่ก็ยังมีความเหมาะสมในการนำยางพาราในรูปของน้ำยางชั้นมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในงานทาง เนื่องจากแสดงคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาในทุกประการ อีกทั้งยางธรรมชาติยังเป็นทรัพยากรที่มีอยู่ภายในประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นการช่วยแก้ปัญหายางพาราเมื่อเกิดปัญหาราคายางตกต่ำและมีปริมาณยางล้นตลาดด้วยการเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศ จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ ทั้งในส่วนที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานและในส่วนที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่า ปริมาณสัดส่วนของน้ำยางชั้นที่เหมาะสมในการผสมกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์คือ 9% โดยน้ำหนักรวม ซึ่ง

ยังคงมีประสิทธิภาพในการใช้งานดีกว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดาถึง 3 เท่า นอกจากนี้ ยังใช้ปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสมในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา อาจทำให้ช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างและการบำรุงรักษาผิวทางได้ในระยะยาว

5.2 ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่าในบางคุณสมบัติจะมีแนวโน้มที่ดีตามปริมาณน้ำยางชั้นที่ผสมเพิ่มขึ้นก็ตาม หากแต่ต้องคำนึงถึงอุปสรรคในการเตรียมส่วนผสม อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม ความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวของส่วนผสม ความหนืดที่เพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ซึ่งหากต้องการผสมน้ำยางชั้นในสัดส่วนปริมาณที่มากขึ้น จะต้องทำการปรับปรุงและพัฒนากรรมวิธีในการผสม รวมทั้งการออกแบบเครื่องผสมให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยสามารถเทน้ำยางชั้นลงไปผสมได้ในคราวละมาก ๆ ใช้เวลาและอุณหภูมิต่ำลง และป้องกันการพวยพุ่งของส่วนผสมในขณะทำการผสมเพื่อให้เกิดความปลอดภัยได้ เป็นต้น

ดังนั้น จึงมีข้อเสนอแนะถึงวิธีการผสมน้ำยางชั้นกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อใช้งานในทางปฏิบัติ โดยควรทำการผสมที่โรงงานผลิตแอสฟัลต์ที่ออกแบบถังผสมที่มีขนาดใหญ่ สามารถผสมได้ในปริมาณมาก โดยตัวถังเป็นระบบปิดเพื่อป้องกันการเดือดของน้ำในน้ำยางชั้น มีเพียงท่อสำหรับเทน้ำยางชั้นที่ด้านบนของถังเท่านั้น หรืออาจเป็นท่อลำเลียง 2 ท่อ โดยท่อหนึ่งลำเลียงแอสฟัลต์ซีเมนต์ ส่วนอีกท่อหนึ่งลำเลียงน้ำยางชั้นสู่ถังผสม ซึ่งการให้ความร้อนจะใช้ Hot oil ทำให้มีความร้อนสม่ำเสมอทั่วทั้งถัง และมีเครื่องกวนที่มีลักษณะคล้ายใบพัดติดตั้งภายในถังที่มีความเร็วอย่างน้อย 3,000 รอบต่อนาที เมื่อเตรียมส่วนผสมเสร็จ ในการจัดเก็บจะต้องทำการกวนด้วยอัตราเร็วต่ำตลอดก่อนนำไปจำหน่าย เพื่อให้ส่วนผสมมีความเข้ากันได้เป็นอย่างดี ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการจัดเก็บและขนถ่ายเพื่อจำหน่ายจะขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของน้ำยางชั้นที่ใช้ผสม

แนวทางการวิจัยในอนาคตสำหรับการประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่มในวัสดุแอสฟัลต์นั้น ควรได้มีการพิจารณาและทำการศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ทดลองศึกษาการผสมยางธรรมชาติกับคัทแบคแอสฟัลต์หรือแอสฟัลต์อิมัลชัน เป็นต้น
- ควรมีการนำส่วนผสมยางธรรมชาติกับวัสดุแอสฟัลต์ไปทดสอบจริง และทำการประเมินเปรียบเทียบคุณสมบัติหลังจากการใช้งานในสนาม
- ทำการศึกษาถึงความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในการนำยางธรรมชาติมาใช้เป็นสารผสมเพิ่มในวัสดุแอสฟัลต์เพื่อใช้ในทาง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมทางหลวง กองวิเคราะห์และวิจัย. 2530. วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ.
- กรมทางหลวง กองวิเคราะห์และวิจัย. 2519. วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ.
- ชยธันธ์ พรหมศร. 2541. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของยางแอสฟัลต์และวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารพอลิเมอร์. รายงานฉบับที่ วพ.166. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง. กรุงเทพฯ. กรมทางหลวง.
- ชยธันธ์ พรหมศร. 2541. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี INDIRECT TENSILE TEST เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. รายงานฉบับที่ วพ.167. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง. กรุงเทพฯ. กรมทางหลวง.
- ชยธันธ์ พรหมศร. 2542. Superpave Gyrotory Compactor : ทางเลือกใหม่ในการออกแบบส่วนผสมและควบคุมคุณภาพในระหว่างการก่อสร้างผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการคุณภาพในการใช้งาน. ในบทความทางวิชาการการสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2543. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง. กรุงเทพฯ. กรมทางหลวง.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, พิภรณ์ คูหิรัญ และชยธันธ์ พรหมศร. 2544. ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงการออกแบบวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง. ในรายงานการสัมมนาวิชาการกรมการทาง ครั้งที่ 1, (16-17 กรกฎาคม). กรุงเทพฯ. กรมทางหลวง. : 329-357
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2544. มอก. 851-2542 แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง. กรุงเทพฯ.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. 2544. มอก. 980-2533 น้ำยางชั้นธรรมชาติ. กรุงเทพฯ.
- วราภรณ์ ขจรไชยกูล. 2531. การผลิตยางธรรมชาติ. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง. สถาบันวิจัยยางสงขลา. กรมวิชาการเกษตร.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. 2537. วัสดุการทางชั้นสูง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. 2543. แอสฟัลต์เทคโนโลยีสำหรับถนนลาดยาง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. 2544. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนวิธีมาร์แชล. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2545. แอสฟัลต์ระบบซูเปอร์เพฟ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์.

สมหวัง ช่างสุวรรณ. 2532. มาตรฐานงานทางในส่วนมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต. สำนัก
วิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง. กรุงเทพฯ. กรมทางหลวง.

ภาษาอังกฤษ

American Association of State Highway and Transportation Official. 1998. **Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. AASHTO TP5. : 107-116.

American Association of State Highway and Transportation Official. 1996. **Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension**. AASHTO TP31. : 406-436.

American Association of State Highway and Transportation Official. 1995. **Standard Test Method for Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage**. AASHTO T283. : 751-754.

Atkins, N.H. 1997. Highway Materials, Soils and Concretes. 3rd ed. U.S.A.: Prentice-Hall.

Australian Standard. 1995. **Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt : Dynamic Creep Test**. AS 2891.12.1.

Baburamani, P.S. 1992. **Fatigue Characterisation of Asphalt mixes by Indirect Tensiles Testing**. Australian Road Research Board. Research Report No. 234.

Balghunnain, F., Dhalaan, M.A., Dhubaib, I.A. and Noureldin, S.A. 1992. **Field Trials with Polymer Modified Asphalt in Saudi Arabia**. Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108., American Society for Testing and Materials. Philadelphia.

Department of Highways. 2000. UTM-5P Universal Testing Machine : General Manual Ministry of Transportation and Communications. Thailand.

Fernando, M.J. and Guirguis, H.R. 1983. **Rubberized Asphalt in Pavement Technology for Hot Climates**. Forth Conference of the Road Engineering Association of Asia and Australia., 22-26 August. Indonesia. Vol.3. : 25 43.

Fernando, M.J. and Nadarajah, M. 1969. **Use of Natural Rubber Latex in Road Construction**. Journal of Rubber Research Institute of Malaya. Vol.22, No.5. : 430-440.

- Huang, Y. H. 1993. Pavement Analysis and Design. U.S.A. : Prentice-Hall.
- Jamal, A.A. and Faisal, H.A. 1991. Effect of Loading Magnitude on Measured Resilient Modulus of Asphaltic Concrete Mixes. Transportation Research Record 1317. : 139-144.
- Kennedy, W.T., Kandhal, P.S., Roberts, F.L., Brown, E.R. and Lee, D.Y. 1996. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. 2nd ed. NAPA Research and Education Foundation. U.S.A.
- Lyon, D.J. 1967. Specification for the Manufacture and Use of Rubberized Bituminous Road Materials and Binders. Road Research Laboratory. Rep.3.
- Manoj Kumar, M. and Satta Kumar, M. 2001. A Study on Rubberized Bituminous Mixes. Indian Highways. Dec. Vol.29, No.12. : 17-35.
- Mohamed, H.E. and Yue, Z. 1994. Criteria for Evaluation of Rutting Potential Based on Repeated Uniaxial Compression Test. Transportation Research Record 1454. : 74-81.
- Mullins, L. 1971. Natural Rubber in Asphalt Pavements. Rubber Developments Supplement. No.7. : 1-17.
- Nair, N.R., Mathew, N.M., Thomas, S., Chatterjee, P. and Siddqui, M.A. 1998. Physical and Rheological Characteristics of Liquid Natural Rubber Modified Bitumen. Journal of Applied Polymer Science. Vol.68, No.1. : 53-61.
- Shell Chemical Company. 1992. Kraton Rubber : The Asphalt Modifier that bring Strength and Long Life to Surface Treatment. Chicago, U.S.A.
- Thompson, P.D. 1964. The Use of Natural Rubber in Road Surfacing. Road Research Laboratory. Technology Bulletin No.9.
- Turi, A.E. 1981. Thermal Characterization of Polymeric Materials. U.S.A.: Academic Press.
- Yolder, E.J. and Witzack, M.W. 1975. Principles of Pavement Design. 2nd ed. U.S.A. : John Wiley & Sons.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด				วิธีทดสอบ
		AC 40 - 50	AC 60 - 70	AC 80 - 100	AC 120 - 150	
แอสฟัลต์ซีเมนต์						
1	เพนิทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส น้ำหนักด 100 กรัม เวลา 5 วินาที	40 ถึง 50	60 ถึง 70	80 ถึง 100	120 ถึง 150	มอก.1201
2	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส ไม่น้อยกว่า	232	232	232	219	มอก.1182 เล่ม 2
3	จุดอ่อนตัว องศาเซลเซียส	*	45 - 55	42 - 52	40 - 50	มอก.1216
4	ความยืดดึง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	100	100	100	100	มอก.1202
5	การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน ร้อยละโดยน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า	99	99	99	99	มอก.1203
กากที่เหลือจากการอบ						
6	น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน ร้อยละไม่เกิน	0.8	0.8	1.0	1.3	มอก.1223
7	เพนิทรชัน ร้อยละของเพนิทรชันเดิม ไม่น้อยกว่า	58	54	50	46	มอก.1223 และ มอก.1201
8	ความยืดดึง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที เซนติเมตร ไม่น้อยกว่า	*	50	75	100	มอก.1223 และ มอก.1202

Specification No. DH - SP 408/2536

ข้อกำหนดที่ ทล.-ก. 408/2536

Specification for polymer modified asphalt cement for asphalt concrete

(Asphalt concrete or Hot-mix asphalt)

Item No.	Properties	Unit	Min.	Max.	Test Method
1	Penetration at 25 ^o C, 100 gm., 5 sec	0.1 mm	60	70	DH-T 403
2	Softening point, Ring and Ball	^o C	70	-	ASTM D36
3	Penetration Index	-	+3.0	-	NLT-181 *
4	Ductility at 13 ^o C, 5 cm/min	cm	55	-	DH-T 405
5	Torsional recovery at 25 ^o C	%	70	-	NLT-329 *
6	Float test at 60 ^o C	sec	3,000	-	ASTM D139
7	Toughness/Tenacity test, 25 ^o C				ESM NE-31 **
	Toughness	Kg.cm	200	-	
	Tenacity	Kg.cm	100	-	
8	Brookfield viscosity, Shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21				ASTM D4402
	at 135 ^o C	cP	1,100	-	
	at 165 ^o C	cP	300	-	
9	Storage stability at 165 ^o C, 120 hrs				NTL-328 *
	Difference in softening point	^o C	-	5	
10	Density at 25 ^o C	gm/cc	1.00	1.05	ASTM D70
11	Flash point, Cleveland Open Cup	^o C	220	-	ASTM D92
12	Solubility in trichloroethylene	% wt.	99.0	-	DH-T 409
	Test On Residue From Thin Film Oven Test				
13	Weight loss	% wt.	-	0.5	ASTM D1754
14	Retained penetration at 25 ^o C	%	70	-	DH-T 403
15	Variation in softening point	^o C	4	6	ASTM D36
16	Ductility at 13 ^o C, 5 cm/min	cm	40	-	DH-T 405
17	Torsional recovery at 25 ^o C	%	60	-	NLT-329 *

Note * Refer to the National Laboratory of Transportation Madrid, Spain

** Refer to Elpidio Sanchez Marcos, Spain

ตารางที่ ก 3 ผลการทดสอบค่า Penetration ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Before Thin Film Oven Test (TFOT)					After Thin Film Oven Test (TFOT)					% Retain Penetration
		1st	2nd	3rd	Avg.	All Avg.	1st	2nd	3rd	Avg.	All Avg.	
AC60-70	1	68	69	69	68.7	68	49	48	48	48.3	48	70.59
	2	67	68	67	67.3		47	48	49	48.0		
	3	67	68	69	68.0		47	49	47	47.7		
NRA 1%	1	66	66	65	65.7	65	47	47	47	47.0	46	71.40
	2	65	66	65	65.3		46	46	47	46.3		
	3	64	64	63	63.7		46	46	45	45.7		
NRA 2%	1	64	64	63	63.7	64	50	50	50	50.0	50	77.60
	2	65	64	64	64.3		49	49	50	49.3		
	3	64	63	65	64.0		48	50	49	49.0		
NRA 3%	1	60	61	61	60.7	60	50	51	50	50.3	50	82.78
	2	60	60	60	60.0		51	51	50	50.7		
	3	59	60	59	59.3		51	50	49	50.0		
NRA 4%	1	58	58	58	58.0	58	51	50	49	50.0	49	83.91
	2	58	58	58	58.0		48	49	49	48.7		
	3	58	58	58	58.0		48	48	48	48.0		
NRA 5%	1	58	57	58	57.7	57	48	48	48	48.0	48	84.80
	2	57	56	57	56.7		48	48	49	48.3		
	3	56	57	57	56.7		47	48	48	47.7		
NRA 6%	1	56	57	55	56.0	54	50	50	50	50.0	49	90.18
	2	54	54	53	53.7		48	48	49	48.3		
	3	53	53	54	53.3		48	48	48	48.0		
NRA 7%	1	51	51	50	50.7	50	49	49	48	48.7	49	96.69
	2	51	50	50	50.3		51	51	50	50.7		
	3	50	50	50	50.0		48	49	48	48.3		
NRA 8%	1	61	62	62	61.7	61	62	62	61	61.7	61	100.00
	2	61	61	62	61.3		61	61	61	61.0		
	3	61	61	61	61.0		61	61	62	61.3		
NRA 9%	1	66	65	65	65.3	65	63	63	64	63.3	65	100.86
	2	66	66	65	65.7		64	65	66	65.0		
	3	64	63	63	63.3		65	66	66	65.7		
NRA 10%	1	68	69	69	68.7	68	64	65	65	64.7	65	96.08
	2	66	68	67	67.0		65	66	66	65.7		
	3	69	68	68	68.3		65	65	65	65.0		
NRA 11%	1	79	78	80	79.0	77	73	72	73	72.7	72	92.67
	2	75	77	77	76.3		72	72	71	71.7		
	3	76	76	78	76.7		72	73	71	72.0		
NRA 12%	1	78	77	78	77.7	78	116	117	118	117.0	118	152.14
	2	78	78	78	78.0		118	118	119	118.3		
	3	78	78	77	77.7		118	118	118	118.0		
NRA 13%	1	83	83	85	83.7	82	117	117	119	117.7	119	143.94
	2	82	83	82	82.3		118	118	119	118.3		
	3	81	81	82	81.3		117	118	118	117.7		
NRA 14%	1	93	93	94	93.3	93	124	124	124	124.0	123	132.57
	2	93	94	95	94.0		123	123	123	123.0		
	3	91	91	91	91.0		122	122	122	122.0		
PMA	1	64	65	65	64.7	64	49	50	48	49.0	48	75.00
	2	63	64	65	64.0		48	48	49	48.3		
	3	63	63	64	63.3		48	49	47	48.0		

ตารางที่ ก 4 ผลการทดสอบค่าจุดอ่อนตัว วิธี Ring and Ball

Binder Type	Sample No.	Before TFOT		After TFOT		Variation of Softening Point (°C)
		Softening Point (°C)	Avg.	Softening Point (°C)	Avg.	
AC60-70	1	48.0	48.00	52.5	52.50	4.50
	2	48.0		52.5		
NRA 1%	1	47.5	47.50	50.5	51.00	3.50
	2	47.5		51.5		
NRA 2%	1	48.5	48.75	52.5	52.75	4.00
	2	49.0		53.0		
NRA 3%	1	49.5	49.75	52.5	52.75	3.00
	2	50.0		53.0		
NRA 4%	1	50.0	50.25	51.5	51.75	1.50
	2	50.5		52.0		
NRA 5%	1	50.5	50.50	51.5	51.50	1.00
	2	50.5		51.5		
NRA 6%	1	52.0	52.00	52.0	52.00	0.00
	2	52.0		52.0		
NRA 7%	1	55.0	55.00	55.5	56.00	1.00
	2	55.0		56.5		
NRA 8%	1	57.5	57.50	55.5	55.50	-2.00
	2	57.5		55.5		
NRA 9%	1	57.5	57.75	56.0	56.25	-1.50
	2	58.0		56.5		
NRA 10%	1	59.5	59.50	56.0	56.50	-3.00
	2	59.5		57.0		
NRA 11%	1	57.5	57.75	55.0	55.25	-2.50
	2	58.0		55.5		
NRA 12%	1	57.0	57.50	55.5	56.00	-1.50
	2	58.0		56.5		
NRA 13%	1	60.0	60.00	57.5	58.00	-2.00
	2	60.0		58.5		
NRA 14%	1	58.5	58.50	53.5	54.00	-4.50
	2	58.5		54.5		
PMA	1	88.0	88.50	86.5	86.50	-2.00
	2	89.0		86.5		

ตารางที่ ก 5 ผลการทดสอบค่ายึดดึงที่อุณหภูมิ 13 และ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Before TFOT				After TFOT			
		13 °C Ductility (cm)	Avg. (cm)	25 °C Ductility (cm)	Avg. (cm)	13 °C Ductility (cm)	Avg. (cm)	25 °C Ductility (cm)	Avg. (cm)
AC60-70	1	> 150	> 150	> 150	> 150	14.3	15.1	> 150	> 150
	2	> 150		> 150		15.0		> 150	
	3	> 150		> 150		16.1		> 150	
NRA 1%	1	> 150	> 150	> 150	> 150	59.1	61.0	> 150	> 150
	2	> 150		> 150		61.8		> 150	
	3	> 150		> 150		62.2		> 150	
NRA 2%	1	> 150	> 150	> 150	> 150	51.1	52.1	> 150	> 150
	2	> 150		> 150		51.7		> 150	
	3	> 150		> 150		53.4		> 150	
NRA 3%	1	> 150	> 150	> 150	> 150	49.0	49.2	> 150	> 150
	2	> 150		> 150		49.2		> 150	
	3	> 150		> 150		49.5		> 150	
NRA 4%	1	> 150	> 150	> 150	> 150	44.2	45.5	> 150	> 150
	2	> 150		> 150		45.4		> 150	
	3	> 150		> 150		47.0		> 150	
NRA 5%	1	> 150	> 150	> 150	> 150	39.7	41.5	> 150	> 150
	2	> 150		> 150		41.8		> 150	
	3	> 150		> 150		43.0		> 150	
NRA 6%	1	> 150	> 150	> 150	> 150	36.9	38.3	> 150	> 150
	2	> 150		> 150		38.7		> 150	
	3	> 150		> 150		39.2		> 150	
NRA 7%	1	114.8	125.9	> 150	> 150	36.6	37.0	> 150	> 150
	2	127.6		> 150		37.0		> 150	
	3	135.3		> 150		37.3		> 150	
NRA 8%	1	100.4	104.2	> 150	> 150	34.9	35.9	> 150	> 150
	2	105.0		> 150		36.0		> 150	
	3	107.2		> 150		36.7		> 150	
NRA 9%	1	98.8	101.8	> 150	> 150	30.8	32.0	> 150	> 150
	2	102.5		> 150		31.7		> 150	
	3	104.1		> 150		33.5		> 150	
NRA 10%	1	84.0	85.8	> 150	> 150	30.2	31.4	> 150	> 150
	2	86.1		> 150		31.5		> 150	
	3	87.2		> 150		32.6		> 150	
NRA 11%	1	61.5	64.6	136.5	137.9	27.2	29.1	128.8	131.13
	2	63.4		137.9		29.5		130.9	
	3	69.0		139.2		30.7		133.7	
NRA 12%	1	47.7	49.3	107.3	110.8	24.2	26.2	102	104.8
	2	48.9		111.1		25.6		105.4	
	3	51.2		113.9		28.8		107	
NRA 13%	1	29.5	31.1	89.7	93.6	21.6	22.8	41.2	44.4
	2	31.1		91.3		22.3		44.5	
	3	32.6		99.9		24.4		47.6	
NRA 14%	1	22.1	24.8	52	53.3	11.1	13.9	17.9	22.7
	2	25.3		53.1		13.9		24.3	
	3	26.9		54.8		16.6		26	
PMA	1	114.7	117.0	> 150	> 150	79.0	84.4	> 150	> 150
	2	116.0		> 150		86.3		> 150	
	3	120.2		> 150		87.8		> 150	

ตารางที่ ก 6 ผลการทดสอบค่าร้อยละการคืนตัวกลับ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Before TFOT			After TFOT		
		มุ่ม (องศา)	% Torsional Recovery	Avg.	มุ่ม (องศา)	% Torsional Recovery	Avg.
AC60-70	1	5.0	2.78	3.33	5.0	2.78	2.78
	2	7.0	3.89		5.0	2.78	
NRA 1%	1	6.0	3.33	3.89	5.0	2.78	2.78
	2	8.0	4.44		5.0	2.78	
NRA 2%	1	10.0	5.56	5.83	6.0	3.33	3.33
	2	11.0	6.11		6.0	3.33	
NRA 3%	1	20.0	11.11	11.39	11.0	6.11	6.11
	2	21.0	11.67		11.0	6.11	
NRA 4%	1	22.0	12.22	13.06	13.0	7.22	7.50
	2	25.0	13.89		14.0	7.78	
NRA 5%	1	27.0	15.00	15.00	15.0	8.33	8.33
	2	27.0	15.00		15.0	8.33	
NRA 6%	1	29.0	16.11	16.39	23.0	12.78	13.06
	2	30.0	16.67		24.0	13.33	
NRA 7%	1	47.0	26.11	26.25	25.0	13.89	13.89
	2	47.5	26.39		25.0	13.89	
NRA 8%	1	49.0	27.22	27.22	37.5	20.83	20.97
	2	49.0	27.22		38.0	21.11	
NRA 9%	1	51.0	28.33	28.33	44.0	24.44	24.44
	2	51.0	28.33		44.0	24.44	
NRA 10%	1	45.0	25.00	25.00	44.0	24.44	24.44
	2	45.0	25.00		44.0	24.44	
NRA 11%	1	40.0	22.22	22.36	38.0	21.11	21.39
	2	40.5	22.50		39.0	21.67	
NRA 12%	1	42.0	23.33	23.33	39.0	21.67	21.67
	2	42.0	23.33		39.0	21.67	
NRA 13%	1	40.0	22.22	22.64	40.0	22.22	22.22
	2	41.5	23.06		40.0	22.22	
NRA 14%	1	31.0	17.22	17.50	18.0	10.00	10.14
	2	32.0	17.78		18.5	10.28	
PMA	1	152.0	84.44	85.00	135.0	75.00	75.14
	2	154.0	85.56		135.5	75.28	

ตารางที่ ก 7 ผลการทดสอบ Float test ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	ค่า Float test (sec.)	Average
AC60-70	1	325.00	326.00
	2	326.00	
	3	327.00	
NRA 1%	1	369.00	373.00
	2	373.00	
	3	377.00	
NRA 2%	1	375.00	375.88
	2	375.74	
	3	376.89	
NRA 3%	1	477.75	484.59
	2	482.38	
	3	493.63	
NRA 4%	1	506.73	519.71
	2	520.12	
	3	532.27	
NRA 5%	1	678.74	687.64
	2	689.35	
	3	694.83	
NRA 6%	1	728.57	734.62
	2	735.28	
	3	740.00	
NRA 7%	1	1,379.48	1,417.17
	2	1,427.83	
	3	1,444.21	
NRA 8%	1	1,489.52	1,506.80
	2	1,511.23	
	3	1,519.64	
NRA 9%	1	1,577.25	1,605.78
	2	1,611.16	
	3	1,628.94	
NRA 10%	1	1,752.11	1,758.58
	2	1,755.35	
	3	1,768.29	
NRA 11%	1	1,997.00	2,003.28
	2	2,005.63	
	3	2,007.21	
NRA 12%	1	2,555.54	2,561.35
	2	2,560.21	
	3	2,568.30	
NRA 13%	1	2,570.68	2,578.23
	2	2,578.71	
	3	2,585.30	
NRA 14%	1	2,560.48	2,565.34
	2	2,566.73	
	3	2,568.80	
PMA	1	> 3,000	> 3,000
	2	> 3,000	
	3	> 3,000	

ตารางที่ ก 8 ผลการทดสอบค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	ค่า Toughness (Kg.cm)	Average (Kg.cm)	ค่า Tenacity (Kg.cm)	Average (Kg.cm)
AC60-70	1	50.152	52.460	20.253	19.535
	2	52.945		18.725	
	3	54.282		19.628	
NRA 1%	1	100.011	101.094	50.288	49.650
	2	99.990		48.750	
	3	103.280		49.913	
NRA 2%	1	107.121	106.704	47.652	48.263
	2	105.552		47.225	
	3	107.440		49.913	
NRA 3%	1	112.457	113.244	54.659	53.016
	2	113.362		52.388	
	3	113.913		52.000	
NRA 4%	1	146.896	148.284	69.913	69.878
	2	148.212		69.720	
	3	149.744		70.000	
NRA 5%	1	152.442	152.070	79.872	78.832
	2	152.117		78.222	
	3	151.651		78.403	
NRA 6%	1	154.789	155.872	80.375	82.225
	2	156.556		83.897	
	3	156.272		82.404	
NRA 7%	1	159.554	160.400	85.011	84.466
	2	160.505		84.043	
	3	161.141		84.345	
NRA 8%	1	169.691	170.365	90.139	89.184
	2	170.280		88.775	
	3	171.123		88.638	
NRA 9%	1	202.875	203.586	103.000	102.790
	2	203.931		101.913	
	3	203.952		103.456	
NRA 10%	1	210.000	211.420	144.444	145.033
	2	211.111		145.678	
	3	213.150		144.976	
NRA 11%	1	186.453	189.294	99.139	98.800
	2	191.191		99.111	
	3	190.238		98.149	
NRA 12%	1	151.214	149.189	84.444	84.680
	2	148.204		85.152	
	3	148.148		84.444	
NRA 13%	1	144.444	145.027	80.000	81.321
	2	145.678		81.450	
	3	144.960		82.512	
NRA 14%	1	134.567	135.267	71.893	74.913
	2	135.678		77.777	
	3	135.555		75.070	
PMA	1	381.667	380.667	338.743	340.267
	2	380.567		340.000	
	3	379.767		342.058	

ตารางที่ ก 9 ผลการทดสอบความหนืดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Viscosity at 135 °C (cP)	Average (cP)	Viscosity at 165 °C (cP)	Average (cP)
AC60-70	1	355.5	352.5	100.5	102.5
	2	353.0		103.0	
	3	349.0		104.0	
NRA 1%	1	485.5	492.5	147.0	145.0
	2	501.0		145.0	
	3	491.0		143.0	
NRA 2%	1	634.0	635.0	199.0	200.0
	2	636.0		200.5	
	3	635.0		200.5	
NRA 3%	1	794.0	792.5	282.0	280.0
	2	791.5		280.5	
	3	792.0		277.5	
NRA 4%	1	925.0	930.0	308.0	307.5
	2	935.0		306.5	
	3	930.0		308.0	
NRA 5%	1	1308.0	1307.0	440.5	440.0
	2	1306.0		440.5	
	3	1307.0		439.0	
NRA 6%	1	1345.0	1345.0	461.5	460.0
	2	1345.0		460.0	
	3	1345.0		458.5	
NRA 7%	1	2122.0	2120.0	717.0	717.5
	2	2121.0		717.0	
	3	2117.0		718.5	
NRA 8%	1	3135.0	3140.0	765.0	765.0
	2	3142.0		763.0	
	3	3143.0		767.0	
NRA 9%	1	3842.5	3845.0	900.0	895.0
	2	3840.5		897.0	
	3	3852.0		888.0	
NRA 10%	1	4681.5	4680.0	1313.0	1315.0
	2	4682.5		1316.5	
	3	4676.0		1315.5	
NRA 11%	1	4999.0	4995.0	1309.0	1320.0
	2	4994.0		1338.0	
	3	4992.0		1313.0	
NRA 12%	1	5021.5	5020.0	1345.0	1370.0
	2	5019.5		1390.0	
	3	5019.0		1375.0	
NRA 13%	1	5200.0	5190.0	1378.5	1377.5
	2	5185.0		1376.0	
	3	5185.0		1378.0	
NRA 14%	1	5678.0	5680.0	1599.5	1600.0
	2	5680.5		1601.5	
	3	5681.5		1599.0	
PMA	1	1934.5	1934.0	501.5	506.0
	2	1913.0		507.0	
	3	1954.5		509.5	

ตารางที่ ก 10 ผลการทดสอบเสถียรภาพในการเก็บที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

Binder Type	Sample No.	Softening Point (°C)		Difference in Softening Point (°C)	Average (°C)
		ช่วงบน	ช่วงล่าง		
AC60-70	1	47.0	48.5	1.5	1.5
	2	47.0	48.5	1.5	
NRA 1%	1	47.0	50.0	3.0	3.5
	2	47.0	51.0	4.0	
NRA 2%	1	47.0	49.0	2.0	2.0
	2	47.0	49.0	2.0	
NRA 3%	1	49.5	50.0	0.5	0.5
	2	49.5	50.0	0.5	
NRA 4%	1	48.0	50.0	2.0	1.0
	2	49.0	49.0	0.0	
NRA 5%	1	49.0	50.5	1.5	1.5
	2	49.0	50.5	1.5	
NRA 6%	1	50.5	51.5	1.0	1.0
	2	50.5	51.5	1.0	
NRA 7%	1	52.0	54.5	2.5	2.5
	2	53.0	55.5	2.5	
NRA 8%	1	54.0	56.0	2.0	2.0
	2	54.5	56.5	2.0	
NRA 9%	1	55.5	57.5	2.0	1.5
	2	56.5	57.5	1.0	
NRA 10%	1	57.0	58.0	1.0	1.0
	2	57.5	58.5	1.0	
NRA 11%	1	57.5	58.5	1.0	0.5
	2	58.0	58.0	0.0	
NRA 12%	1	58.0	58.0	0.0	0.5
	2	58.0	59.0	1.0	
NRA 13%	1	58.0	59.5	1.5	1.5
	2	58.0	59.5	1.5	
NRA 14%	1	58.5	59.5	1.0	1.0
	2	58.5	59.5	1.0	
PMA	1	87.0	88.5	1.5	1.5
	2	87.0	88.5	1.5	

ตารางที่ ก 11 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Weight of Pycnometer (g)	Weight of Pycnometer+ Water (g)	Weight of Pycnometer+ Binder (g)	Weight of Pycnometer+ Binder+ Water (g)	Specific Gravity	Avg.	Density (g/cm ³)	Avg. (g/cm ³)
AC60-70	1	29.1723	57.1828	47.8315	57.7692	1.032	1.032	1.029	1.029
	2	31.1033	57.6943	49.6010	58.2889	1.033		1.030	
	3	29.0842	57.1996	49.3362	57.8213	1.032		1.029	
NRA 1%	1	29.1723	57.1828	51.9315	57.8592	1.031	1.035	1.028	1.032
	2	33.3143	59.2072	52.9170	59.9402	1.039		1.036	
	3	29.0842	57.1996	52.3154	58.0213	1.037		1.034	
NRA 2%	1	29.1723	57.1828	50.9315	57.9592	1.037	1.038	1.034	1.035
	2	33.3143	59.2072	52.9170	59.9612	1.040		1.037	
	3	29.0842	57.1996	52.3154	58.0213	1.037		1.034	
NRA 3%	1	32.3743	58.5256	51.0132	59.0652	1.030	1.030	1.027	1.027
	2	29.0653	56.5171	47.9347	57.0764	1.031		1.027	
	3	29.0842	57.1786	51.3154	57.8313	1.030		1.027	
NRA 4%	1	32.3743	58.5256	51.0132	59.0652	1.030	1.033	1.027	1.030
	2	33.3143	59.2072	51.5355	59.7989	1.034		1.030	
	3	29.1842	57.1996	48.3364	57.8415	1.035		1.032	
NRA 5%	1	29.1723	57.1828	47.8315	57.7692	1.032	1.032	1.029	1.029
	2	29.0653	56.5171	47.9347	57.0764	1.031		1.027	
	3	33.3143	59.2072	51.5355	59.7989	1.034		1.030	
NRA 6%	1	29.1723	57.1828	47.6315	57.7392	1.031	1.030	1.028	1.027
	2	29.0653	56.5171	47.9347	57.0764	1.031		1.027	
	3	32.3743	58.5256	51.0132	59.0652	1.030		1.027	
NRA 7%	1	29.1723	57.1828	49.5415	57.6292	1.022	1.023	1.019	1.020
	2	33.3143	59.2072	52.8688	59.6402	1.023		1.020	
	3	32.3765	58.5140	50.0102	58.9432	1.025		1.022	
NRA 8%	1	29.0653	56.5171	50.8429	56.8326	1.015	1.015	1.012	1.012
	2	29.1723	57.1828	48.6205	57.4617	1.015		1.012	
	3	32.3743	58.5256	50.0132	58.7782	1.015		1.011	
NRA 9%	1	29.0653	56.5171	50.8429	56.9726	1.021	1.020	1.018	1.017
	2	29.1723	57.1828	49.6205	57.5817	1.020		1.017	
	3	32.3743	58.5256	50.0132	58.8602	1.019		1.016	
NRA 10%	1	33.3143	59.2072	52.8688	59.4402	1.012	1.012	1.009	1.009
	2	29.1723	57.1828	50.4305	57.4107	1.011		1.008	
	3	32.3743	58.5256	51.5620	58.7538	1.012		1.009	
NRA 11%	1	29.0653	56.5171	50.8429	56.8726	1.017	1.018	1.014	1.015
	2	29.1723	57.1828	49.6205	57.5317	1.017		1.014	
	3	32.3743	58.5256	50.0132	58.8602	1.019		1.016	
NRA 12%	1	29.0653	56.5171	50.8429	56.8326	1.015	1.014	1.012	1.011
	2	29.1723	57.1828	48.6205	57.4617	1.015		1.012	
	3	32.3743	58.5256	51.5620	58.7538	1.012		1.009	
NRA 13%	1	29.0653	56.5171	50.8429	56.8326	1.015	1.015	1.012	1.012
	2	29.1723	57.1828	48.6205	57.4617	1.015		1.012	
	3	32.3743	58.5256	51.7620	58.8438	1.017		1.014	
NRA 14%	1	32.0891	58.5256	51.9739	58.5998	1.004	1.004	1.001	1.001
	2	29.1723	57.1828	51.6205	57.2717	1.004		1.001	
	3	32.3743	58.8257	51.7620	58.9113	1.004		1.001	
PMA	1	29.1723	57.1828	50.8315	57.6592	1.022	1.023	1.019	1.020
	2	33.3143	59.2072	52.8688	59.6402	1.023		1.020	
	3	29.0842	57.1996	51.2152	57.7413	1.025		1.022	

ตารางที่ ก 12 ผลการทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟด้วย Cleveland Open Cup

Binder Type	Sample No.	Flash Point (°C)	Average (°C)	Fire Point (°C)	Average (°C)
AC60-70	1	330	330	371	368
	2	327		364	
	3	332		370	
NRA 1%	1	346	351	393	390
	2	349		391	
	3	357		387	
NRA 2%	1	352	354	390	392
	2	353		391	
	3	357		394	
NRA 3%	1	350	350	381	377
	2	351		376	
	3	349		375	
NRA 4%	1	348	348	369	371
	2	347		371	
	3	349		374	
NRA 5%	1	340	340	366	368
	2	339		362	
	3	342		375	
NRA 6%	1	341	344	366	370
	2	345		368	
	3	346		375	
NRA 7%	1	330	332	351	355
	2	332		356	
	3	333		359	
NRA 8%	1	320	323	351	353
	2	322		353	
	3	326		356	
NRA 9%	1	324	328	353	358
	2	328		356	
	3	332		364	
NRA 10%	1	323	325	343	348
	2	324		346	
	3	328		355	
NRA 11%	1	320	322	343	349
	2	321		347	
	3	325		356	
NRA 12%	1	314	318	352	356
	2	316		355	
	3	323		360	
NRA 13%	1	318	322	349	352
	2	321		354	
	3	326		354	
NRA 14%	1	313	315	347	348
	2	316		348	
	3	317		350	
PMA	1	331	328	355	351
	2	328		351	
	3	326		348	

ตารางที่ ก 13 ผลการทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน

Binder Type	Sample No.	Weight of Erlenmeyer Flask (g)	Weight of Erlenmeyer Flask + Binder (g)	Total Weight of Binder (g)	Weight of Gooch Filter Pad (g)	Weight of Gooch Crucible + Insoluble Matter (g)	Weight of Insoluble Matter (g)	Weight of Binder Soluble in Solvent (g)	% of Binder Soluble in Solvent	Average
AC60-70	1	99.1285	102.7659	3.6374	18.8797	18.8835	0.0038	3.6336	99.90	99.93
	2	99.5475	103.0840	3.5365	19.0501	19.0514	0.0013	3.5352	99.96	
NRA 1%	1	94.7281	96.9364	2.2083	17.9050	17.9053	0.0003	2.2080	99.99	99.99
	2	99.5475	101.7640	2.2365	19.0501	19.0504	0.0003	2.2362	99.99	
NRA 2%	1	94.7281	96.9254	2.1973	17.9050	17.9056	0.0006	2.1967	99.97	99.97
	2	99.5475	101.5840	2.0365	19.0501	19.0506	0.0005	2.0360	99.98	
NRA 3%	1	94.7281	96.9264	2.1983	17.9050	17.9056	0.0006	2.1977	99.97	99.96
	2	99.5475	101.5734	2.0259	19.0501	19.0511	0.0010	2.0249	99.95	
NRA 4%	1	94.7281	96.9266	2.1985	17.9048	17.9059	0.0011	2.1974	99.95	99.94
	2	99.5475	101.5734	2.0259	19.0501	19.0514	0.0013	2.0246	99.94	
NRA 5%	1	94.7281	96.8954	2.1673	17.9051	17.9061	0.0010	2.1663	99.95	99.95
	2	99.5475	101.5734	2.0259	19.0501	19.0511	0.0010	2.0249	99.95	
NRA 6%	1	94.7281	96.7952	2.0671	17.9051	17.9056	0.0005	2.0666	99.98	99.98
	2	99.5475	101.5521	2.0046	19.0501	19.0505	0.0004	2.0042	99.98	
NRA 7%	1	94.7281	96.7952	2.0671	17.8925	17.8954	0.0029	2.0642	99.86	99.86
	2	99.5475	101.5521	2.0046	19.0452	19.0479	0.0027	2.0019	99.87	
NRA 8%	1	94.7281	96.7952	2.0671	17.8925	17.8954	0.0029	2.0642	99.86	99.86
	2	99.5475	101.5521	2.0046	19.0452	19.0479	0.0027	2.0019	99.87	
NRA 9%	1	94.7381	96.7852	2.0471	17.8925	17.8956	0.0031	2.0440	99.85	99.85
	2	99.5475	101.5821	2.0346	19.0452	19.0481	0.0029	2.0317	99.86	
NRA 10%	1	94.7381	96.7852	2.0471	17.8925	17.8956	0.0031	2.0440	99.85	99.83
	2	99.5475	101.5821	2.0346	19.0482	19.0521	0.0039	2.0307	99.81	
NRA 11%	1	94.7381	96.7852	2.0471	17.8925	17.8936	0.0011	2.0460	99.95	99.93
	2	99.5475	101.5821	2.0346	19.0482	19.0501	0.0019	2.0327	99.91	
NRA 12%	1	94.7381	96.7852	2.0471	17.8925	17.8936	0.0011	2.0460	99.95	99.96
	2	99.5475	101.5821	2.0346	19.0482	19.0488	0.0006	2.0340	99.97	
NRA 13%	1	94.7381	96.7852	2.0471	17.8925	17.8955	0.0030	2.0441	99.85	99.86
	2	99.5475	101.5821	2.0346	19.0482	19.0511	0.0029	2.0317	99.86	
NRA 14%	1	94.7381	96.7852	2.0471	17.8925	17.8955	0.0030	2.0441	99.85	99.84
	2	99.5475	101.5821	2.0346	19.0472	19.0508	0.0036	2.0310	99.82	
PMA	1	99.1285	101.7759	2.6474	18.8797	18.8835	0.0038	2.6436	99.86	99.90
	2	99.5475	102.1840	2.6365	19.0501	19.0514	0.0013	2.6352	99.95	

ตารางที่ ก 14 ผลการทดสอบน้ำหนักที่สูญเสียจากความร้อนวิธี Thin Film Oven Test (TFOT)

Binder Type	Sample No.	Before Heat			After Heat		% Loss	Avg.
		Weight of Container (g)	Weight of Container + Binder (g)	Weight of Binder (g)	Weight of Container + Binder (g)	Weight of Binder (g)		
AC60-70	1	112.9576	162.7538	49.7962	162.7257	49.7681	0.06	0.05
	2	109.9242	160.4765	50.5523	160.4554	50.5312	0.04	
	3	139.0913	189.2702	50.1789	189.2439	50.1526	0.05	
NRA 1%	1	112.9576	163.7638	50.8062	163.7557	50.7981	0.02	0.01
	2	109.9246	160.2659	50.3413	160.2597	50.3351	0.01	
	3	113.2055	164.0843	50.8788	164.0802	50.8747	0.01	
NRA 2%	1	112.9576	163.7638	50.8062	163.7557	50.7981	0.02	0.02
	2	140.4904	191.1602	50.6698	191.1499	50.6595	0.02	
	3	138.0050	188.3697	50.3647	188.3581	50.3531	0.02	
NRA 3%	1	112.9576	163.7638	50.8062	163.7557	50.7981	0.02	0.02
	2	140.4904	191.1602	50.6698	191.1499	50.6595	0.02	
	3	138.0050	188.3697	50.3647	188.3581	50.3531	0.02	
NRA 4%	1	107.9912	158.8153	50.8241	158.8025	50.8113	0.03	0.03
	2	135.2636	185.0601	49.7965	185.0428	49.7792	0.03	
	3	109.0055	159.5468	50.5413	159.5321	50.5266	0.03	
NRA 5%	1	107.9912	158.8153	50.8241	158.8025	50.8113	0.03	0.03
	2	135.2636	185.0601	49.7965	185.0428	49.7792	0.03	
	3	109.0055	159.5468	50.5413	159.5321	50.5266	0.03	
NRA 6%	1	107.9912	158.8153	50.8241	158.8025	50.8113	0.03	0.03
	2	135.2636	185.0601	49.7965	185.0428	49.7792	0.03	
	3	109.0055	159.5468	50.5413	159.5321	50.5266	0.03	
NRA 7%	1	112.9576	162.7538	49.7962	162.7257	49.7681	0.06	0.06
	2	109.7026	160.0950	50.3924	160.0499	50.3473	0.09	
	3	109.0055	159.5468	50.5413	159.5321	50.5266	0.03	
NRA 8%	1	112.9576	162.7538	49.7962	162.7287	49.7711	0.05	0.04
	2	109.7026	160.0950	50.3924	160.0699	50.3673	0.05	
	3	109.0055	159.5468	50.5413	159.5321	50.5266	0.03	
NRA 9%	1	112.9576	162.7438	49.7862	162.7287	49.7711	0.03	0.02
	2	109.7026	160.0730	50.3704	160.0699	50.3673	0.01	
	3	109.0055	159.5468	50.5413	159.5321	50.5266	0.03	
NRA 10%	1	112.9576	162.7438	49.7862	162.7287	49.7711	0.03	0.03
	2	109.7026	160.0830	50.3804	160.0699	50.3673	0.03	
	3	109.0055	159.5468	50.5413	159.5321	50.5266	0.03	
NRA 11%	1	112.9576	162.7538	49.7962	162.7137	49.7561	0.08	0.09
	2	109.7026	160.0950	50.3924	160.0499	50.3473	0.09	
	3	109.0055	160.5468	51.5413	160.5023	51.4968	0.09	
NRA 12%	1	140.4904	191.1602	50.6698	191.1499	50.6595	0.02	0.02
	2	138.0056	188.3697	50.3641	188.3581	50.3525	0.02	
	3	161.6666	211.6017	49.9351	211.5920	49.9254	0.02	
NRA 13%	1	140.4904	191.1602	50.6698	191.1499	50.6595	0.02	0.03
	2	112.9576	162.7438	49.7862	162.7287	49.7711	0.03	
	3	109.7026	160.083	50.3804	160.0699	50.3673	0.03	
NRA 14%	1	112.9576	162.7538	49.7962	162.7257	49.7681	0.06	0.05
	2	109.9242	160.4765	50.5523	160.4554	50.5312	0.04	
	3	139.0913	189.2702	50.1789	189.2439	50.1526	0.05	
PMA	1	112.9576	163.7638	50.8062	163.6957	50.7381	0.13	0.13
	2	109.9242	160.4865	50.5623	160.4554	50.5312	0.06	
	3	139.0913	189.3013	50.2100	189.2039	50.1126	0.19	

ตารางที่ ก 15 ค่า Complex shear modulus (G^*) ที่ได้จากการทดสอบด้วย DSR ที่อุณหภูมิต่าง ๆ
ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

Before Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	G^* (Pa)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	5.17E+05	2.10E+06	2.80E+06	2.50E+06	2.90E+06	4.10E+06	3.71E+06	3.65E+06	3.69E+06	3.70E+06	3.70E+06	3.60E+06	3.50E+06	3.60E+06	1.00E+06	1.60E+06
25	2.70E+05	1.37E+06	1.40E+06	1.60E+06	1.64E+06	1.65E+06	1.00E+06	7.50E+05	7.24E+05	6.30E+05	5.60E+05	4.20E+05	3.70E+05	3.20E+05	2.90E+05	6.60E+05
30	56400	1.50E+05	2.50E+05	3.00E+05	3.42E+05	4.20E+05	4.40E+05	4.30E+05	3.96E+05	3.30E+05	3.00E+05	2.00E+05	1.80E+05	1.90E+05	1.40E+05	2.81E+05
35	24000	47000	80000	1.68E+05	1.88E+05	1.85E+05	1.83E+05	1.80E+05	1.69E+05	1.60E+05	1.45E+05	1.04E+05	1.03E+05	1.00E+05	79000	1.17E+05
40	20000	40000	32951.8	42300	57339.3	63800	62917.4	83000	86000	81000	74800	62000	53300	48000	45700	52000
46	14500	20900	18800	18500	25000	27700	28000	28000	35000	34000	29000	29900	25000	24000	20000	16500
52	4600	8000	7600	9700	10700	10000	10900	11200	11000	11000	11000	10700	11000	12000	12300	7800
58	2000	3000	3200	3700	4000	4600	4900	4700	4600	4900	4550	4850	5300	5600	6000	4000
64	960	1400	1570	1640	1700	1640	1800	2100	2200	2600	2870	2840	3200	3700	3900	2385
70	500	735	780	780	800	800	840	1100	1140	1300	1300	1380	1540	1700	1850	1350
76	230	360	360	360	370	370	400	560	606.64	678	747.06	770	790	800	800	850

After Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	G^* (Pa)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	1.50E+06	3.34E+06	3.60E+06	3.70E+06	3.80E+06	4.59E+06	4.60E+06	4.00E+06	3.98E+06	3.77E+06	3.10E+06	2.97E+06	2.75E+06	2.10E+06	1.80E+06	1.97E+06
25	4.80E+05	1.67E+06	1.80E+06	2.00E+06	1.67E+06	1.80E+06	1.42E+06	8.00E+05	7.60E+05	7.00E+05	6.00E+05	4.50E+05	4.30E+05	3.60E+05	3.10E+05	1.00E+06
30	90000	2.43E+05	2.94E+05	3.50E+05	3.70E+05	4.10E+05	4.70E+05	4.29E+05	3.90E+05	3.30E+05	2.75E+05	1.80E+05	1.67E+05	1.70E+05	1.45E+05	3.70E+05
35	62000	73703.4	77000	87079.9	1.10E+05	1.16E+05	1.20E+05	1.28E+05	1.34E+05	1.40E+05	1.77E+05	1.09E+05	97000	95000	90000	1.48E+05
40	45000	60976.5	62000	67800	67000	80953.1	82000	87198.7	94000	88000	71000	66000	57500	54000	51000	62000
46	21800	27000	28000	29200	34000	33000	36109	44000	39000	36000	30000	24400	24600	22500	20000	25500
52	8100	10700	12000	11500	12027.7	12300	13000	13000	12800	13000	13400	13600	13800	13900	14000	11400
58	3700	4500	4300	4500	4200	4000	4000	5000	5200	5300	5300	5500	6000	6550	7800	5700
64	1500	1860	1880	1900	1900	1960	1900	1900	2000	2200	2600	2760	2850	3400	3700	3070
70	740	800	800	860	900	900	950	1000	1090	1160	1180	1450	1550	1700	1900	1700
76	303	400	390	460	490	500	570	565	560	620	680	740	780	800	800	1000

ตารางที่ ก 16 ค่า Phase angle (δ) ที่ได้จากการทดสอบด้วย DSR ที่อุณหภูมิต่างๆ
ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

Before Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	Phase Angle δ (Degree)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	77.80	71.20	74.73	69.69	63.80	65.95	61.13	53.80	53.12	53.14	51.52	54.07	50.00	47.96	49.65	66.00
25	79.40	73.00	76.34	71.21	66.70	68.90	68.18	59.80	55.12	52.37	56.30	53.68	52.87	55.10	50.55	69.40
30	81.50	77.00	77.78	77.12	73.99	74.10	73.00	67.68	65.75	64.01	58.09	57.15	54.55	56.72	52.17	70.65
35	83.80	81.80	81.43	80.86	77.20	78.72	77.18	66.70	66.00	66.40	61.00	58.80	57.84	60.20	55.15	70.08
40	86.36	84.50	83.90	83.45	80.08	81.14	80.12	70.50	68.96	69.72	66.49	64.90	61.13	64.10	58.12	68.20
46	88.60	86.58	85.85	84.30	81.70	83.64	80.55	73.49	72.71	72.74	70.88	67.47	67.50	71.99	67.34	66.80
52	90.15	87.62	86.40	85.03	83.08	83.94	82.00	77.79	75.60	74.29	74.22	70.45	69.59	74.70	70.00	65.15
58	90.90	88.00	86.93	85.61	84.00	84.30	82.30	79.85	77.64	77.36	78.56	73.00	73.24	77.62	72.10	63.50
64	91.40	88.40	87.58	86.30	85.20	84.89	82.88	80.81	78.62	78.25	79.50	74.05	76.06	80.45	75.58	61.90
70	91.64	89.00	88.32	87.08	86.37	85.60	83.84	81.49	79.40	81.36	80.00	74.30	78.09	83.16	78.54	59.27
76	91.95	89.15	88.76	87.31	87.21	86.46	84.92	82.10	80.33	81.85	80.00	74.07	79.40	84.41	80.25	57.50

After Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	Phase Angle δ (Degree)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	67.20	66.50	66.68	64.30	61.20	58.83	58.10	53.11	51.60	52.09	52.20	53.35	52.00	51.25	49.51	60.00
25	74.30	68.00	68.75	65.50	63.70	65.72	66.35	59.01	54.36	52.80	52.29	53.00	50.95	59.50	56.16	64.00
30	79.00	75.24	70.00	71.00	67.20	73.36	72.00	66.72	66.74	63.60	54.89	56.03	53.21	62.74	58.65	68.00
35	81.50	79.41	78.98	77.29	71.81	75.85	76.54	69.48	70.68	66.67	56.73	58.58	55.90	65.88	61.89	69.40
40	83.70	82.63	81.66	80.20	76.54	80.05	79.26	74.66	72.96	70.50	61.00	64.40	59.44	68.95	65.22	68.90
46	86.93	85.56	84.14	83.35	83.41	82.70	82.57	77.29	77.90	76.22	68.00	66.70	69.53	73.80	71.60	67.40
52	88.50	87.29	86.44	85.40	85.60	84.78	84.25	80.87	82.08	79.93	70.80	71.00	69.90	77.41	74.50	66.45
58	89.40	88.37	87.87	86.83	87.10	86.26	85.33	83.71	84.30	82.42	73.13	73.93	73.20	80.67	77.40	65.80
64	90.33	89.11	88.62	87.77	87.82	87.12	86.15	85.63	85.53	83.88	75.21	75.39	76.30	83.15	80.60	65.40
70	90.70	89.63	89.34	88.41	88.40	87.65	86.85	86.27	86.35	85.14	76.31	76.09	78.52	85.20	83.40	64.70
76	90.13	89.84	88.67	88.11	88.66	88.00	86.89	86.53	86.97	85.61	77.03	76.70	79.76	86.57	84.99	63.38

ตารางที่ ก 17 ค่า $G^* / \sin \delta$ ที่ได้จากการทดสอบด้วย DSR ที่อุณหภูมิต่าง ๆ
 ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

Before Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	$G^* / \sin \delta$ (Pa)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	528946	2218351	2902470	2665733	3232068	4489755	4236526	4523147	4613110	4624401	4726469	4445902	4568926	4847326	1312158	1751418
25	274687	1432598	1440753	1690072	1785624	1768577	1077173	867780	882548	795485	673114	521272	464085	390172	375560	705083
30	57026.4	153946	255796	307743	355800	436708	460104	464826	434324	367127	353407	238069	220961	227273	177252	297823
35	24141.2	47485.5	80903.3	170161	192791	188644	187678	195983	184994	174603	165786	121586	121668	115239	96265.1	124446
40	20040.4	40185	33139.4	42577.9	58209.6	64570.5	63864.6	88050.4	92143.2	86353	81571.2	68465.3	60864.4	53359.6	53818.1	56005.2
46	14504.3	20937.3	18849.4	18591.9	25264.6	27871.5	28385.2	29204.1	36656.4	35603.3	30693.2	32370.6	27059.8	25236.5	21673	17951.7
52	4600.02	8006.91	7615.03	9736.61	10778.5	10056.2	11007.1	11459.2	11356.8	11426.9	11430.8	11354.6	11736.8	12440.9	13089.4	8595.88
58	2000.25	3001.83	3204.6	3710.89	4022.03	4622.86	4944.58	4774.73	4709.15	5021.7	4642.23	5071.61	5535.13	5733.32	6305.21	4469.6
64	960.287	1400.55	1571.4	1643.43	1705.98	1646.54	1813.99	2127.31	2244.12	2655.65	2918.88	2953.71	3297.1	3752	4026.86	2703.69
70	500.205	735.112	780.335	781.014	801.608	802.365	844.878	1112.25	1159.79	1314.92	1320.05	1433.48	1573.88	1712.19	1887.63	1570.53
76	230.133	360.04	360.084	360.397	370.439	370.707	401.577	565.366	615.384	684.917	758.585	800.751	803.715	803.823	811.725	1007.84

After Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	$G^* / \sin \delta$ (Pa)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	1627140	3642073	3920252	4106197	4336381	5364435	5418320	5001316	5078516	4778340	3923281	3701872	3489800	2692706	2366804	2274760
25	498602	1801153	1931314	2197896	1862828	1974665	1550196	933209	935161	878812	758422	563461	553698	417813	373226	1112602
30	91684.5	251292	312868	370167	401361	427920	494187	467023	424503	368422	336166	217043	208532	191240	169788	399058
35	62688.6	74980.5	78446.5	89267.3	115786	119630	123389	136672	141996	152466	211699	127729	117141	104088	102036	158110
40	45273.4	61484.5	62662.7	68804	68892.3	82189.3	83462	90420.1	98316	93354.7	81178.1	73184.3	66775.3	57861.2	56172.1	66455.6
46	21831.3	27081.3	28147.1	29397.8	34226.1	33269.7	36414.8	45105.3	39886.1	37066.9	32356	26566.6	26258.1	23430.3	21077.6	27621
52	8102.78	10712	12023.2	11537.2	12063.3	12351.2	13065.7	13166.8	12923.3	13203.4	14189.3	14383.6	14695	14242.5	14528.4	12435.8
58	3700.2	4501.82	4302.97	4506.9	4205.39	4008.54	4013.32	5030.28	5225.84	5346.72	5538.34	5723.66	6267.5	6637.81	7992.48	6249.18
64	1500.02	1860.22	1880.55	1901.44	1901.38	1962.48	1904.3	1905.54	2006.1	2212.61	2689.1	2852.23	2933.46	3424.44	3750.36	3376.46
70	740.055	800.017	800.053	860.331	900.351	900.758	951.438	1002.12	1092.22	1164.19	1214.5	1493.81	1581.64	1705.98	1912.68	1880.36
76	303.001	400.002	390.105	460.25	490.134	500.305	570.841	566.038	560.784	621.824	697.803	760.395	792.625	801.436	803.068	1118.57

ตารางที่ ก 18 ค่า $G^* \sin \delta$ ที่ได้จากการทดสอบด้วย DSR ที่อุณหภูมิต่างๆ
ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

Before Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	$G^* \sin \delta$ (Pa)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	505324	1987963	2701147	2344571	2602049	3744080	3248912	2945405	2951610	2960383	2896454	2915044	2681156	2673639	762104	1461673
25	265393	1310138	1360400	1514729	1506252	1539373	928356	648206	593935	498941	465894	338403	294989	262449	223932	617799
30	55780.5	146156	244336	292452	328735	403931	420774	397783	361058	296627	254664	168019	146632	158840	110577	265127
35	23859.6	46519.5	79106.8	165867	183328	181426	178438	165320	154389	146618	126820	88957.9	87196.2	86776.5	64831.4	110000
40	19959.7	39815.8	32765.2	42023.9	56482	63038.7	61984.3	78239.2	80266.4	75978.8	68590.9	56145.3	46675.7	43178.8	38806.4	48281.3
46	14495.7	20862.8	18750.7	18408.5	24738.1	27529.5	27620	26845.6	33418.4	32468.9	27400.2	27618	23097	22824.1	18456.1	15165.7
52	4599.98	7993.1	7585	9663.53	10622.1	9944.12	10793.9	10946.6	10654.4	10589.1	10585.4	10083.1	10309.4	11574.7	11558.2	7077.81
58	1999.75	2998.17	3195.41	3689.14	3978.09	4577.26	4855.82	4626.44	4493.38	4781.24	4459.6	4638.08	5074.86	5469.78	5709.57	3579.74
64	959.713	1399.45	1568.6	1636.58	1694.04	1633.48	1786.12	2073.04	2156.75	2545.52	2821.94	2730.67	3105.76	3648.72	3777.14	2103.87
70	499.795	734.888	779.665	778.987	798.395	797.642	835.15	1087.89	1120.55	1285.25	1280.25	1328.51	1506.85	1687.9	1813.12	1160.44
76	229.867	359.96	359.916	359.603	369.561	369.294	398.429	554.685	598.021	671.152	735.71	740.43	776.519	796.196	788.445	716.883

After Thin Film Oven Test (TFOT)

Temp. (°C)	$G^* \sin \delta$ (Pa)															
	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	PMA
20	1382795	3062981	3305910	3333985	3329965	3927366	3905270	3199158	3119100	2974443	2449481	2382822	2167030	1637757	1368935	1706070
25	462092	1548397	1677614	1819923	1497132	1640784	1300738	685806	617648	557571	474670	359386	333936	310186	257485	898794
30	88346.4	234981	276270	330932	341089	392830	446997	394073	358302	295585	224964	149279	133740	151119	123831	343058
35	61319	72448	75580.2	84946.1	104503	112480	116704	119878	126454	128553	147989	93017.2	80321.9	86705.7	79384	138537
40	44728.2	60472.7	61344.3	66810.7	65159.7	79735.5	80563.6	84092.1	89873.4	82952.5	62098	59520.9	49513.1	50396.4	46304.1	57843.1
46	21768.7	26919	27853.7	29003.5	33775.4	32732.5	35805.8	42921.8	38133.5	34963.8	27815.5	22410.1	23046.6	21606.6	18977.5	23541.9
52	8097.22	10688	11976.8	11463	11992.3	12249	12934.6	12835.3	12677.9	12799.7	12654.6	12859.1	12959.5	13565.8	13490.8	10450.5
58	3699.8	4498.18	4297.03	4493.11	4194.62	3991.48	3986.72	4969.9	5174.29	5253.69	5071.92	5285.08	5743.92	6463.35	7612.15	5199.08
64	1499.98	1859.78	1879.45	1898.56	1898.62	1957.52	1895.71	1894.48	1993.92	2187.46	2513.86	2670.76	2768.91	3375.73	3650.32	2791.35
70	739.945	799.983	799.947	859.669	899.649	899.243	948.565	997.882	1087.79	1155.83	1146.48	1407.48	1518.99	1694.04	1887.41	1536.94
76	302.999	399.998	389.895	459.75	489.866	499.695	569.161	563.964	559.217	618.181	662.652	720.152	767.576	798.567	796.944	893.998

ตารางที่ ก 19 ผลการทดสอบการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสานโดยวิธี Plate Stripping Test

Binder Type	Sample No.	ลักษณะผิว	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Total	% Strip	Average
AC60-70	1	คะแนน	0.00	0.00	0.25	0.50	0.00	0.25	0.00	0.50	1.00	0.00	0.75	1.00	0.25	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	5.50	22.00	23.50
	2	คะแนน	0.50	0.00	0.75	0.00	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	6.25	25.00	
NRA 1%	1	คะแนน	0.50	0.00	0.00	0.25	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.25	0.00	1.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	5.50	22.00	21.50
	2	คะแนน	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.75	0.25	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50	5.25	21.00	
NRA 2%	1	คะแนน	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.25	0.00	5.25	21.00	20.50
	2	คะแนน	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.50	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.75	0.00	0.00	5.00	20.00	
NRA 3%	1	คะแนน	0.25	0.00	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.75	0.00	0.75	5.50	22.00	21.00
	2	คะแนน	0.25	0.00	0.75	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.25	0.25	0.00	0.50	5.00	20.00	
NRA 4%	1	คะแนน	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	1.00	0.25	4.75	19.00	21.00
	2	คะแนน	0.00	0.75	0.00	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.50	0.25	0.00	0.50	0.00	0.00	0.75	5.75	23.00	
NRA 5%	1	คะแนน	0.00	0.50	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	0.25	0.50	0.00	0.00	0.00	0.75	4.75	19.00	19.00
	2	คะแนน	0.75	0.50	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.25	0.00	0.75	0.50	0.00	0.00	0.25	4.75	19.00	
NRA 6%	1	คะแนน	0.50	0.00	0.00	1.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	4.25	17.00	18.00
	2	คะแนน	0.75	0.00	0.00	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.25	0.00	4.75	19.00	
NRA 7%	1	คะแนน	0.00	1.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	3.75	15.00	15.00
	2	คะแนน	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.50	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.25	0.00	0.00	1.00	0.00	0.25	3.75	15.00	
NRA 8%	1	คะแนน	0.25	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	3.00	12.00	13.50
	2	คะแนน	0.00	0.00	1.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.75	0.25	0.00	0.25	3.75	15.00	
NRA 9%	1	คะแนน	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	3.25	13.00	13.00
	2	คะแนน	0.50	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	3.25	13.00	
NRA 10%	1	คะแนน	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	3.75	15.00	15.50
	2	คะแนน	0.00	0.50	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	1.00	0.00	4.00	16.00	
NRA 11%	1	คะแนน	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.75	4.50	18.00	17.50
	2	คะแนน	0.75	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.25	0.00	0.25	0.00	4.25	17.00	
NRA 12%	1	คะแนน	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	1.00	0.00	0.50	4.50	18.00	19.50	
	2	คะแนน	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.75	5.25	21.00	
NRA 13%	1	คะแนน	0.00	1.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.75	5.25	21.00	22.00
	2	คะแนน	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.75	0.00	0.00	5.75	23.00	
NRA 14%	1	คะแนน	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.75	6.00	24.00	23.50
	2	คะแนน	0.50	0.00	0.00	0.25	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.50	0.75	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.75	0.00	0.25	0.00	5.75	23.00	
PMA	1	คะแนน	0.50	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.50	0.00	0.25	3.25	13.00	11.00
	2	คะแนน	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	2.25	9.00	



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.032

Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{Ad}) : 2.5881

Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.6269

Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.431

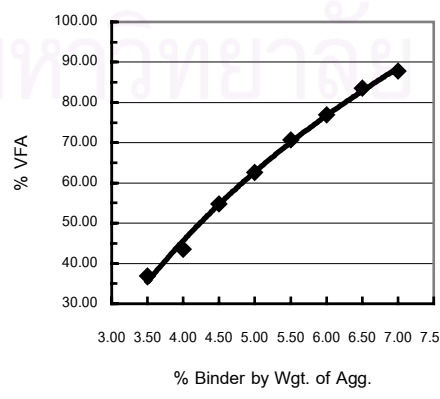
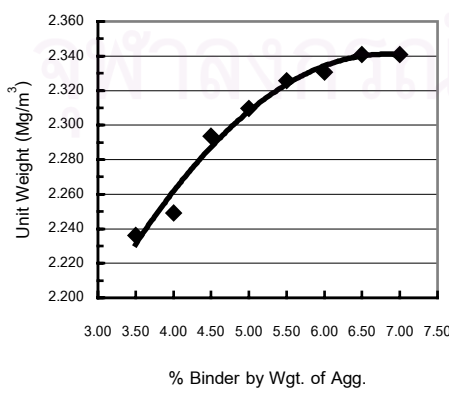
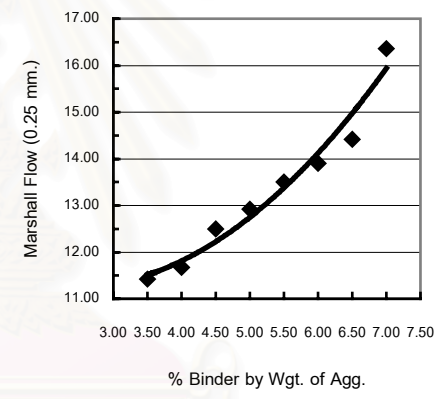
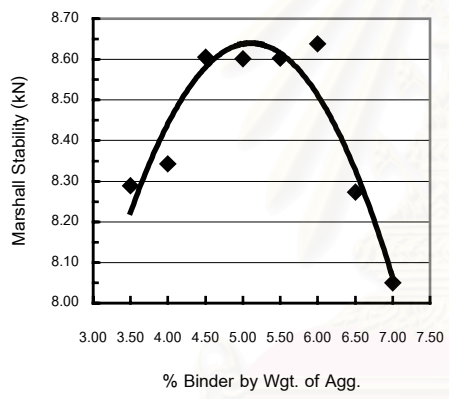
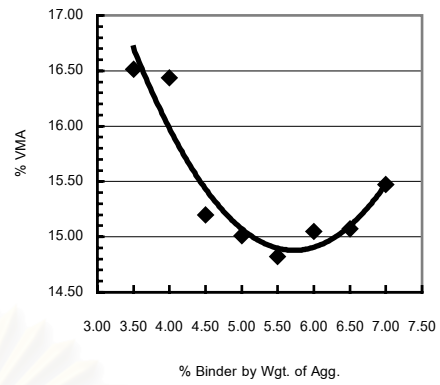
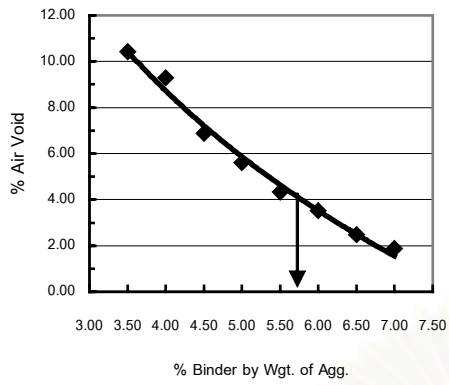
Materials Type : AC 60-70

Design Traffic : Heavy (75 Blows Compact for each side)

Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)

% Asphalt absorption (x) : 0.59

No.	% AC by wgt. of Agg.	% AC by wgt. of Mix	% Eff AC by wgt. of Mix	Diameter (mm.)	Spec. Height (mm.)	Mass (g)		Bulk Vol. (cc)	Bulk Density (g/cm ³)	Unit Weight (Mg/m ³)	% Vol. AC	% Vol. Agg.	% Air Void	Stability (N)		% VFA	Flow		
						Sat. Surface in water	Dry in air							Measured	Adjusted		Measured	(0.25 mm.)	
1	3.50	3.38	2.81	102.20	69.57	1249.00	1249.00	553.50	2.244	2.244	6.11	83.77	10.12	37.66	10.14	0.89	9.02	2.74	
2	3.50	3.38	2.81	102.07	70.03	1285.00	1285.00	557.00	2.241	2.241	6.10	83.65	10.25	16.35	37.32	9.77	0.89	8.70	2.85
3	3.50	3.38	2.81	102.30	71.40	1249.00	1257.50	561.50	2.224	2.224	6.06	83.04	10.90	16.96	35.73	8.31	0.86	7.15	11.92
Avg.	3.50	3.38	2.81	102.19	70.33	1265.83	1265.83	557.33	2.235	2.235	6.09	83.49	10.42	16.51	36.91	9.41	0.88	8.29	11.43
4	4.00	3.65	3.28	102.90	69.53	1251.00	1260.00	556.00	2.250	2.250	7.15	83.59	9.26	16.41	43.57	9.13	0.89	8.13	11.20
5	4.00	3.65	3.28	102.47	69.17	1247.50	1252.50	554.80	2.249	2.249	7.14	83.54	9.32	16.46	43.40	9.85	0.89	8.77	2.93
6	4.00	3.65	3.28	101.83	69.70	1251.00	1260.00	556.80	2.249	2.249	7.15	83.56	9.29	16.44	43.47	9.14	0.89	8.13	3.03
Avg.	4.00	3.65	3.28	102.40	69.47	1249.83	1257.50	555.87	2.249	2.249	7.15	83.57	9.29	16.43	43.46	9.37	0.89	8.54	2.92
7	4.50	4.31	3.74	102.93	69.77	1256.50	1261.00	549.50	2.287	2.287	8.29	84.55	7.16	15.45	53.64	9.17	0.89	8.16	3.25
8	4.50	4.31	3.74	102.00	68.53	1258.50	1264.50	547.00	2.301	2.301	8.34	85.07	6.59	14.93	55.86	10.58	0.89	9.42	3.15
9	4.50	4.31	3.74	102.93	69.30	1251.00	1256.00	545.50	2.293	2.293	8.31	84.79	6.89	15.21	54.67	8.86	0.93	8.24	2.97
Avg.	4.50	4.31	3.74	102.62	69.20	1259.50	1261.67	547.33	2.284	2.284	8.31	84.80	6.88	15.20	54.73	9.54	0.90	8.61	3.12
10	5.00	4.76	4.20	102.77	68.60	1256.00	1250.50	545.00	2.306	2.306	9.38	84.81	5.82	15.19	61.72	8.38	0.93	7.79	3.18
11	5.00	4.76	4.20	102.13	69.97	1263.00	1268.50	547.50	2.307	2.307	9.39	84.89	5.72	15.11	62.12	9.58	0.89	8.53	3.27
12	5.00	4.76	4.20	102.63	70.23	1261.00	1265.00	544.20	2.317	2.317	9.43	85.27	5.30	14.73	64.00	10.20	0.93	9.49	3.24
Avg.	5.00	4.76	4.20	102.51	69.60	1260.00	1264.67	545.67	2.310	2.310	9.40	84.98	5.61	15.01	62.61	9.99	0.92	8.60	3.23
13	5.50	5.21	4.66	102.47	69.83	1262.00	1255.00	542.50	2.326	2.326	10.49	85.20	4.31	14.80	70.86	9.05	0.93	8.42	3.35
14	5.50	5.21	4.66	102.17	69.03	1270.50	1270.50	543.50	2.331	2.331	10.51	85.38	4.11	14.62	71.88	9.15	0.93	8.51	3.49
15	5.50	5.21	4.66	102.10	68.20	1270.00	1273.00	547.50	2.320	2.320	10.46	84.95	4.59	15.05	69.52	9.98	0.89	8.88	3.29
Avg.	5.50	5.21	4.66	102.25	69.02	1268.33	1268.33	544.50	2.326	2.326	10.49	85.18	4.34	14.82	70.75	9.39	0.92	8.60	3.35
16	6.00	5.66	5.10	102.90	67.83	1270.50	1272.50	537.50	2.354	2.354	11.69	86.16	2.15	13.84	84.45	9.93	0.93	9.23	3.44
17	6.00	5.66	5.10	102.83	69.43	1273.00	1275.50	547.00	2.327	2.327	11.51	84.63	3.66	15.17	75.86	9.20	0.89	8.19	3.48
18	6.00	5.66	5.10	102.40	69.50	1281.50	1286.00	557.00	2.301	2.301	11.38	83.86	4.76	16.14	70.50	9.54	0.89	8.49	3.51
Avg.	6.00	5.66	5.10	102.71	68.92	1276.67	1276.67	547.17	2.331	2.331	11.52	84.95	3.52	15.05	76.94	9.56	0.90	8.64	3.48
19	6.50	6.10	5.55	102.93	68.53	1276.00	1276.00	543.00	2.345	2.345	12.51	85.09	2.30	14.91	84.55	9.29	0.93	8.64	3.79
20	6.50	6.10	5.55	101.43	69.00	1283.00	1286.00	548.50	2.335	2.335	12.55	84.71	2.74	15.29	82.09	9.17	0.89	8.16	14.36
21	6.50	6.10	5.55	102.17	68.50	1279.00	1281.50	546.00	2.342	2.342	12.59	84.99	2.42	15.01	83.88	8.62	0.93	8.02	3.43
Avg.	6.50	6.10	5.55	102.18	68.68	1278.50	1281.49	546.17	2.341	2.341	12.58	84.83	2.49	15.07	83.91	9.08	0.92	8.27	3.67
22	7.00	6.54	5.99	101.41	68.77	1277.40	1278.00	544.05	2.348	2.348	13.63	84.79	1.59	15.21	89.57	8.79	0.93	8.17	4.09
23	7.00	6.54	5.99	102.22	68.24	1283.14	1283.14	547.71	2.341	2.341	13.58	84.52	1.90	15.48	87.74	9.13	0.89	8.13	16.52
24	7.00	6.54	5.99	101.76	69.69	1282.56	1284.55	549.43	2.334	2.334	13.55	84.28	2.17	15.72	86.18	6.82	0.89	7.85	4.05
Avg.	7.00	6.54	5.99	101.80	69.50	1282.23	1282.23	547.06	2.341	2.341	13.58	84.53	1.89	15.47	87.85	8.91	0.90	8.05	4.39

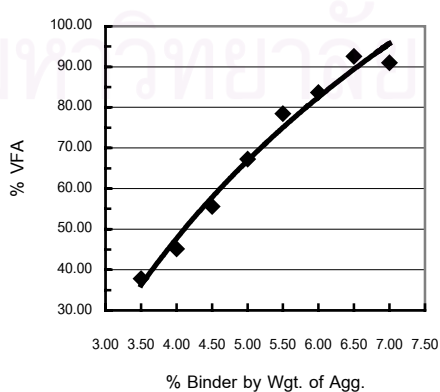
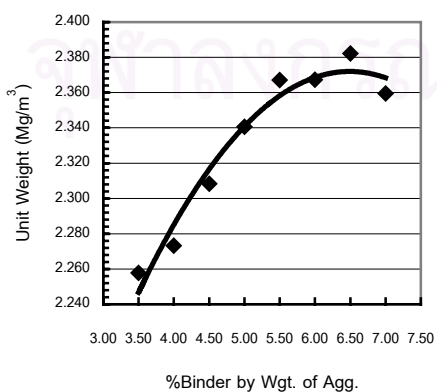
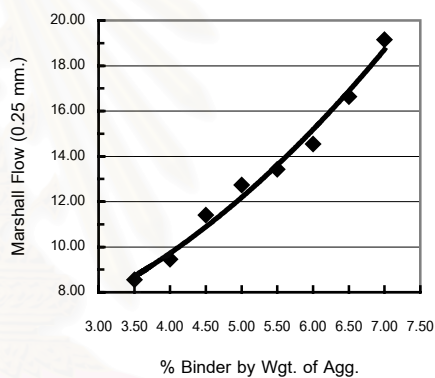
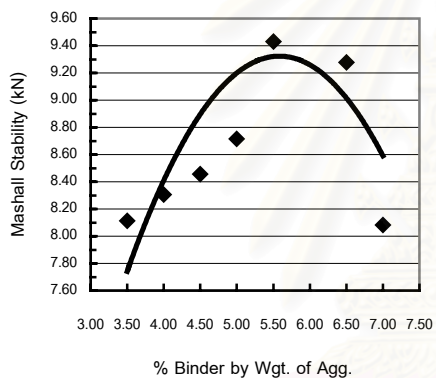
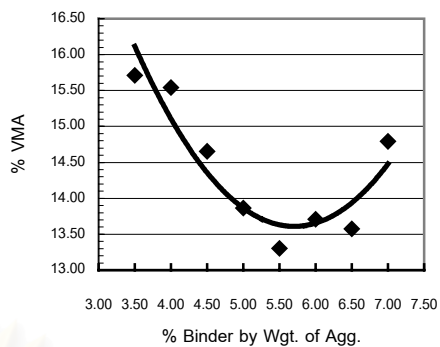
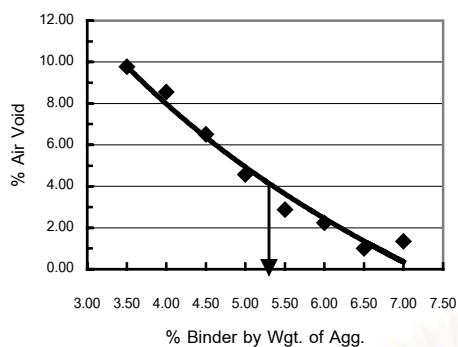


Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.035
Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AB}) : 2.5981
Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{AE}) : 2.6332
Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{UM}) : 2.437

Materials Type : NRA 1%
Design Traffic : Heavy (75 Blows Compact for each side)
Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)
% Asphalt absorption (k) : 0.69

No.	P.C.	S.W.C.	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	S.W.C. (mm)	Stability		Flow						
													Marshall Factor	Flow							
1	3.50	3.58	2.72	101.76	67.33	1233.94	666.21	560.22	2.240	2.242	5.82	83.68	10.42	16.31	26.11	9.22	0.89	8.21	3.15	8.78	
2	3.50	3.58	2.72	101.73	68.69	1228.72	697.17	541.55	2.269	2.269	5.96	84.70	9.34	15.30	38.95	8.57	0.93	7.97	1.88	7.52	
3	3.50	3.58	2.72	101.80	68.93	1256.76	701.00	546.55	2.263	2.263	5.94	84.43	9.58	15.52	38.25	9.17	0.89	8.16	2.34	8.36	
Avg																					
4	4.00	3.85	3.19	101.80	68.67	1241.10	700.96	549.86	2.258	2.258	6.95	83.00	9.15	18.10	43.19	9.00	0.89	8.01	2.25	8.00	
5	4.00	3.85	3.19	101.80	69.83	1245.17	702.96	550.60	2.261	2.261	6.96	84.02	9.02	15.98	43.56	9.13	0.89	8.13	2.48	8.52	
6	4.00	3.85	3.19	101.70	67.36	1248.37	719.59	540.77	2.300	2.300	7.08	85.45	7.47	14.55	48.68	8.44	0.92	8.78	2.48	9.84	
Avg																					
7	4.50	4.31	3.65	101.67	60.23	1239.92	706.72	540.02	2.294	2.294	8.09	84.62	7.09	15.18	53.27	9.14	0.93	8.50	2.79	11.16	
8	4.50	4.31	3.65	101.70	67.73	1250.43	717.63	540.61	2.313	2.313	8.15	85.52	6.32	14.48	56.33	9.25	0.96	8.88	2.81	11.24	
9	4.50	4.31	3.65	101.80	66.70	1253.41	719.84	541.60	2.318	2.318	8.17	85.70	6.13	14.30	57.16	8.32	0.86	7.99	2.90	11.80	
Avg																					
10	5.00	4.76	4.11	101.73	69.23	1246.22	718.81	537.04	2.321	2.321	9.21	85.39	5.40	14.61	53.25	9.80	0.89	8.72	3.16	12.64	
11	5.00	4.76	4.11	101.73	66.97	1252.51	722.24	537.02	2.332	2.332	9.26	86.83	4.92	14.17	55.31	9.03	0.93	8.40	3.32	13.28	
12	5.00	4.76	4.11	101.70	66.50	1253.99	732.31	531.41	2.369	2.369	9.40	87.16	4.44	12.82	73.25	9.40	0.96	9.02	3.07	12.28	
Avg																					
13	5.00	5.21	4.56	101.70	84.87	1203.48	728.42	539.33	2.368	2.368	10.44	86.73	2.83	13.27	78.54	9.48	0.96	9.08	3.34	13.36	
14	5.00	5.21	4.56	101.60	67.03	1249.68	726.78	526.51	2.373	2.373	10.48	88.93	2.61	13.07	80.02	9.83	0.96	9.42	3.61	14.44	
15	5.00	5.21	4.56	101.60	67.03	1249.68	726.78	526.51	2.373	2.373	10.48	88.93	2.61	13.07	80.02	9.83	0.96	9.42	3.61	14.44	
16	5.00	5.21	4.56	101.60	67.03	1249.68	726.78	526.51	2.373	2.373	10.48	88.93	2.61	13.07	80.02	9.83	0.96	9.42	3.61	14.44	
17	5.00	5.66	5.01	101.80	67.10	1262.65	730.14	533.28	2.360	2.360	10.40	86.43	3.17	13.57	76.68	10.20	0.96	9.79	3.12	12.48	
18	5.00	5.66	5.01	101.70	66.63	1268.95	739.31	529.93	2.367	2.367	10.40	86.43	3.17	13.57	76.68	10.20	0.96	9.79	3.12	12.48	
Avg																					
19	5.00	5.66	5.01	101.70	66.63	1268.95	739.31	529.93	2.367	2.367	10.40	86.43	3.17	13.57	76.68	10.20	0.96	9.79	3.12	12.48	
20	5.00	5.66	5.01	101.70	66.63	1268.95	739.31	529.93	2.367	2.367	10.40	86.43	3.17	13.57	76.68	10.20	0.96	9.79	3.12	12.48	
21	5.00	5.66	5.01	101.70	66.63	1268.95	739.31	529.93	2.367	2.367	10.40	86.43	3.17	13.57	76.68	10.20	0.96	9.79	3.12	12.48	
Avg																					
22	7.00	6.54	5.90	101.70	60.00	1279.03	733.92	547.82	2.344	2.344	13.36	84.63	1.99	15.35	87.06	8.66	0.83	8.05	4.79	15.18	
23	7.00	6.54	5.90	101.78	68.88	1269.32	731.18	531.09	2.371	2.371	13.52	85.63	0.98	14.37	84.03	8.53	0.96	8.19	4.52	14.52	
24	7.00	6.54	5.90	101.80	66.73	1268.78	735.57	530.86	2.363	2.363	13.47	85.34	1.19	14.65	81.96	8.34	0.96	8.01	4.69	14.76	
Avg																					

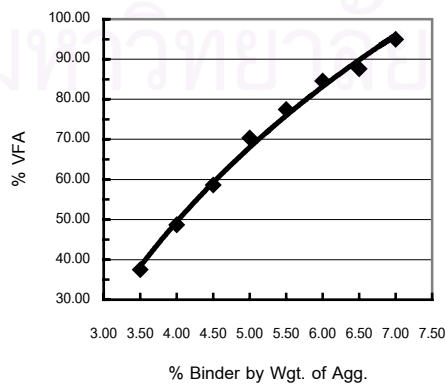
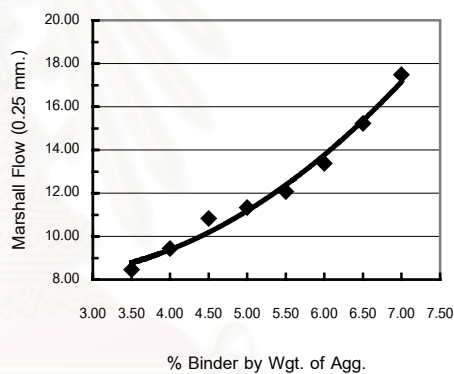
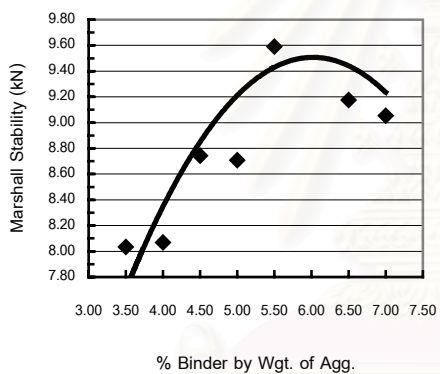
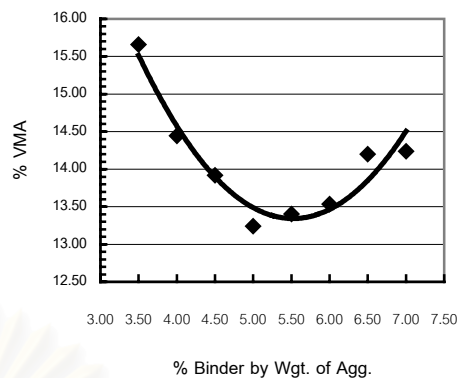
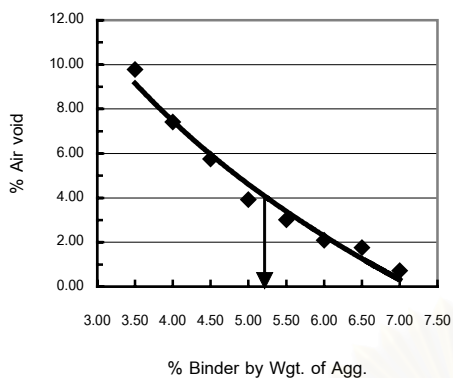


Test for Hot Mix Asphalt Concrete by Marshall Test Method

Materials Type : NRA 3%
Design Traffic : Heavy (75 Blows Compact for each side)
Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)
% Asphalt absorption (x) : 0.73

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.030
Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AG}) : 2.5881
Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.6362
Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.438

No.	% AC by wgt. of Agg.	% AC by wgt. of Mix	% Eff AC by wgt. of Mix	Diameter (mm)	Spec. Height (mm)	Mass (g)		Bulk Vol. CO	Bulk Density (g/m ³)	Unit Weight (kg/m ³)	% Vol. AC	% Vol. Agg.	% Air Void	% VMA	% VFA	Stability (N)		Flow (0.25mm)		
						Sat. Surface Dry in air	Sat. Surface Dry in water									Measured	Adjusted			
1	3.50	3.38	2.68	101.70	68.33	1241.59	1260.84	711.25	549.59	2.259	5.88	84.34	9.79	15.66	37.51	8.83	0.89	7.86	2.11	8.44
2	3.50	3.38	2.68	101.40	67.67	1244.26	1258.77	708.14	550.63	2.260	5.88	84.36	9.76	15.64	37.57	9.04	0.89	8.05	2.05	8.20
3	3.50	3.38	2.68	101.60	67.93	1238.73	1252.92	704.56	548.36	2.259	5.87	84.33	9.79	15.67	37.49	9.21	0.89	8.20	2.18	8.72
Avg	3.50	3.38	2.68	101.57	67.98	1245.53	1257.51	707.98	549.53	2.259	5.88	84.34	9.76	15.66	37.53	9.03	0.89	8.03	2.11	8.45
4	4.00	3.85	3.15	101.50	67.60	1257.00	1272.52	725.44	547.08	2.298	7.02	85.36	7.62	14.64	47.95	8.61	0.93	8.01	2.13	8.52
5	4.00	3.85	3.15	101.60	67.93	1249.99	1265.11	722.81	542.30	2.305	7.04	85.64	7.32	14.36	49.02	8.65	0.93	8.04	2.42	9.68
6	4.00	3.85	3.15	101.70	67.33	1251.57	1266.68	723.91	542.77	2.306	7.04	85.67	7.29	14.33	49.15	8.77	0.93	8.16	2.53	10.12
Avg	4.00	3.85	3.15	101.60	67.62	1252.85	1268.10	724.05	544.05	2.303	7.03	85.56	7.41	14.44	48.71	8.68	0.93	8.07	2.35	9.44
7	4.50	4.31	3.61	101.90	66.77	1251.59	1259.99	722.28	537.71	2.328	8.16	86.06	5.78	13.94	58.53	8.73	0.96	8.38	2.75	11.00
8	4.50	4.31	3.61	101.60	66.87	1253.39	1262.18	725.51	536.65	2.336	8.19	86.36	5.46	13.64	60.00	9.24	0.96	8.87	2.65	10.60
9	4.50	4.31	3.61	101.30	66.67	1257.11	1266.38	724.79	541.59	2.321	8.13	85.82	6.04	14.18	57.38	9.35	0.96	8.98	2.72	10.88
Avg	4.50	4.31	3.61	101.57	66.77	1254.03	1262.84	724.19	539.65	2.328	8.16	86.08	5.76	13.92	58.64	9.11	0.96	8.74	2.71	10.93
10	5.00	4.76	4.07	101.70	67.33	1257.24	1263.25	730.08	533.17	2.358	9.31	86.77	3.91	13.23	70.42	9.41	0.96	9.03	2.82	11.28
11	5.00	4.76	4.07	101.40	67.07	1260.13	1266.98	732.72	534.26	2.359	9.32	86.79	3.89	13.21	70.56	8.82	0.96	8.47	2.94	11.76
12	5.00	4.76	4.07	101.50	67.33	1262.17	1269.96	734.29	535.67	2.356	9.31	86.71	3.99	13.29	70.02	9.27	0.93	8.62	2.74	10.96
Avg	5.00	4.76	4.07	101.53	67.24	1259.85	1266.73	732.38	534.37	2.358	9.31	86.76	3.93	13.24	70.33	9.17	0.95	8.71	2.83	11.33
13	5.50	5.21	4.52	101.70	66.40	1267.92	1272.01	737.10	534.91	2.370	10.41	86.81	2.78	13.19	78.93	10.00	0.96	9.60	2.98	11.92
14	5.50	5.21	4.52	101.70	67.03	1263.37	1269.01	735.54	533.47	2.368	10.40	86.73	2.87	13.27	78.40	10.10	0.96	9.70	3.12	12.48
15	5.50	5.21	4.52	101.60	67.67	1266.00	1273.48	735.84	537.64	2.365	10.34	86.24	3.42	13.76	75.15	9.87	0.96	9.48	2.95	11.80
Avg	5.50	5.21	4.52	101.67	67.03	1265.76	1271.50	736.16	536.94	2.364	10.38	86.60	3.02	13.40	77.49	9.99	0.96	9.59	3.02	12.07
16	6.00	5.66	4.97	101.60	66.17	1261.14	1265.67	734.51	531.16	2.374	11.46	86.55	1.99	13.45	85.22	10.55	0.96	10.13	3.50	14.00
17	6.00	5.66	4.97	101.70	66.93	1270.03	1274.58	738.42	536.16	2.369	11.44	86.34	2.22	13.66	83.76	11.03	0.96	10.59	3.05	12.20
18	6.00	5.66	4.97	101.60	66.83	1271.59	1275.66	739.77	535.89	2.373	11.46	86.49	2.05	13.51	84.83	10.78	0.96	10.35	3.48	13.92
Avg	6.00	5.66	4.97	101.63	66.88	1267.59	1271.97	737.67	535.40	2.372	11.45	86.48	2.08	13.58	84.61	10.79	0.96	10.36	3.34	13.37
19	6.50	6.10	5.42	101.70	67.08	1276.14	1280.32	740.71	539.61	2.365	12.44	85.80	1.76	14.20	87.63	9.61	0.96	9.23	3.85	15.40
20	6.50	6.10	5.42	101.70	67.63	1281.26	1284.88	742.65	542.23	2.363	12.43	85.73	1.84	14.27	87.12	9.42	0.96	9.04	3.61	14.44
21	6.50	6.10	5.42	101.70	67.97	1277.41	1280.95	741.25	539.70	2.367	12.45	85.87	1.67	14.13	88.15	9.64	0.96	9.25	3.96	15.84
Avg	6.50	6.10	5.42	101.70	67.56	1278.27	1282.05	741.54	540.51	2.365	12.44	85.80	1.76	14.20	87.63	9.56	0.96	9.17	3.81	15.23
22	7.00	6.54	5.86	101.70	65.93	1275.42	1279.00	741.52	537.48	2.373	13.50	85.69	0.81	14.31	94.36	9.52	0.96	9.14	4.40	17.60
23	7.00	6.54	5.86	101.80	66.77	1272.17	1275.73	741.71	534.02	2.362	13.56	86.03	0.42	13.97	97.01	9.64	0.96	9.25	4.19	16.76
24	7.00	6.54	5.86	101.50	66.13	1276.23	1280.22	741.64	538.58	2.370	13.48	85.57	0.95	14.43	93.44	9.13	0.96	8.76	4.52	18.08
Avg	7.00	6.54	5.86	101.67	66.08	1274.61	1278.32	741.62	538.69	2.375	13.52	85.76	0.72	14.24	94.94	9.43	0.96	9.05	4.37	17.48

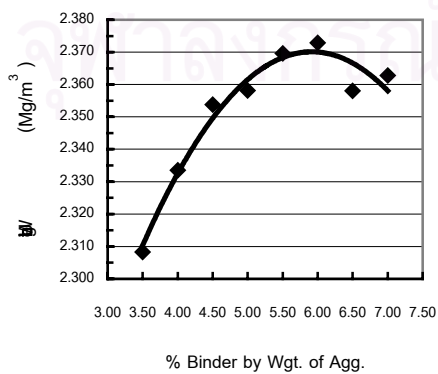
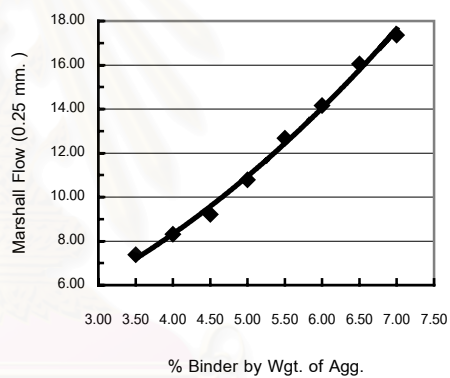
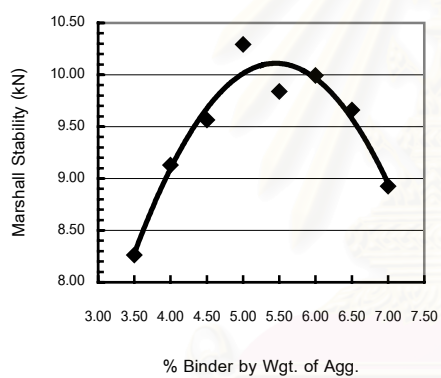
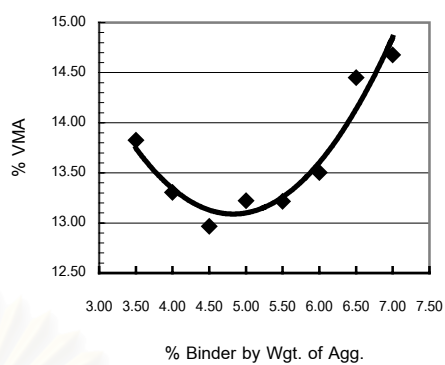
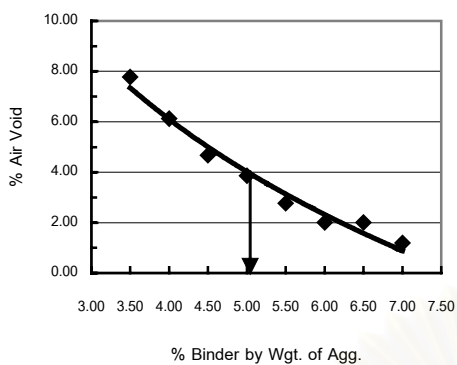


Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Materials Type : NRA 5%
Design Traffic : Heavy (75 Blows Compact for each side)
Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)
% Asphalt absorption (x) : 0.70

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.032
Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AG}) : 2.588
Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.634
Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.437

No.	% AC by wgt. of Agg.	% AC by wgt. of Mix	% Eff. AC by wgt. of Mix	Diameter (mm.)	Spec. Height (mm.)	Mass (g)		Bulk Vol. (cc)	Bulk Density (g/ml)	Unit Weight (Mg/m ³)	% Vol. AC	% Vol. Agg.	% Air Void	Stability (N)		Flow (0.25 mm.)
						In air	Sat. Surface Dry in air							Measured	Adjusted	
1	3.50	3.38	2.71	101.70	68.33	1229.25	1245.58	711.81	2.303	2.303	6.04	85.97	7.99	8.42	8.08	1.81
2	3.50	3.38	2.71	101.40	67.83	1234.62	1249.57	716.22	2.315	2.315	6.07	86.42	7.51	8.63	8.28	1.88
3	3.50	3.38	2.71	101.60	67.67	1227.74	1243.13	710.97	2.307	2.307	6.05	86.13	7.82	8.77	8.42	1.85
Avg	3.50	3.38	2.71	101.57	67.94	1230.54	1246.09	713.00	2.308	2.308	6.05	86.17	7.77	8.80	8.26	1.85
4	4.00	3.85	3.18	101.50	66.00	1230.27	1241.14	714.24	2.335	2.335	7.18	86.75	6.07	9.13	8.76	2.16
5	4.00	3.85	3.18	101.60	66.07	1239.84	1248.55	717.52	2.335	2.335	7.18	86.74	6.07	9.52	9.14	2.07
6	4.00	3.85	3.18	101.70	67.33	1238.45	1249.31	717.96	2.331	2.331	7.17	86.69	6.24	9.38	9.48	2.00
Avg	4.00	3.85	3.18	101.60	66.47	1236.19	1246.33	718.57	2.333	2.333	7.18	86.69	6.13	9.31	9.13	2.06
7	4.50	4.31	3.64	101.80	66.40	1246.88	1256.02	726.12	2.353	2.353	8.29	87.00	4.70	10.06	9.46	2.29
8	4.50	4.31	3.64	101.60	66.73	1259.08	1268.26	731.82	2.347	2.347	8.27	86.78	4.94	10.24	9.59	2.18
9	4.50	4.31	3.64	101.30	66.67	1254.47	1262.78	731.55	2.361	2.361	8.32	87.31	4.36	10.05	9.65	2.44
Avg	4.50	4.31	3.64	101.57	66.60	1253.46	1262.85	729.87	2.352	2.352	8.30	87.03	4.67	10.27	9.56	2.30
10	5.00	4.76	4.10	101.70	65.57	1246.89	1252.77	724.28	2.359	2.359	9.37	86.82	3.81	11.06	10.62	2.60
11	5.00	4.76	4.10	101.40	65.70	1257.50	1262.00	728.59	2.357	2.357	9.36	86.75	3.89	10.24	9.83	2.71
12	5.00	4.76	4.10	101.50	67.33	1260.06	1266.69	732.23	2.358	2.358	9.36	86.76	3.88	10.87	10.44	2.78
Avg	5.00	4.76	4.10	101.53	66.20	1254.82	1260.49	729.37	2.358	2.358	9.36	86.78	3.86	10.72	10.28	2.70
13	5.50	5.21	4.55	101.70	66.70	1253.58	1258.94	726.74	2.364	2.364	10.43	86.59	2.98	10.13	9.72	3.41
14	5.50	5.21	4.55	101.70	66.63	1255.96	1259.05	729.90	2.374	2.374	10.47	86.93	2.60	10.44	10.02	3.01
15	5.50	5.21	4.55	101.60	67.67	1263.95	1269.11	736.00	2.371	2.371	10.46	86.83	2.71	10.18	9.77	3.09
Avg	5.50	5.21	4.55	101.67	67.00	1257.88	1262.37	731.56	2.370	2.370	10.45	86.78	2.77	10.25	9.84	3.17
16	6.00	5.66	5.00	101.60	66.20	1256.31	1260.03	730.73	2.374	2.374	11.50	86.52	1.98	10.25	9.84	3.41
17	6.00	5.66	5.00	101.70	67.07	1267.87	1270.67	736.58	2.373	2.373	11.50	86.51	1.99	10.40	9.98	3.59
18	6.00	5.66	5.00	101.60	67.35	1266.00	1269.00	735.24	2.372	2.372	11.49	86.46	2.05	10.16	9.84	3.62
Avg	6.00	5.66	5.00	101.63	66.87	1263.28	1266.57	734.18	2.373	2.373	11.50	86.50	2.00	10.41	9.89	3.54
19	6.50	6.10	5.45	101.70	67.35	1262.60	1265.37	731.49	2.365	2.365	12.48	85.80	1.72	10.20	9.14	4.03
20	6.50	6.10	5.45	101.70	66.23	1259.95	1262.67	734.94	2.362	2.362	12.47	85.68	1.85	10.44	10.02	3.89
21	6.50	6.10	5.45	101.70	67.97	1277.59	1282.64	738.37	2.347	2.347	12.39	85.16	2.45	10.23	9.82	4.12
Avg	6.50	6.10	5.45	101.70	67.18	1270.06	1273.56	734.33	2.355	2.355	12.45	85.55	2.00	10.06	9.66	4.01
22	7.00	6.54	5.89	101.70	66.40	1271.40	1274.44	737.23	2.367	2.367	13.50	85.46	1.03	10.44	9.85	4.21
23	7.00	6.54	5.89	101.80	65.90	1285.97	1285.97	742.62	2.357	2.357	13.45	85.11	1.44	10.48	9.85	4.27
24	7.00	6.54	5.89	101.50	66.13	1284.00	1287.00	744.00	2.365	2.365	13.49	85.39	1.12	10.41	9.81	4.54
Avg	7.00	6.54	5.89	101.67	66.14	1278.70	1282.47	741.28	2.363	2.363	13.48	85.32	1.20	10.48	9.93	4.34

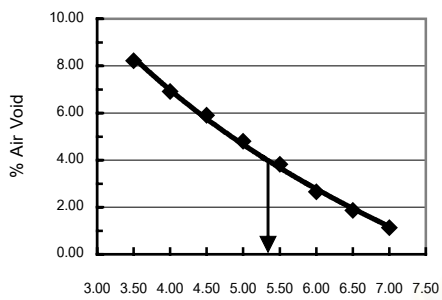


Chulalongkorn University
Department of Civil Engineering
Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

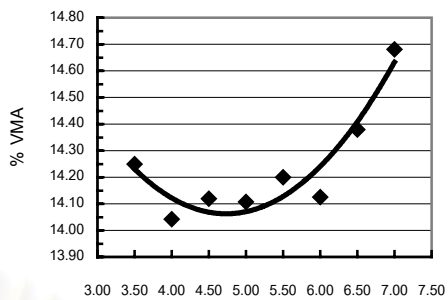
Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.023
 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AG}) : 2.588
 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.636
 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.436

Materials Type : NRA 7%
 Design Traffic : Heavy (75 Blows Compact for each side)
 Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)
 % Asphalt absorption (x) : 0.72

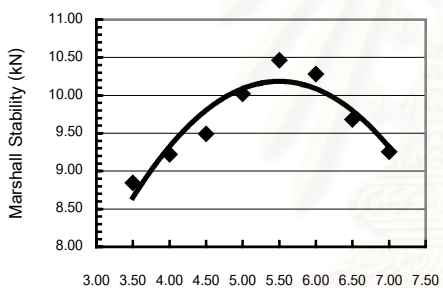
No.	% Agg. by wgt. of Mix	% AC by wgt. of Mix	% Effr AC by wgt. of Mix	Diameter (mm.)	Spec. Height (mm.)	Mass (g)		Bulk Vol. CC	Bulk Density (g/ml)	Unit Weight (mg/ml)	% Vol. AC	% Vol. Agg.	% VFA	Stability (N)		Flow (0.25mm)			
						In air	Sat Surface Dry in air							Measured	Adjusted				
1	3.50	3.38	2.69	101.70	67.33	1239.15	705.52	533.63	2.296	2.296	6.03	85.72	8.25	14.28	42.22	9.23	0.96	8.86	1.83
2	3.50	3.38	2.69	101.40	67.83	1228.66	707.34	535.40	2.295	2.295	6.03	85.67	8.30	14.33	42.05	9.02	0.93	8.39	1.98
3	3.50	3.38	2.69	101.60	67.67	1230.31	705.06	534.94	2.300	2.300	6.04	85.86	8.10	14.14	42.71	9.67	0.96	9.28	1.94
Avg	3.50	3.38	2.69	101.57	67.61	1230.69	705.97	534.66	2.297	2.297	6.03	85.75	8.22	14.25	42.33	9.31	0.95	8.97	1.92
4	4.00	3.85	3.15	101.50	66.45	1235.53	714.54	534.67	2.318	2.318	7.15	86.13	6.72	13.67	51.53	9.96	0.96	9.56	1.95
5	4.00	3.85	3.15	101.80	66.23	1221.30	704.21	528.52	2.311	2.311	7.12	85.85	7.02	14.15	50.35	9.54	0.96	9.16	2.01
6	4.00	3.85	3.15	101.70	66.33	1243.31	717.65	537.79	2.312	2.312	7.13	85.89	6.98	14.11	50.52	9.32	0.96	8.95	2.23
Avg	4.00	3.85	3.15	101.60	66.34	1234.71	712.80	533.68	2.314	2.314	7.13	85.96	6.91	14.04	50.80	9.61	0.96	9.22	2.06
7	4.50	4.31	3.62	101.80	69.19	1267.59	728.15	540.69	2.325	2.325	8.22	85.97	5.81	14.03	58.58	10.13	0.93	9.42	2.34
8	4.50	4.31	3.62	101.60	68.03	1257.49	721.47	538.55	2.325	2.325	8.22	85.98	5.80	14.02	58.62	10.02	0.93	9.32	2.55
9	4.50	4.31	3.62	101.30	67.53	1244.74	719.30	537.03	2.318	2.318	8.20	85.70	6.10	14.30	57.31	10.47	0.93	9.74	2.68
Avg	4.50	4.31	3.62	101.57	68.26	1251.89	720.97	539.88	2.323	2.323	8.21	85.88	5.91	14.12	58.17	10.21	0.93	9.49	2.52
10	5.00	4.76	4.08	101.70	67.53	1268.79	729.42	539.58	2.333	2.333	9.29	85.85	4.86	14.15	65.68	10.96	0.93	10.19	2.75
11	5.00	4.76	4.08	101.40	67.83	1259.21	727.29	539.18	2.335	2.335	9.30	85.94	4.76	14.06	66.18	10.54	0.93	9.80	2.88
12	5.00	4.76	4.08	101.50	67.33	1263.58	730.11	540.93	2.334	2.334	9.30	85.89	4.81	14.11	65.91	10.82	0.93	10.06	2.69
Avg	5.00	4.76	4.08	101.53	67.56	1260.49	728.94	539.92	2.334	2.334	9.30	85.89	4.81	14.11	65.92	10.77	0.93	10.02	2.77
13	5.50	5.21	4.53	101.70	68.10	1265.32	731.32	540.83	2.340	2.340	10.36	85.69	3.95	14.31	72.38	11.43	0.93	10.63	2.99
14	5.50	5.21	4.53	101.70	67.80	1268.25	734.86	539.96	2.349	2.349	10.40	86.02	3.58	13.98	74.41	11.10	0.96	10.66	3.07
15	5.50	5.21	4.53	101.60	67.67	1264.86	732.08	540.60	2.340	2.340	10.36	85.89	3.95	14.31	72.41	10.86	0.93	10.10	3.34
Avg	5.50	5.21	4.53	101.67	67.66	1266.14	732.75	540.46	2.343	2.343	10.37	85.80	3.83	14.20	73.07	11.13	0.94	10.46	3.13
16	6.00	5.66	4.98	101.60	65.77	1265.55	729.72	539.23	2.352	2.352	11.45	85.74	2.80	14.26	80.33	10.73	0.96	10.30	3.14
17	6.00	5.66	4.98	101.70	65.17	1267.78	734.44	537.31	2.359	2.359	11.49	86.01	2.51	13.99	82.09	11.11	0.93	10.33	3.45
18	6.00	5.66	4.98	101.60	65.35	1269.50	737.41	538.88	2.356	2.356	11.47	85.87	2.66	14.13	81.19	10.98	0.93	10.21	3.26
Avg	6.00	5.66	4.98	101.63	65.46	1268.21	733.86	537.47	2.356	2.356	11.47	85.87	2.66	14.13	81.20	10.94	0.94	10.28	3.29
19	6.50	6.10	5.43	101.70	67.67	1279.89	740.35	542.53	2.359	2.359	12.51	85.59	1.90	14.41	86.84	10.58	0.93	9.84	3.87
20	6.50	6.10	5.43	101.70	66.93	1266.59	734.74	535.54	2.365	2.365	12.55	85.81	1.65	14.19	88.38	10.21	0.93	9.50	4.12
21	6.50	6.10	5.43	101.70	67.97	1275.32	738.63	541.37	2.356	2.356	12.50	85.47	2.04	14.53	85.98	10.44	0.93	9.71	4.00
Avg	6.50	6.10	5.43	101.70	67.52	1273.93	737.907	539.91	2.360	2.360	12.52	85.62	1.86	14.38	87.07	10.41	0.93	9.68	4.00
22	7.00	6.54	5.87	101.70	66.67	1273.77	740.70	541.15	2.363	2.363	13.56	85.33	1.11	14.67	92.41	9.69	0.96	9.30	4.56
23	7.00	6.54	5.87	101.80	66.33	1277.35	740.28	540.72	2.362	2.362	13.55	85.31	1.14	14.69	92.21	9.71	0.93	9.03	5.15
24	7.00	6.54	5.87	101.50	66.13	1279.13	741.22	541.37	2.363	2.363	13.55	85.32	1.13	14.68	92.33	9.82	0.96	9.43	4.63
Avg	7.00	6.54	5.87	101.67	66.33	1276.92	740.73	541.08	2.363	2.363	13.55	85.32	1.13	14.66	92.32	9.74	0.95	9.25	4.75



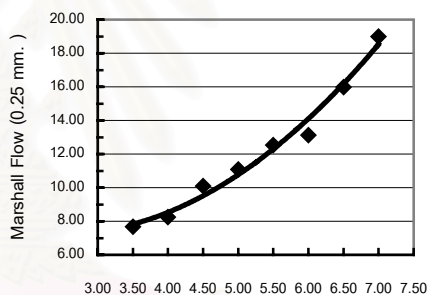
% Binder by Wgt. of Agg.



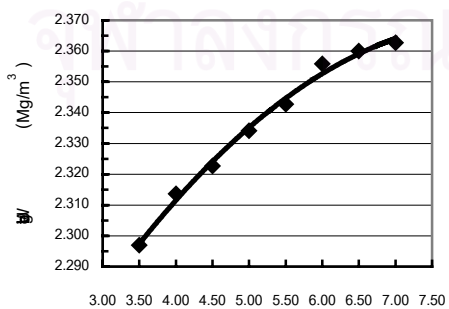
% Binder by Wgt. of Agg.



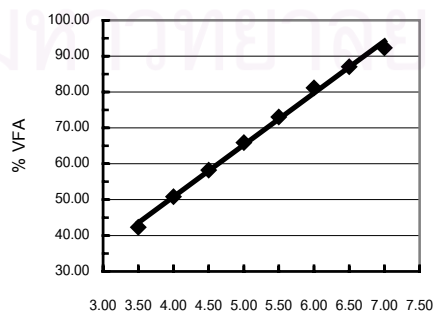
% Binder by Wgt. of Agg.



% Binder by Wgt. of Agg.



% Binder by Wgt. of Agg.



% Binder by Wgt. of Agg.

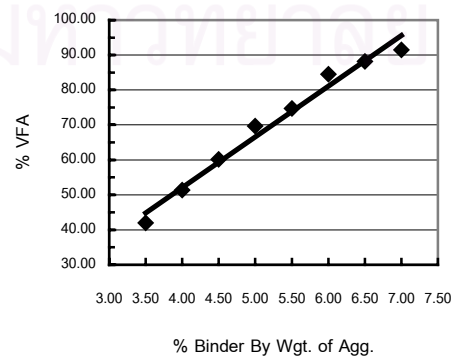
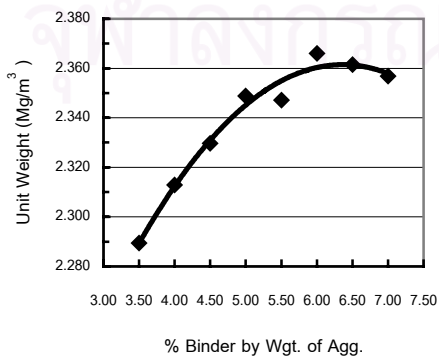
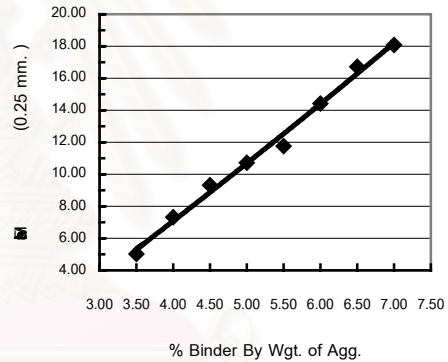
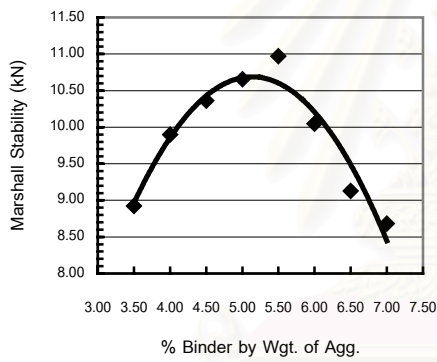
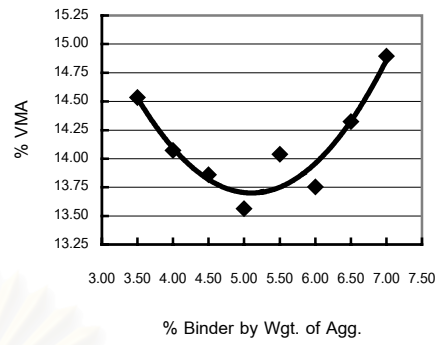
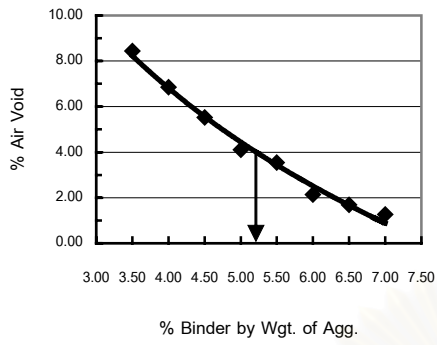
สถาบันวิทยบริการ

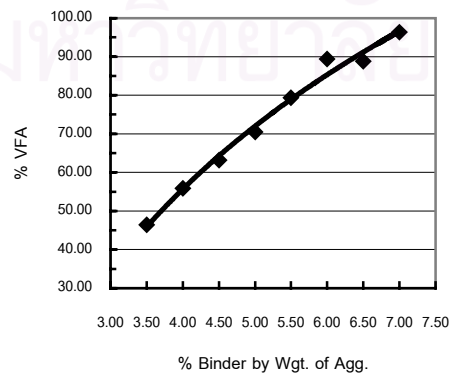
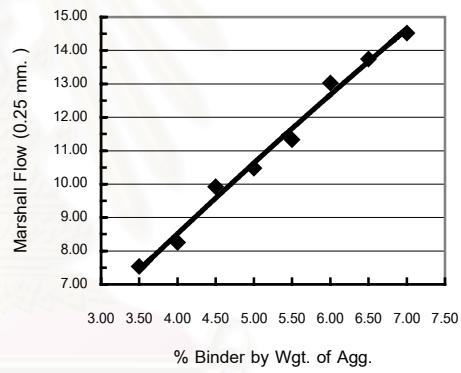
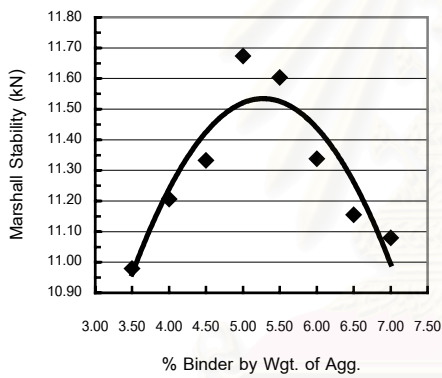
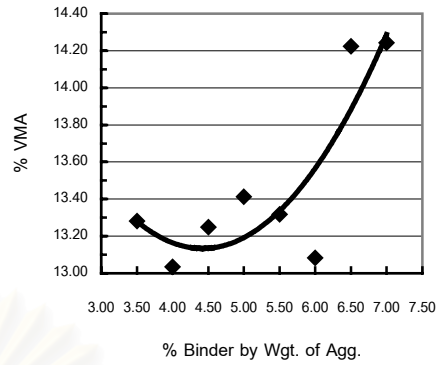
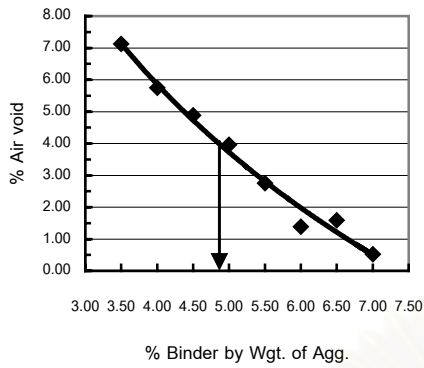
สงขลานครินทร์ วิทยาเขต

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.020
Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{Ag}) : 2.5881
Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{se}) : 2.6341
Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{mm}) : 2.433

Materials Type : NRA 9%
Design Traffic : Heavy (75 Blows Compact for each side)
Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)
% Asphalt absorption (x) : 0.69

No.	% AC by wgt. of Agg.	% AC by wgt. of Mix	% Eff AC by wgt. of Mix	Diameter (mm)	Spec. Height (mm)	Mass (g)		Bulk Vol. CC	Bulk Density (g/cc)	Unit Weight (Mg/m ³)	% Vol. AC	% Vol. Air	% VMA	Stability (N)		Flow (mm)				
						Sat. Surface Dry in air	in water							Measured	Adjusted					
1	3.50	3.38	2.72	101.80	67.87	1234.56	707.46	539.13	2.290	2.290	6.10	85.49	8.41	14.51	42.02	9.78	9.39	1.28	5.12	
2	3.50	3.38	2.72	101.60	68.33	1239.42	711.63	539.41	2.298	2.298	6.12	85.78	8.10	14.22	43.03	9.14	9.33	8.50	1.24	4.96
3	3.50	3.38	2.72	101.40	67.63	1246.88	705.83	541.05	2.281	2.281	6.07	85.14	8.79	14.86	40.86	9.55	9.93	8.88	1.25	5.00
Avg	3.50	3.38	2.72	101.60	67.94	1243.95	706.31	539.86	2.289	2.289	6.10	85.47	8.53	14.53	41.97	9.48	9.94	8.92	1.25	5.03
4	4.00	3.85	3.18	101.70	66.73	1245.44	714.23	539.12	2.310	2.310	7.21	85.79	6.96	14.17	50.83	10.64	9.96	10.21	1.95	7.80
5	4.00	3.85	3.18	101.60	66.03	1242.50	710.73	538.05	2.309	2.309	7.21	85.79	7.00	14.21	50.75	10.01	9.96	9.61	1.84	7.36
6	4.00	3.85	3.18	101.70	66.33	1247.31	715.32	537.85	2.319	2.319	7.24	86.16	6.60	13.84	52.30	10.29	9.96	9.88	1.70	6.80
Avg	4.00	3.85	3.18	101.67	66.36	1245.08	713.98	538.34	2.313	2.313	7.22	85.93	6.85	14.07	51.31	10.31	9.96	9.90	1.83	7.32
7	4.50	4.31	3.65	101.80	66.67	1250.47	720.58	536.38	2.331	2.331	8.34	86.20	5.46	13.80	60.40	10.95	9.96	10.51	2.35	9.40
8	4.50	4.31	3.65	101.60	67.80	1259.38	722.80	536.58	2.330	2.330	8.33	86.14	5.53	13.86	60.09	11.14	9.96	10.69	2.21	8.84
9	4.50	4.31	3.65	101.30	67.53	1261.89	723.55	537.71	2.328	2.328	8.32	86.08	5.59	13.92	59.82	10.29	9.96	9.88	2.43	9.72
Avg	4.50	4.31	3.65	101.57	67.33	1259.90	722.31	538.89	2.330	2.330	8.33	86.14	5.53	13.86	60.11	10.78	9.96	10.86	2.33	9.32
10	5.00	4.76	4.11	101.70	65.27	1259.78	727.41	537.00	2.346	2.346	9.44	86.33	4.23	13.67	69.07	10.85	1.00	10.85	2.51	10.04
11	5.00	4.76	4.11	101.40	66.67	1263.68	727.55	536.13	2.348	2.348	9.45	86.39	4.17	13.61	69.41	10.76	0.96	10.33	2.87	11.48
12	5.00	4.76	4.11	101.50	66.33	1267.75	728.79	534.49	2.353	2.353	9.47	86.59	3.93	13.41	70.66	11.23	0.96	10.78	2.66	10.64
Avg	5.00	4.76	4.11	101.53	66.39	1266.70	727.92	535.87	2.349	2.349	9.46	86.44	4.11	13.56	69.71	10.95	0.97	10.65	2.68	10.72
13	5.50	5.21	4.56	101.70	67.30	1262.52	728.61	537.87	2.347	2.347	10.49	85.97	3.54	14.03	74.78	11.73	0.96	11.26	3.02	12.08
14	5.50	5.21	4.56	101.70	67.25	1266.57	729.54	539.36	2.346	2.346	10.49	85.94	3.57	14.06	74.59	11.07	0.96	10.63	2.92	11.68
15	5.50	5.21	4.56	101.60	67.67	1266.96	731.34	539.66	2.348	2.348	10.50	85.98	3.52	14.02	74.88	11.48	0.96	11.02	2.88	11.52
Avg	5.50	5.21	4.56	101.67	67.41	1266.02	729.83	538.96	2.347	2.347	10.49	85.96	3.54	14.04	74.75	11.43	0.96	10.97	2.94	11.76
16	6.00	5.66	5.01	101.60	65.93	1264.75	732.15	534.85	2.365	2.365	11.62	86.20	2.19	13.80	84.15	10.12	0.96	9.72	3.47	13.88
17	6.00	5.66	5.01	101.70	65.67	1262.40	731.63	533.37	2.367	2.367	11.63	86.27	2.10	13.73	84.71	10.55	0.96	10.13	3.63	14.52
18	6.00	5.66	5.01	101.60	65.35	1265.01	734.51	534.52	2.367	2.367	11.63	86.27	2.11	13.73	84.65	10.73	0.96	10.30	3.72	14.88
Avg	6.00	5.66	5.01	101.63	65.55	1264.05	732.76	534.25	2.366	2.366	11.62	86.25	2.13	13.75	84.50	10.47	0.96	10.05	3.61	14.43
19	6.50	6.10	5.46	101.70	66.08	1269.37	732.82	536.55	2.361	2.361	12.63	85.67	1.70	14.33	88.12	9.74	0.96	9.35	4.02	16.08
20	6.50	6.10	5.46	101.70	65.83	1264.83	731.70	535.43	2.362	2.362	12.64	85.70	1.66	14.30	88.39	9.46	0.96	9.08	4.08	16.32
21	6.50	6.10	5.46	101.70	66.87	1272.15	737.11	538.81	2.361	2.361	12.63	85.66	1.71	14.34	88.07	9.33	0.96	8.96	4.44	17.76
Avg	6.50	6.10	5.46	101.70	66.26	1270.81	735.87	538.93	2.362	2.362	12.63	85.68	1.68	14.32	88.19	9.61	0.96	9.13	4.18	16.92
22	7.00	6.54	5.90	101.70	66.10	1269.79	733.65	538.01	2.360	2.360	13.65	85.23	1.13	14.77	92.38	10.02	0.96	9.62	4.54	18.16
23	7.00	6.54	5.90	101.80	67.00	1275.32	737.24	541.01	2.357	2.357	13.63	85.12	1.25	14.88	91.63	8.64	0.93	8.04	4.77	19.08
24	7.00	6.54	5.90	101.50	66.13	1280.80	739.18	544.34	2.353	2.353	13.61	84.97	1.43	15.03	90.50	9.02	0.93	8.39	4.25	17.00
Avg	7.00	6.54	5.90	101.67	66.41	1276.50	738.68	543.12	2.357	2.357	13.63	85.11	1.27	14.89	91.50	9.23	0.94	8.68	4.52	18.09



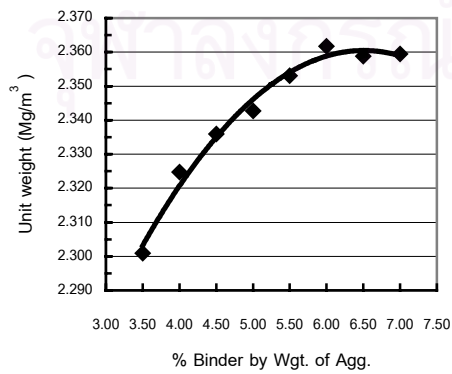
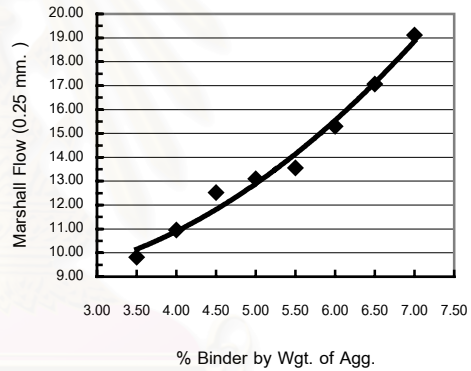
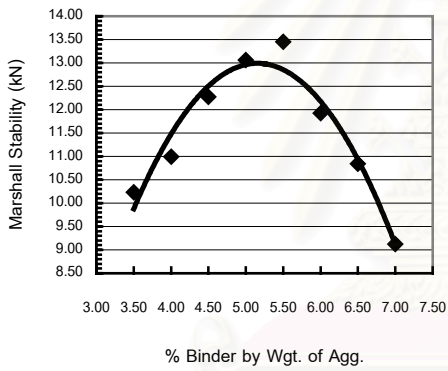
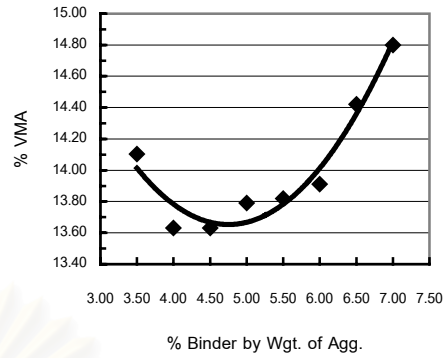
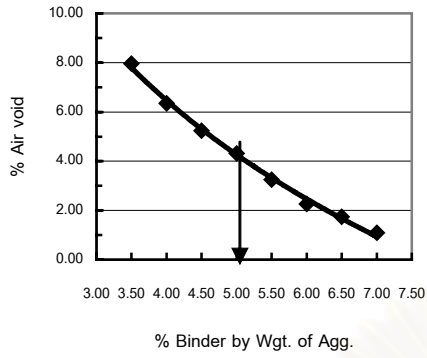


Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.015
Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AB}) : 2.588
Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{AE}) : 2.634
Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{UM}) : 2.432

Materials Type : NRA 13%
Design Traffic : Heavy (75 Blows Compact for each side)
Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)
% Asphalt absorption (a) : 0.69

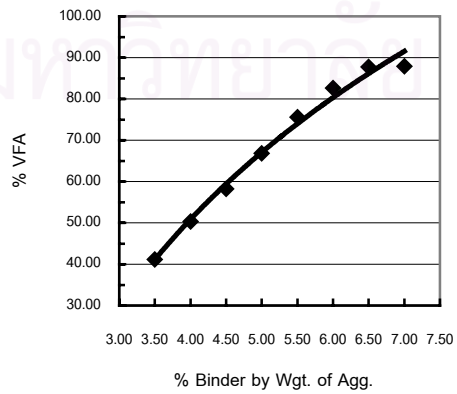
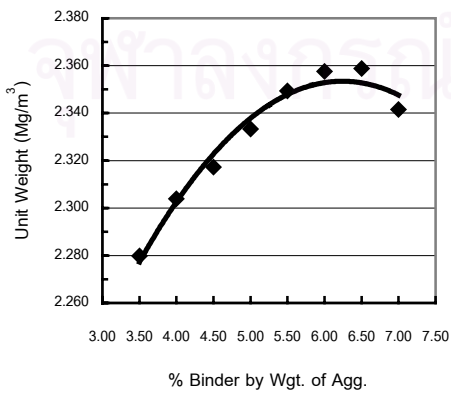
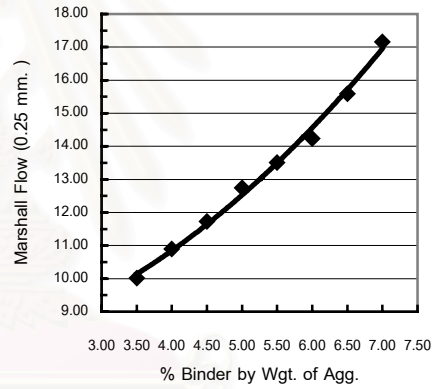
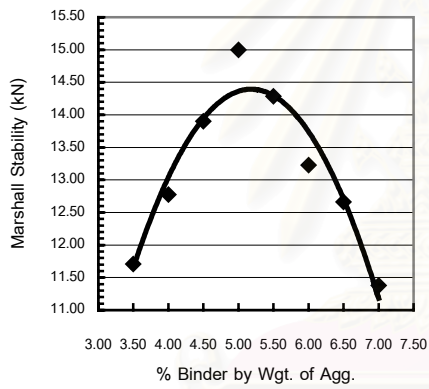
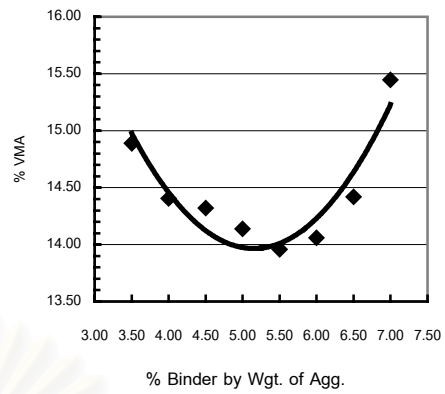
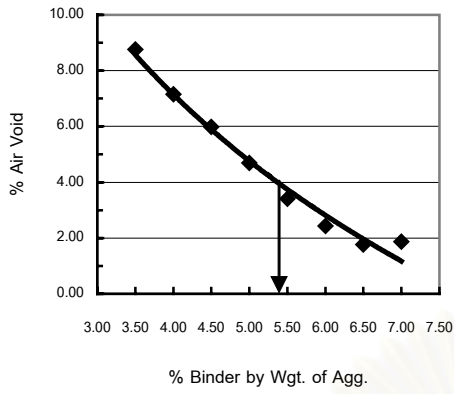
No.	SAC Dry wt. of Mix	SAC Dry wt. of Mix	S.E.R.AC Dry wt. of Mix	Diameter (mm)	Spec. Relim. (mm)	Mass (g)	Bulk Vol. cc	Bulk Density (g/cc)	UFA Weight (mm)	% Vol. AC	% Vol. VMA	% Air Void	Stability (M)		Flow (downing)					
													Measured	Calculated		Material				
1	3.50	3.38	2.71	101.50	67.03	1234.61	714.47	534.98	2.308	2.308	6.17	86.16	7.67	13.64	44.57	10.34	0.96	9.93	2.45	9.60
2	3.50	3.38	2.71	101.70	68.33	1243.53	706.12	535.41	2.292	2.292	6.13	85.56	8.31	14.44	42.45	10.95	0.94	10.51	2.81	10.44
3	3.50	3.38	2.71	101.40	67.63	1244.04	708.78	534.26	2.303	2.303	6.18	85.97	7.88	14.03	43.57	10.63	0.96	10.25	2.30	9.20
Avg	3.50	3.38	2.71	101.53	67.66	1240.73	711.07	534.38	2.301	2.301	6.15	86.30	7.95	14.35	43.87	10.62	0.95	10.24	2.77	9.71
4	4.00	3.85	3.18	101.70	67.23	1241.90	716.27	534.53	2.323	2.323	7.28	86.32	6.40	13.68	53.22	11.39	0.96	10.93	2.53	10.12
5	4.00	3.85	3.18	101.60	68.50	1245.66	717.77	535.94	2.324	2.324	7.28	86.35	8.37	13.65	53.35	11.67	0.96	11.11	2.75	11.00
6	4.00	3.85	3.18	101.40	67.33	1249.31	720.32	536.86	2.327	2.327	7.29	86.44	6.27	13.56	53.78	11.77	0.93	10.95	2.94	11.76
Avg	4.00	3.85	3.18	101.57	67.69	1245.60	718.12	535.81	2.325	2.325	7.28	86.37	7.68	13.61	53.44	11.51	0.95	11.03	2.74	10.98
7	4.50	4.31	3.65	101.80	65.77	1255.91	725.80	536.65	2.340	2.340	8.40	85.53	5.07	13.47	62.35	12.65	0.95	12.14	3.03	12.12
8	4.50	4.31	3.65	101.70	67.43	1256.94	726.62	537.33	2.339	2.339	8.40	85.49	5.11	13.51	62.18	12.78	0.96	12.27	3.24	12.96
9	4.50	4.31	3.65	101.30	67.53	1251.88	727.95	537.71	2.328	2.328	8.36	86.06	5.56	13.92	60.07	12.92	0.98	12.40	3.12	12.48
Avg	4.50	4.31	3.65	101.47	67.58	1254.57	728.29	537.82	2.338	2.338	8.39	86.02	5.62	13.83	61.54	12.77	0.97	12.27	3.13	12.85
10	5.00	4.76	4.10	101.70	65.15	1262.80	725.67	534.21	2.345	2.345	9.48	86.30	4.22	13.70	69.21	13.04	0.96	12.52	3.32	13.28
11	5.00	4.76	4.10	101.40	66.00	1258.49	727.19	535.36	2.343	2.343	9.47	86.21	4.33	13.79	68.65	13.86	0.96	13.31	3.45	13.80
12	5.00	4.76	4.10	101.50	65.93	1265.70	727.79	535.59	2.340	2.340	9.46	86.12	4.42	13.88	68.14	13.91	0.96	13.35	3.05	12.20
Avg	5.00	4.76	4.10	101.53	65.69	1260.60	727.55	535.51	2.341	2.341	9.47	86.21	4.32	13.78	68.66	13.60	0.96	13.37	3.27	13.01
13	5.50	5.21	4.56	101.70	65.40	1261.25	729.27	536.00	2.353	2.353	10.57	86.18	3.26	13.82	76.45	13.98	0.96	13.42	3.36	13.57
14	5.50	5.21	4.56	101.70	66.25	1263.28	731.12	537.62	2.350	2.350	10.55	86.08	3.30	13.94	75.67	13.94	0.96	13.38	3.25	13.00
15	5.50	5.21	4.56	101.60	66.67	1266.96	733.34	537.66	2.356	2.356	10.56	86.30	3.12	13.70	77.24	14.11	0.96	13.55	3.54	14.16
Avg	5.50	5.21	4.56	101.63	66.30	1263.83	732.57	537.43	2.353	2.353	10.52	86.18	3.25	13.82	76.45	14.00	0.96	13.44	3.31	13.64
16	6.00	5.66	5.01	101.60	66.80	1269.20	734.67	537.47	2.361	2.361	11.85	86.08	2.27	13.92	83.69	12.55	0.96	12.05	3.65	14.50
17	6.00	5.66	5.01	101.70	66.43	1262.13	732.14	534.47	2.361	2.361	11.65	86.08	2.27	13.92	83.68	12.58	0.96	12.08	3.93	15.72
18	6.00	5.66	5.01	101.60	66.38	1266.01	733.51	535.52	2.362	2.362	11.65	86.11	2.24	13.89	83.67	12.14	0.96	11.65	3.69	15.56
Avg	6.00	5.66	5.01	101.63	66.40	1265.74	733.44	535.50	2.362	2.362	11.65	86.09	2.26	13.91	83.72	12.42	0.96	11.93	3.32	15.25
19	6.50	6.10	5.45	101.70	65.60	1263.46	730.02	536.93	2.359	2.359	12.67	85.53	1.50	14.47	87.95	11.11	0.96	10.67	4.22	16.80
20	6.50	6.10	5.45	101.70	65.80	1265.45	732.04	535.69	2.362	2.362	12.68	85.71	1.60	14.29	88.78	11.45	0.98	10.99	4.44	17.76
21	6.50	6.10	5.45	101.70	66.57	1272.15	736.11	539.81	2.367	2.367	12.66	85.90	1.84	14.50	87.32	11.32	0.98	10.87	4.14	16.56
Avg	6.50	6.10	5.45	101.70	66.00	1268.88	732.72	537.84	2.366	2.366	12.67	85.91	1.73	14.42	87.63	11.29	0.98	10.84	4.27	16.71
22	7.00	6.54	5.90	101.70	67.40	1278.00	739.89	541.70	2.369	2.369	13.70	85.20	1.10	14.80	92.99	9.95	0.93	9.25	4.67	18.68
23	7.00	6.54	5.90	101.80	67.00	1275.32	738.24	540.01	2.362	2.362	13.72	85.28	1.00	14.72	93.19	9.62	0.93	8.95	4.90	19.60
24	7.00	6.54	5.90	101.50	66.13	1280.80	740.18	543.34	2.367	2.367	13.69	85.12	1.19	14.88	92.02	9.87	0.93	9.18	4.77	19.08
Avg	7.00	6.54	5.90	101.67	66.84	1278.07	738.44	541.68	2.366	2.366	13.70	85.20	1.10	14.66	92.60	9.81	0.93	9.13	4.75	19.12



Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.023
Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AB}) : 2.588
Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{AE}) : 2.631
Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{max}) : 2.432

Materials Type : PMA
Design Traffic : Heavy (75 Buses Compact for each side)
Gradation : Nominal Size 12.5 mm. (1/2 in.)
% Asphalt absorption (a) : 0.65

No.	SP. GRAVITY OF AGGREGATE	SP. GRAVITY OF ASPHALT	MINIMUM ASPHALT CONTENT (%)	TOTAL AGGREGATE WEIGHT (g)	MARSHALL SPECIFIC GRAVITY		TOTAL WEIGHT (g)	FLUIDITY	FLUIDITY WEIGHT (g)	FLUIDITY MOISTURE (%)	% AIR VOLUME	% VMA	% VFA	STABILITY	FLUIDITY				
					APPARENT	THEORETICAL													
1	3.50	3.38	2.75	101.70	66.89	1253.53	665.18	535.96	2.262	6.14	85.20	14.80	41.47	12.12	0.80	11.27	2.25	8.68	
2	3.50	3.38	2.75	101.60	67.87	1231.88	686.15	542.12	2.272	6.11	84.83	9.06	13.17	40.28	13.07	0.83	12.18	2.68	12.30
3	3.50	3.38	2.75	101.60	65.03	1224.78	684.53	536.02	2.265	6.14	85.30	8.89	14.70	41.80	12.58	0.93	11.70	3.71	12.54
Avg																			
4	4.00	3.85	3.22	101.40	68.25	1231.84	684.88	537.63	2.200	7.24	85.41	7.30	14.33	48.79	13.78	0.95	12.82	2.79	11.98
5	4.00	3.85	3.22	101.76	67.87	1246.99	710.77	536.12	2.314	7.28	85.97	6.75	14.03	51.88	14.14	0.83	13.13	2.53	10.12
6	4.00	3.85	3.22	101.67	68.30	1245.14	705.94	539.25	2.297	7.23	85.35	7.42	14.65	48.32	13.29	0.83	12.36	2.85	11.40
Avg																			
7	4.50	4.31	3.68	101.57	67.30	1240.31	711.07	534.73	2.320	8.35	85.75	5.99	14.24	50.52	14.87	0.86	14.04	2.84	11.76
8	4.50	4.31	3.68	101.77	67.87	1235.98	707.37	535.43	2.306	8.31	85.35	6.34	14.65	66.71	14.84	0.93	13.60	3.05	12.20
9	4.50	4.31	3.68	101.67	66.83	1242.88	713.48	534.73	2.324	8.36	85.92	5.72	14.08	58.38	14.45	0.86	13.87	2.81	11.24
Avg																			
10	5.00	4.76	4.14	101.65	66.80	1248.22	718.68	531.91	2.343	9.48	86.22	4.30	13.78	68.78	16.73	0.68	15.10	2.94	11.78
11	5.00	4.76	4.14	101.70	67.00	1240.41	716.34	532.76	2.328	9.42	85.68	4.90	14.32	68.78	16.80	0.83	14.77	3.41	13.64
12	5.00	4.76	4.14	101.77	67.33	1244.43	718.30	534.41	2.329	9.42	86.09	4.89	14.31	68.84	16.75	0.86	15.12	3.21	12.84
Avg																			
13	5.50	5.21	4.60	101.70	67.37	1247.95	720.03	527.92	2.352	10.56	86.14	3.29	13.09	76.22	14.68	0.83	13.84	3.25	13.00
14	5.50	5.21	4.60	101.80	68.03	1254.43	725.05	534.41	2.347	10.54	85.91	3.49	14.03	76.12	14.98	0.86	14.36	3.51	14.04
15	5.50	5.21	4.60	101.56	67.87	1246.35	721.46	530.76	2.349	10.55	86.03	3.44	13.98	75.42	16.20	0.86	14.63	3.37	13.48
Avg																			
16	6.00	5.68	5.05	101.87	68.25	1274.42	727.31	541.12	2.355	11.61	85.66	2.63	13.26	85.10	14.26	0.83	13.26	3.67	14.28
17	6.00	5.68	5.05	101.70	68.13	1261.02	730.63	534.61	2.359	11.63	85.98	2.39	14.02	85.95	14.18	0.86	13.61	3.09	14.76
18	6.00	5.68	5.05	101.77	68.33	1268.22	733.48	536.37	2.359	11.63	85.98	2.39	14.02	82.97	13.77	0.93	12.61	3.42	13.60
Avg																			
19	6.50	6.10	5.49	101.70	67.70	1263.00	729.27	536.99	2.356	12.64	85.47	1.89	14.53	86.97	12.97	0.86	12.45	3.54	14.16
20	6.50	6.10	5.49	101.70	65.73	1258.06	727.48	532.76	2.358	12.65	85.53	1.82	14.47	87.43	13.88	0.86	13.05	4.09	16.38
21	6.50	6.10	5.49	101.60	68.63	1268.11	734.65	538.17	2.363	12.68	85.74	1.59	14.26	88.92	13.01	0.86	12.40	4.06	16.24
Avg																			
22	7.00	6.54	5.93	101.80	68.17	1211.81	731.79	542.34	2.345	13.60	84.69	1.72	15.31	88.70	12.23	0.83	11.37	4.19	16.76
23	7.00	6.54	5.93	101.80	67.87	1272.58	731.38	544.24	2.338	13.56	84.44	2.01	15.56	87.10	12.80	0.83	11.63	4.43	17.72
24	7.00	6.54	5.93	101.70	67.33	1278.56	732.80	545.30	2.341	13.57	84.54	1.89	15.48	87.78	11.87	0.83	11.13	4.25	17.00
Avg																			



ผลการทดสอบการหลุดลอกของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

Binder Type	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Unconditioned			Conditioned			% TSR	
				Max. Force (kN)	Average (kN)	DIJ (MPa)	Average (Mpa)	Max. Force (kN)	Average (kN)		DIJ (MPa)
AC 60-70	99.90	66.10	10372.581	9.21	9.10	0.888		7.48	7.34	0.721	80.70
	99.80	66.50	10424.904	9.09		0.872	0.875	7.24		0.694	
	99.85	66.40	10414.442	9.00		0.864		7.31		0.702	
NRA 1%	99.70	66.60	10430.119	9.69	10.09	0.929	0.973	8.87	8.55	0.850	84.75
	99.80	65.80	10315.168	10.56		1.024		8.25		0.800	
	99.50	66.30	10362.308	10.02		0.967		8.54		0.824	
NRA 3%	99.90	66.50	10435.350	9.58		0.918		8.18		0.784	82.35
	99.75	66.20	10372.675	11.29	10.37	1.088	0.999	8.47	8.54	0.817	
	99.80	66.10	10362.198	10.25		0.989		8.98		0.867	
NRA 5%	99.80	66.10	10362.198	9.22		0.890		8.12		0.784	83.16
	99.40	66.00	10305.052	9.44	9.63	0.916	0.931	7.48	8.01	0.726	
	99.80	66.00	10346.521	10.22		0.988		8.42		0.814	
NRA 7%	99.60	66.20	10357.077	9.54		0.921	0.913	8.12	7.81	0.784	82.60
	99.70	65.80	10304.832	9.69	9.45	0.940		7.48		0.726	
	99.65	66.30	10377.929	9.12		0.879		7.82		0.754	
NRA 9%	99.70	66.10	10351.815	8.96		0.866		6.82		0.659	81.60
	99.80	66.10	10362.198	7.65	8.34	0.738	0.803	6.42	6.80	0.620	
	99.50	66.70	10424.825	8.40		0.806		7.17		0.688	
NRA 11%	99.90	65.70	10309.812	8.75		0.849	0.821	6.88	6.93	0.667	81.45
	99.75	66.30	10388.344	8.69	8.50	0.837		6.83		0.657	
	99.35	66.50	10377.898	8.07		0.778		7.07		0.681	
NRA 13%	99.85	66.00	10351.705	7.07		0.683		5.77		0.557	82.08
	99.70	66.60	10430.119	6.93	7.01	0.664	0.676	5.83	5.76	0.559	
	99.80	66.00	10346.521	7.04		0.680		5.67		0.548	
PMA	99.80	66.20	10377.874	11.54		1.112	1.070	10.18	10.52	0.981	94.57
	99.70	66.30	10383.137	10.99	11.12	1.058		10.72		1.032	
	99.65	66.50	10409.235	10.83		1.040		10.65		1.023	

ผลการทดสอบแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Indirect Tensile Test at 25°C

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Max. Force (kN)	Average (kN)	IDT (Mpa)	Average (Mpa)
AC 60-70	AC-4.8-1	99.60	65.40	10231.916	9.93	10.28	0.970	1.001
	AC-4.8-2	99.40	65.80	10273.825	10.36		1.008	
	AC-4.8-3	99.80	65.80	10315.168	10.56		1.024	
	AC-5.3-1	99.75	65.90	10325.669	9.80	9.40	0.949	0.906
	AC-5.3-2	99.90	66.30	10403.965	9.20		0.884	
	AC-5.3-3	99.80	66.20	10377.874	9.19		0.886	
	AC-5.8-1	99.90	66.10	10372.581	9.21	9.10	0.888	0.875
	AC-5.8-2	99.80	66.50	10424.904	9.09		0.872	
	AC-5.8-3	99.85	66.40	10414.442	9.00		0.864	
NRA 1%	NRA 1%-4.8-1	99.90	65.70	10309.812	11.10	10.46	1.077	1.010
	NRA 1%-4.8-2	99.75	66.30	10388.344	10.50		1.011	
	NRA 1%-4.8-3	99.35	66.50	10377.898	9.77		0.941	
	NRA 1%-5.3-1	99.70	66.60	10430.119	9.69	10.09	0.929	0.973
	NRA 1%-5.3-2	99.80	65.80	10315.168	10.56		1.024	
	NRA 1%-5.3-3	99.50	66.30	10362.308	10.02		0.967	
	NRA 1%-5.8-1	100.00	66.00	10367.256	9.87	9.82	0.952	0.947
	NRA 1%-5.8-2	99.60	66.10	10341.432	9.63		0.931	
	NRA 1%-5.8-3	99.80	66.30	10393.551	9.97		0.959	
NRA 3%	NRA 3%-4.8-1	99.90	65.90	10341.196	10.45	10.50	1.011	1.014
	NRA 3%-4.8-2	99.75	66.10	10357.006	11.17		1.078	
	NRA 3%-4.8-3	99.70	66.30	10383.137	9.88		0.952	
	NRA 3%-5.3-1	99.90	66.50	10435.350	9.58	10.37	0.918	0.999
	NRA 3%-5.3-2	99.75	66.20	10372.675	11.29		1.088	
	NRA 3%-5.3-3	99.80	66.10	10362.198	10.25		0.989	
	NRA 3%-5.8-1	99.90	66.60	10451.042	8.79	9.23	0.841	0.885
	NRA 3%-5.8-2	99.50	66.70	10424.825	9.34		0.896	
	NRA 3%-5.8-3	99.60	66.70	10435.303	9.57		0.917	

Indirect Tensile Test at 25°C

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Max. Force (kN)	Average (kN)	IDT (Mpa)	Average (Mpa)	
NRA 5%	NRA 5%-4.8-1	99.90	65.70	10309.812	9.74	10.44	0.945	1.015	
	NRA 5%-4.8-2	100.00	65.40	10273.008	10.65		1.037		
	NRA 5%-4.8-3	99.95	65.40	10267.871	10.92		1.064		
	NRA 5%	NRA 5%-5.3-1	99.80	66.10	10362.198	9.22	9.63	0.890	0.931
		NRA 5%-5.3-2	99.40	66.00	10305.052	9.44		0.916	
		NRA 5%-5.3-3	99.80	66.00	10346.521	10.22		0.988	
	NRA 5%	NRA 5%-5.8-1	99.65	66.60	10424.888	8.62	8.55	0.827	0.823
		NRA 5%-5.8-2	99.40	66.50	10383.121	8.49		0.818	
		NRA 5%-5.8-3	99.85	66.10	10367.389	8.55		0.825	
NRA 7%	NRA 7%-4.8-1	99.70	65.20	10210.867	10.16	10.16	0.995	0.993	
	NRA 7%-4.8-2	99.80	65.50	10268.139	10.50		1.023		
	NRA 7%-4.8-3	99.45	65.50	10232.128	9.83		0.961		
	NRA 7%	NRA 7%-5.3-1	99.60	66.20	10357.077	9.54	9.45	0.921	0.913
		NRA 7%-5.3-2	99.70	65.80	10304.832	9.69		0.940	
		NRA 7%-5.3-3	99.65	66.30	10377.929	9.12		0.879	
	NRA 7%	NRA 7%-5.8-1	99.70	66.30	10383.137	7.92	8.21	0.763	0.791
		NRA 7%-5.8-2	99.85	66.10	10367.389	8.43		0.813	
		NRA 7%-5.8-3	99.70	66.30	10383.137	8.29		0.798	
NRA 9%	NRA 9%-4.8-1	99.85	65.60	10288.967	8.70	8.99	0.846	0.872	
	NRA 9%-4.8-2	99.80	66.20	10377.874	9.30		0.896		
	NRA 9%-4.8-3	99.85	65.40	10257.598	8.98		0.875		
	NRA 9%	NRA 9%-5.3-1	99.70	66.10	10351.815	8.96	8.34	0.866	0.803
		NRA 9%-5.3-2	99.80	66.10	10362.198	7.65		0.738	
		NRA 9%-5.3-3	99.50	66.70	10424.825	8.40		0.806	
	NRA 9%	NRA 9%-5.8-1	99.85	66.40	10414.442	7.01	7.23	0.673	0.689
		NRA 9%-5.8-2	99.80	67.40	10565.993	7.14		0.676	
		NRA 9%-5.8-3	99.80	66.80	10471.934	7.53		0.719	

Indirect Tensile Test at 25°C

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Max. Force (kN)	Average (kN)	IDT (Mpa)	Average (Mpa)	
NRA 11%	NRA 11%-4.8-1	99.90	65.70	10309.812	8.75	8.50	0.849	0.821	
	NRA 11%-4.8-2	99.75	66.30	10388.344	8.69		0.837		
	NRA 11%-4.8-3	99.35	66.50	10377.898	8.07		0.778		
	NRA 11%	NRA 11%-5.3-1	99.70	66.60	10430.119	7.85	7.81	0.753	0.753
		NRA 11%-5.3-2	99.80	65.80	10315.168	7.56		0.733	
		NRA 11%-5.3-3	99.50	66.30	10362.308	8.02		0.774	
	NRA 11%	NRA 11%-5.8-1	100.00	66.00	10367.256	6.87	6.82	0.663	0.658
		NRA 11%-5.8-2	99.60	66.10	10341.432	6.63		0.641	
		NRA 11%-5.8-3	99.80	66.30	10393.551	6.97		0.671	
NRA 13%	NRA 13%-4.8-1	99.90	65.10	10215.658	7.93	7.58	0.776	0.735	
	NRA 13%-4.8-2	99.80	65.90	10330.845	7.54		0.730		
	NRA 13%-4.8-3	99.70	66.40	10398.797	7.26		0.698		
	NRA 13%	NRA 13%-5.3-1	99.85	66.00	10351.705	7.07	7.01	0.683	0.676
		NRA 13%-5.3-2	99.70	66.60	10430.119	6.93		0.664	
		NRA 13%-5.3-3	99.80	66.00	10346.521	7.04		0.680	
	NRA 13%	NRA 13%-5.8-1	99.85	66.20	10383.074	6.24	6.42	0.601	0.615
		NRA 13%-5.8-2	99.80	66.60	10440.581	6.17		0.591	
		NRA 13%-5.8-3	99.65	67.00	10487.500	6.86		0.654	
PMA	PMA-4.8-1	100.00	65.50	10288.716	13.09	13.88	1.272	1.344	
	PMA-4.8-2	99.90	66.30	10403.965	13.61		1.308		
	PMA-4.8-3	99.65	65.80	10299.664	14.94		1.451		
	PMA	PMA-5.3-1	99.80	66.20	10377.874	11.54	11.12	1.112	1.070
		PMA-5.3-2	99.70	66.30	10383.137	10.99		1.058	
		PMA-5.3-3	99.65	66.50	10409.235	10.83		1.040	
	PMA	PMA-5.8-1	99.85	66.70	10461.496	11.10	10.84	1.061	1.039
		PMA-5.8-2	99.90	66.50	10435.350	10.53		1.009	
		PMA-5.8-3	99.90	66.20	10388.273	10.89		1.048	

Resilient Modulus Test

Materials Type : AC 60-70 at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
AC-4.8-4	99.60	66.30	10372.722	2.595	1	10951.00	10895.20	10600.333
						10762.00		
						10798.00		
						10780.00		
						11185.00		
					2	10511.00	10640.00	
						10710.00		
						11148.00		
						10320.00		
						10511.00		
AC-4.8-5	99.70	66.30	10383.137	2.598	1	9991.00	10302.80	
						10152.00		
						10915.00		
						10119.00		
						10337.00		
					2	10371.00	10393.80	
						10354.00		
						10529.00		
						10152.00		
						10563.00		
AC-4.8-6	99.75	65.90	10325.669	2.584	1	10704.00	10789.60	
						10927.00		
						10909.00		
						10704.00		
						10704.00		
					2	10314.00	10580.60	
						10704.00		
						10488.00		
						10488.00		
						10909.00		
AC-5.3-4	99.85	66.20	10383.074	2.353	1	10433.00	10224.00	
						9995.00		
						10433.00		
						10031.00		
						10228.00		
					2	9298.00	9281.40	
						8978.00		
						9467.00		
						9416.00		
						9248.00		
AC-5.3-5	99.70	66.30	10383.137	2.353	1	9645.00	9862.80	
						9827.00		
						10016.00		
						9810.00		
						10016.00		
					2	9610.00	9976.40	
						10139.00		
						9593.00		
						10342.00		
						9998.00		
AC-5.3-6	99.90	66.00	10356.889	2.347	1	10842.00	10818.40	
						10803.00		
						10822.00		
						10822.00		
						10803.00		
					2	10952.00	11173.80	
						10932.00		
						11231.00		
						11252.00		
						11502.00		
AC-5.8-4	99.80	66.20	10377.874	2.269	1	8839.00	9279.40	
						8839.00		
						9506.00		
						9506.00		
						9707.00		
					2	10438.00	10064.80	
						10002.00		
						10021.00		
						9824.00		
						10039.00		
AC-5.8-5	99.60	66.80	10450.948	2.285	1	9333.00	9415.40	
						9333.00		
						9736.00		
						9549.00		
						9126.00		
					2	9247.00	8964.80	
						8593.00		
						8760.00		
						9078.00		
						9146.00		
AC-5.8-6	99.80	66.30	10393.551	2.273	1	8368.00	8768.00	
						9160.00		
						8833.00		
						8817.00		
						8662.00		
					2	8678.00	8845.60	
						9011.00		
						9160.00		
						8850.00		
						8529.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : AC 60-70 at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
AC-4.8-4	99.60	66.30	10372.722	2.076	1	4389.00	4420.00	4622.167
						4389.00		
						4389.00		
						4389.00		
						4544.00		
					2	4615.00	4642.00	
						4655.00		
						4635.00		
						4703.00		
						4602.00		
AC-4.8-5	99.70	66.30	10383.137	2.078	1	4537.00	4562.80	
						4537.00		
						4569.00		
						4569.00		
						4602.00		
					2	4413.00	4352.00	
						4359.00		
						4317.00		
						4376.00		
						4295.00		
AC-4.8-6	99.75	65.90	10325.669	2.067	1	4926.00	4909.80	
						4912.00		
						4926.00		
						4852.00		
						4933.00		
					2	4845.00	4846.40	
						4852.00		
						4823.00		
						4889.00		
						4823.00		
AC-5.3-4	99.85	66.20	10383.074	1.882	1	4573.00	4510.80	
						4475.00		
						4502.00		
						4502.00		
						4502.00		
					2	3831.00	3827.40	
						3831.00		
						3831.00		
						3850.00		
						3794.00		
AC-5.3-5	99.70	66.30	10383.137	1.882	1	4427.00	4426.00	
						4401.00		
						4434.00		
						4434.00		
						4434.00		
					2	4394.00	4393.80	
						4336.00		
						4503.00		
						4368.00		
						4368.00		
AC-5.3-6	99.90	66.00	10356.889	1.877	1	4615.00	4601.00	
						4586.00		
						4652.00		
						4608.00		
						4544.00		
					2	4407.00	4422.40	
						4414.00		
						4447.00		
						4335.00		
						4509.00		
AC-5.8-4	99.80	66.20	10377.874	1.815	1	4129.00	4116.80	
						4105.00		
						4099.00		
						4129.00		
						4122.00		
					2	2710.00	2687.20	
						2676.00		
						2689.00		
						2689.00		
						2672.00		
AC-5.8-5	99.60	66.80	10450.948	1.828	1	3762.00	3724.80	
						3712.00		
						3737.00		
						3749.00		
						3664.00		
					2	3731.00	3718.40	
						3688.00		
						3755.00		
						3712.00		
						3706.00		
AC-5.8-6	99.80	66.30	10393.551	1.818	1	3901.00	3886.60	
						3888.00		
						3868.00		
						3901.00		
						3875.00		
					2	3848.00	3847.00	
						3816.00		
						3848.00		
						3875.00		
						3848.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : AC 60-70 at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)						
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด				
AC-4.8-4	99.60	66.30	10372.722	1.557	1	1608.00 1626.00 1615.00 1600.00 1599.00	1609.60	1484.833				
					2	1163.00 1161.00 1158.00 1160.00 1160.00 1740.00			1160.40			
AC-4.8-5	99.70	66.30	10383.137	1.559	1	1713.00 1708.00 1705.00 1705.00	1714.20			1484.833		
					2	1266.00 1257.00 1251.00 1245.00 1245.00			1252.80			
AC-4.8-6	99.75	65.90	10325.669	1.550	1	1716.00 1708.00 1716.00 1714.00 1703.00	1711.40				1484.833	
					2	1465.00 1465.00 1454.00 1462.00 1457.00			1460.60			
AC-5.3-4	99.85	66.20	10383.074	1.412	1	1360.00 1345.00 1360.00 1367.00 1360.00	1358.40					1403.933
					2	1235.00 1238.00 1229.00 1225.00 1214.00			1228.20			
AC-5.3-5	99.70	66.30	10383.137	1.412	1	1504.00 1517.00 1509.00 1499.00 1498.00	1505.40					
					2	1352.00 1345.00 1350.00 1327.00 1339.00			1342.60			
AC-5.3-6	99.90	66.00	10356.889	1.408	1	1562.00 1564.00 1562.00 1575.00 1575.00	1567.60	1403.933				
					2	1430.00 1435.00 1417.00 1415.00 1410.00			1421.40			
AC-5.8-4	99.80	66.20	10377.874	1.362	1	1573.00 1601.00 1565.00 1593.00 1586.00	1583.60			1374.900		
					2	1337.00 1311.00 1323.00 1321.00 1318.00 1381.00			1322.00			
AC-5.8-5	99.60	66.80	10450.948	1.371	1	1385.00 1362.00 1378.00 1375.00 1152.00	1376.20				1374.900	
					2	1152.00 1149.00 1149.00 1152.00			1150.80			
AC-5.8-6	99.80	66.30	10393.551	1.364	1	1591.00 1595.00 1580.00 1582.00 1589.00	1587.40					1374.900
					2	1232.00 1233.00 1233.00 1226.00 1223.00			1229.40			

Resilient Modulus Test

Materials Type : AC 60-70 at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
AC-4.8-4	99.60	66.30	10372.722	1.038	1	693.20 687.00 683.00 683.60 681.00 529.30	685.56	616.200	
					2	533.10 533.40 535.80 538.20 609.50			533.96
AC-4.8-5	99.70	66.30	10383.137	1.039	1	609.50 606.30 609.50 610.20 582.80	609.00		587.04
					2	586.40 590.90 586.20 588.90	587.04		
AC-4.8-6	99.75	65.90	10325.669	1.033	1	690.60 692.00 685.80 687.20 691.30	689.38		592.26
					2	594.60 588.10 591.90 590.60 596.10	592.26		
AC-5.3-4	99.85	66.20	10383.074	0.941	1	525.50 523.70 522.90 526.40 523.84	524.47		482.10
					2	481.70 484.80 482.60 479.60 481.80 711.30	482.10		
AC-5.3-5	99.70	66.30	10383.137	0.941	1	705.70 711.30 709.60 707.30 555.60	709.04		552.44
					2	555.40 550.80 550.70 549.70 661.60	552.44		
AC-5.3-6	99.90	66.00	10356.889	0.939	1	658.20 660.30 657.60 653.30	658.20	543.58	
					2	544.50 544.50 543.60 543.60 541.70	543.58		
AC-5.8-4	99.80	66.20	10377.874	0.908	1	530.20 535.60 531.30 533.80 532.00	532.58	475.72	
					2	477.70 475.50 476.60 473.30 475.50 578.90	475.72		
AC-5.8-5	99.60	66.80	10450.948	0.914	1	576.70 579.70 577.80 575.60 485.30	577.74	484.02	
					2	486.10 483.70 482.10 482.90	484.02		
AC-5.8-6	99.80	66.30	10393.551	0.909	1	626.70 622.50 613.10 625.60 620.40	621.66	551.04	
					2	541.40 538.60 541.40 544.50 589.30	551.04		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 1% at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)										
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด								
NRA1%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	2.622	1	13753.00	13607.00	13766.467								
						13730.00										
						13730.00										
						13092.00										
						13730.00										
					2	13425.00	13118.60		12815.00							
						12836.00										
						13092.00										
						13425.00										
						13218.00										
NRA1%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	2.615	1	12589.00	12906.40	13766.467								
						13218.00										
						12897.00										
						12610.00										
						14139.00										
					2	14859.00	14191.20		14093.00							
						13749.00										
						14116.00										
						13147.00										
						12563.00										
NRA1%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	2.606	1	13460.00	13159.80	13766.467								
						13169.00										
						13460.00										
						16233.00										
						15356.00										
					2	15782.00	15615.80		14952.00							
						15756.00										
						13257.00										
						NRA1%-5.3-4			99.60	66.50	10404.012	2.531	1	13635.00	13632.40	13766.467
														13984.00		
13984.00																
13302.00																
13588.00																
2	13937.00	13874.00	13565.00													
	13565.00															
	14715.00															
	13345.00															
	13345.00															
NRA1%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	2.525	1	13655.00	13617.80	13766.467								
						14399.00										
						12724.00										
						13345.00										
						13368.00										
					2	13368.00	13148.40		13322.00							
						12983.00										
						14352.00										
						NRA1%-5.3-6			99.70	66.50	10414.458	2.534	1	14008.00	14300.80	13766.467
														13984.00		
15176.00																
13984.00																
13658.00																
2	14008.00	13663.40	13008.00													
	14008.00															
	13635.00															
	12315.00															
	NRA1%-5.8-4		99.70	66.50	10414.458		2.467	1					12608.00	12447.40	13766.467	
11768.00																
12916.00																
12630.00																
12719.00																
2		13029.00				12620.60		12162.00								
		12141.00														
		13052.00														
		10810.00														
		NRA1%-5.8-5						99.55	66.60	10414.427	2.467	1	10810.00	10939.20		13766.467
11035.00																
10791.00																
11250.00																
11791.00																
2	12123.00		11855.80	12059.00												
	11515.00															
	11791.00															
	11883.00															
	NRA1%-5.8-6			99.80	66.90	10487.610	2.484					1	11624.00	11521.80	13766.467	
11604.00																
11604.00																
10894.00																
12306.00																
2		12026.00	12562.20					12621.00								
		12929.00														
		12929.00														
		12929.00														
		12929.00														

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 1% at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA1%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	2.098	1	4937.00	4986.20	5118.067
						5013.00		
						5038.00		
						5006.00		
						4937.00		
					2	4930.00	4951.40	
						4930.00		
						4961.00		
						4923.00		
						5013.00		
NRA1%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	2.092	1	5038.00	5001.20	
						5092.00		
						4931.00		
						4976.00		
						4969.00		
					2	4779.00	4770.80	
						4710.00		
						4779.00		
						4772.00		
						4814.00		
NRA1%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	2.085	1	5581.00	5617.80	
						5689.00		
						5589.00		
						5629.00		
						5621.00		
					2	5336.00	5381.00	
						5404.00		
						5433.00		
						5344.00		
						5388.00		
NRA1%-5.3-4	99.60	66.50	10404.012	2.025	1	5272.00	5251.80	
						5221.00		
						5221.00		
						5309.00		
						5236.00		
					2	5143.00	5178.80	
						5185.00		
						5288.00		
						5135.00		
						5143.00		
NRA1%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	2.020	1	5143.00	5171.40	
						5177.00		
						5093.00		
						5309.00		
						5135.00		
					2	4965.00	4993.20	
						4933.00		
						5004.00		
						5052.00		
						5012.00		
NRA1%-5.3-6	99.70	66.50	10414.458	2.027	1	5448.00	5415.60	
						5409.00		
						5448.00		
						5456.00		
						5317.00		
					2	5317.00	5306.80	
						5264.00		
						5362.00		
						5221.00		
						5370.00		
NRA1%-5.8-4	99.70	66.50	10414.458	1.974	1	4926.00	4932.80	
						4904.00		
						4933.00		
						4968.00		
						4933.00		
					2	4831.00	4853.00	
						4861.00		
						4868.00		
						4837.00		
						4868.00		
NRA1%-5.8-5	99.55	66.60	10414.427	1.974	1	4857.00	4848.20	
						4811.00		
						4893.00		
						4823.00		
						4857.00		
					2	4724.00	4753.40	
						4762.00		
						4724.00		
						4757.00		
						4800.00		
NRA1% 5.8-6	99.80	66.90	10487.610	1.987	1	4964.00	4961.20	
						4937.00		
						4991.00		
						4997.00		
						4917.00		
					2	4923.00	4962.60	
						4997.00		
						4997.00		
						4932.00		
						4964.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 1% at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)							
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด					
NRA1%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	1.573	1	1448.00	1443.20	1541.667					
					2	1272.80							
NRA1%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	1.569	1	1613.00			1613.00	1541.667			
					2	1266.40							
NRA1%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	1.564	1	2019.80					2019.80	1541.667	
					2	1634.80							
NRA1%-5.3-4	99.60	66.50	10404.012	1.519	1	1639.20	1639.20						1456.167
					2	1234.00							
NRA1%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	1.515	1	1425.40			1425.40				
					2	1275.00							
NRA1%-5.3-6	99.70	66.50	10414.458	1.520	1	1670.20		1670.20			1456.167		
					2	1493.20							
NRA1%-5.8-4	99.70	66.50	10414.458	1.480	1	1443.80	1443.80			1273.033			
					2	1196.40							
NRA1%-5.8-5	99.55	66.60	10414.427	1.480	1	1248.20			1248.20			1273.033	
					2	1032.20							
NRA1%-5.8-6	99.80	66.90	10487.610	1.491	1	1520.40		1520.40					1273.033
					2	1197.20							

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 1% at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA1%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	1.049	1	693.10	693.140	690.050
						694.00		
						692.40		
						692.10		
						694.10		
					2	673.80	673.200	
						673.20		
						675.00		
						672.30		
						671.70		
NRA1%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	1.046	1	713.50	712.280	
						713.50		
						709.70		
						713.50		
						711.20		
					2	666.70	668.320	
						669.20		
						668.70		
						668.20		
						668.80		
NRA1%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	1.042	1	728.20	729.020	
						728.20		
						724.50		
						733.90		
						730.30		
					2	664.20	664.340	
						664.20		
						662.40		
						664.90		
						666.00		
NRA1%-5.3-4	99.60	66.50	10404.012	1.013	1	636.60	637.000	
						633.70		
						639.20		
						637.50		
						638.00		
					2	506.70	507.780	
						511.30		
						506.70		
						506.70		
						507.50		
NRA1%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	1.010	1	776.50	770.940	
						770.60		
						765.30		
						772.90		
						769.40		
					2	575.30	575.340	
						575.60		
						570.90		
						575.60		
						579.30		
NRA1%-5.3-6	99.70	66.50	10414.458	1.014	1	779.40	777.880	
						781.20		
						771.80		
						779.40		
						777.60		
					2	673.60	665.440	
						664.40		
						665.70		
						659.80		
						663.70		
NRA1%-5.8-4	99.70	66.50	10414.458	0.987	1	595.00	588.500	
						587.10		
						590.70		
						589.90		
						579.80		
					2	511.60	511.760	
						511.60		
						513.20		
						509.20		
						513.20		
NRA1%-5.8-5	99.55	66.60	10414.427	0.987	1	729.80	726.080	
						728.10		
						726.50		
						726.50		
						719.50		
					2	460.00	455.760	
						456.10		
						454.70		
						455.30		
						452.70		
NRA1%-5.8-6	99.80	66.90	10487.610	0.994	1	637.10	638.860	
						640.80		
						643.50		
						635.30		
						637.60		
					2	726.10	728.200	
						728.30		
						733.20		
						728.30		
						725.10		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 3% at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
NRA3%-4.8-4	99.60	65.80	10294.496	2.608	1	14834.00	14635.40	13299.633	
						14487.00			
						14882.00			
						14487.00			
						14487.00			
					2	13474.00	13507.60		13363.00
						13366.00			
						13772.00			
						13563.00			
						12974.00			
NRA3%-4.8-5	99.85	67.10	10524.233	2.667	1	12974.00	13009.20	13299.633	
						13040.00			
						12934.00			
						13124.00			
						11842.00			
					2	12088.00	12141.80		12108.00
						12306.00			
						12365.00			
						13993.00			
						13958.00			
NRA3%-4.8-6	99.55	65.90	10304.966	2.611	1	13976.00	13925.40	13299.633	
						13742.00			
						13958.00			
						12647.00			
						12846.00			
					2	12563.00	12578.40		12418.00
						12418.00			
						12418.00			
						12725.00			
						11649.00			
NRA3%-5.3-4	99.50	66.80	10440.455	2.606	1	12449.00	12238.20	11026.267	
						12164.00			
						12204.00			
						12105.00			
						12085.00			
					2	12622.00	12198.60		11833.00
						12348.00			
						9993.00			
						9993.00			
						9623.00			
NRA3%-5.3-5	99.70	66.50	10414.458	2.600	1	10139.00	9948.20	11026.267	
						9993.00			
						10847.00			
						10089.00			
						9928.00			
					2	9895.00	10172.80		10105.00
						10620.00			
						10427.00			
						10838.00			
						10444.00			
NRA3%-5.3-6	99.60	66.70	10435.303	2.605	1	10821.00	10630.00	11026.267	
						11451.00			
						10786.00			
						11433.00			
						10786.00			
					2	10393.00	10969.80		10983.00
						11512.00			
						11532.00			
						10792.00			
						11262.00			
NRA3%-5.8-4	99.65	66.90	10471.847	2.316	1	10904.00	11216.20	10811.233	
						12180.00			
						11121.00			
						11896.00			
						11626.00			
					2	9966.00	11545.40		10569.00
						10373.00			
						10430.00			
						9966.00			
						9900.00			
NRA3%-5.8-5	99.60	66.60	10419.658	2.305	1	9971.00	10260.80	10811.233	
						10468.00			
						10057.00			
						9948.00			
						10742.00			
					2	11016.00	10068.80		11016.00
						10762.00			
						10323.00			
						11496.00			
						10762.00			
NRA3%-5.8-6	99.55	66.80	10445.701	2.310	1	10996.00	10867.80	10811.233	
						10762.00			
						10762.00			
						10782.00			
						11240.00			
					2	10762.00	10908.40		10782.00
						10782.00			
						10782.00			
						10782.00			
						11240.00			

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 3% at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
NRA3%-4.8-4	99.60	65.80	10294.496	2.087	1	6401.00	6358.80	5642.733	
						6410.00			
	6348.00								
	6278.00								
	6357.00								
	5936.00								
2	6102.00	5960.20							
	5891.00								
	5990.00								
	5882.00								
	5551.00								
NRA3%-4.8-5	99.85	67.10		10524.233	2.133	1	5505.00	5533.00	
							5505.00		
	5505.00								
	5599.00								
	5071.00								
2	5110.00	5105.40							
	5158.00								
	5110.00								
	5078.00								
	5786.00								
NRA3%-4.8-6	99.55	65.90		10304.966	2.089	1	5846.00	5774.40	
							5786.00		
	5727.00								
	5727.00								
	5029.00								
2	5223.00	5124.60							
	5115.00								
	5141.00								
	5115.00								
	4872.00								
NRA3%-5.3-4	99.50	66.80		10440.455	2.085	1	5064.00	4964.60	
							4986.00		
	4947.00								
	4954.00								
	4813.00								
2	4850.00	4843.00							
	4909.00								
	4757.00								
	4886.00								
	4702.00								
NRA3%-5.3-5	99.70	66.50		10414.458	2.080	1	4621.00	4653.80	4829.267
							4608.00		
	4601.00								
	4737.00								
	4430.00								
2	4443.00	4400.80							
	4330.00								
	4425.00								
	4376.00								
	5316.00								
NRA3%-5.3-6	99.60	66.70		10435.303	2.084	1	5202.00	5274.80	
							5280.00		
	5237.00								
	5339.00								
	4822.00								
2	4940.00	4838.60							
	4750.00								
	4793.00								
	4888.00								
	5245.00								
NRA3%-5.8-4	99.65	66.90		10471.847	1.853	1	5189.00	5214.60	
							5277.00		
	5228.00								
	5134.00								
	4921.00								
2	4964.00	4913.40							
	4855.00								
	4956.00								
	4871.00								
	4587.00								
NRA3%-5.8-5	99.60	66.60		10419.658	1.844	1	4557.00	4554.60	4682.267
							4514.00		
	4594.00								
	4521.00								
	4158.00								
2	4165.00	4173.20							
	4227.00								
	4158.00								
	4158.00								
	4625.00								
NRA3%-5.8-6	99.55	66.80		10445.701	1.848	1	4655.00	4678.60	
							4709.00		
	4741.00								
	4663.00								
	4588.00								
2	4595.00	4559.20							
	4595.00								
	4452.00								
	4566.00								
	4566.00								

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 3% at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)						
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด				
NRA3%-4.8-4	99.60	65.80	10294.496	1.565	1	1762.00	1761.40	1679.667				
						1774.00						
						1753.00						
						1759.00						
						1759.00						
					2	1433.00	1428.00		1426.00			
						1433.00						
						1426.00						
						1426.00						
						1422.00						
NRA3%-4.8-5	99.85	67.10	10524.233	1.600	1	1720.00	1718.40	1679.667				
						1716.00						
						1730.00						
						1713.00						
						1713.00						
					2	1675.00	1677.80		1673.00			
						1700.00						
						1668.00						
						1673.00						
						1940.00						
NRA3%-4.8-6	99.55	65.90	10304.966	1.567	1	1915.00	1926.60	1679.667				
						1936.00						
						1933.00						
						1909.00						
						1584.00			1565.80	1679.667		
					2	1556.00	1565.80				1560.00	
						1562.00						
						1562.00						
						1567.00						
						1750.00			1574.900			
NRA3%-5.3-4	99.50	66.80	10440.455	1.564	1	1720.00	1724.20	1574.900				
						1730.00						
						1717.00						
						1704.00						
						1494.00				1483.60	1574.900	
					2	1481.00	1483.60					1481.00
						1481.00						
						1481.00						
						1481.00						
						1481.00						
NRA3%-5.3-5	99.70	66.50	10414.458	1.560	1	1760.00	1746.80	1574.900				
						1728.00						
						1744.00						
						1738.00						
						1528.00			1524.80	1574.900		
					2	1527.00	1524.80				1518.00	
						1523.00						
						1528.00						
						1528.00						
						1572.00			1526.80			
NRA3%-5.3-6	99.60	66.70	10435.303	1.563	1	1505.00	1526.80	1526.80				
						1528.00						
						1524.00						
						1505.00						
						1442.00				1443.20	1526.80	
					2	1449.00	1443.20					1448.00
						1442.00						
						1442.00						
						1435.00						
						1428.00			1443.20			
NRA3%-5.8-4	99.65	66.90	10471.847	1.390	1	1479.00	1443.20	1443.20				
						1411.00						
						1492.00						
						1406.00						
						1226.00				1218.00	1443.20	
					2	1233.00	1218.00					1211.00
						1213.00						
						1207.00						
						1547.00						1536.40
						NRA3%-5.8-5			99.60	66.60		
1529.00												
1543.00												
1520.00												
1343.00	1345.40	1379.933										
2			1351.00	1345.40	1339.00							
			1347.00									
			1347.00									
			1492.00		1478.80							
	NRA3%-5.8-6		99.55				66.80	10445.701			1.386	1
1497.00												
1478.00												
1459.00												
1267.00				1257.80		1478.80						
2		1253.00							1257.80	1263.00		
		1253.00										
		1253.00										
		1253.00										
		1253.00										

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 3% at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA3%-4.8-4	99.60	65.80	10294.496	1.043	1	708.40	710.960	705.270
						710.90		
						710.90		
						713.70		
						710.90		
					2	546.50	547.080	
						546.40		
						548.10		
						548.00		
						546.40		
NRA3%-4.8-5	99.85	67.10	10524.233	1.067	1	801.50	796.620	
						797.40		
						800.10		
						792.50		
						791.60		
					2	591.50	592.340	
						593.60		
						594.30		
						592.20		
						590.10		
NRA3%-4.8-6	99.55	65.90	10304.966	1.044	1	845.20	837.520	
						841.10		
						835.10		
						833.10		
						833.10		
					2	750.20	747.100	
						744.70		
						747.80		
						746.40		
						746.40		
NRA3%-5.3-4	99.50	66.80	10440.455	1.043	1	737.40	732.200	
						733.80		
						731.80		
						732.20		
						725.80		
					2	500.70	501.120	
						503.50		
						498.60		
						500.70		
						502.10		
NRA3%-5.3-5	99.70	66.50	10414.458	1.040	1	788.40	788.060	
						793.50		
						791.20		
						783.60		
						783.60		
					2	571.00	566.840	
						563.90		
						565.80		
						568.40		
						565.10		
NRA3%-5.3-6	99.60	66.70	10435.303	1.042	1	862.00	855.200	
						849.00		
						843.00		
						861.00		
						861.00		
					2	730.50	733.360	
						732.00		
						740.40		
						731.50		
						732.40		
NRA3%-5.8-4	99.65	66.90	10471.847	0.926	1	698.20	692.980	
						698.20		
						685.20		
						694.90		
						688.40		
					2	587.00	574.600	
						572.00		
						564.00		
						575.00		
						575.00		
NRA3%-5.8-5	99.60	66.60	10419.658	0.922	1	747.00	746.800	
						750.00		
						743.00		
						751.00		
						743.00		
					2	622.80	619.920	
						618.20		
						622.80		
						620.80		
						615.00		
NRA3%-5.8-6	99.55	66.80	10445.701	0.924	1	764.90	758.700	
						758.60		
						758.60		
						761.70		
						749.70		
					2	510.90	508.980	
						510.90		
						504.50		
						503.40		
						515.20		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 5% at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA5%-4.8-4	99.80	65.30	10236.785	2.598	1	13402.00	12972.60	12895.267
						13402.00		
						12786.00		
						12786.00		
						12487.00		
					2	13076.00	12606.20	
						12570.00		
						12221.00		
						13098.00		
						12066.00		
NRA5%-4.8-5	99.75	66.30	10388.344	2.636	1	12543.00	12712.20	
						13092.00		
						12780.00		
						12563.00		
						12583.00		
					2	12904.00	12726.40	
						12380.00		
						12943.00		
						12964.00		
						12441.00		
NRA5%-4.8-6	99.75	66.00	10341.338	2.624	1	14205.00	13639.40	
						13479.00		
						13884.00		
						13391.00		
						13238.00		
					2	12355.00	12714.80	
						12916.00		
						12629.00		
						12457.00		
						13217.00		
NRA5%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	2.409	1	10940.00	11025.20	
						10940.00		
						11172.00		
						11037.00		
						11037.00		
					2	10671.00	10911.00	
						11037.00		
						10243.00		
						11312.00		
						11292.00		
NRA5%-5.3-5	99.75	66.20	10372.675	2.415	1	11180.00	11597.80	
						11180.00		
						11987.00		
						11863.00		
						11779.00		
					2	10508.00	10759.60	
						10540.00		
						10722.00		
						11102.00		
						10926.00		
NRA5%-5.3-6	99.70	66.20	10367.476	2.414	1	11238.00	11685.80	
						11800.00		
						11523.00		
						11821.00		
						12047.00		
					2	9234.00	9568.40	
						9723.00		
						9415.00		
						9747.00		
						9723.00		
NRA5%-5.8-4	99.85	66.70	10461.496	2.153	1	10844.00	11336.20	
						12176.00		
						11619.00		
						10844.00		
						11198.00		
					2	10386.00	10213.80	
						10588.00		
						9685.00		
						10186.00		
						10224.00		
NRA5%-5.8-5	99.80	66.00	10346.521	2.129	1	9122.00	9041.80	
						9028.00		
						8881.00		
						9080.00		
						9098.00		
					2	8689.00	8779.20	
						8881.00		
						8739.00		
						8706.00		
						8881.00		
NRA5%-5.8-6	99.70	66.00	10336.154	2.127	1	10098.00	9885.00	
						9694.00		
						9873.00		
						10293.00		
						9467.00		
					2	9559.00	9876.60	
						9559.00		
						9559.00		
						10353.00		
						10353.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 5% at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
NRA5%-4.8-4	99.80	65.30	10236.785	2.078	1	5248.00	5220.40	5076.767	
						5199.00			
						5326.00			
						5039.00			
						5290.00			
					2	5046.00	5030.20		4993.00
						5125.00			
						4955.00			
						5032.00			
						4928.00			
NRA5%-4.8-5	99.75	66.30	10388.344	2.109	1	4892.00	4895.40	5076.767	
						4784.00			
						4952.00			
						4921.00			
						4878.00			
					2	4841.00	4848.80		4778.00
						4862.00			
						4885.00			
						5442.00			
						5434.00			
NRA5%-4.8-6	99.75	66.00	10341.338	2.099	1	5426.00	5441.80	5076.767	
						5525.00			
						5382.00			
						4960.00			
						5029.00			
					2	5005.00	5024.00		5075.00
						5051.00			
						5029.00			
						4711.00			
						4603.00			
NRA5%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	1.927	1	4704.00	4666.40	4686.800	
						4639.00			
						4675.00			
						4479.00			
						4520.00			
					2	4453.00	4465.00		4446.00
						4427.00			
						4817.00			
						4771.00			
						4771.00			
NRA5%-5.3-5	99.75	66.20	10372.675	1.932	1	4771.00	4772.80	4686.800	
						4771.00			
						4771.00			
						4734.00			
						4294.00			
					2	4318.00	4268.60		4227.00
						4240.00			
						4264.00			
						5131.00			
						5123.00			
NRA5%-5.3-6	99.70	66.20	10367.476	1.931	1	5183.00	5168.80	4686.800	
						5320.00			
						5087.00			
						4764.00			
						4802.00			
					2	4764.00	4779.20		4795.00
						4771.00			
						4798.00			
						4842.00			
						4755.00			
NRA5%-5.8-4	99.85	66.70	10461.496	1.722	1	4798.00	4789.60	4254.367	
						4842.00			
						4755.00			
						4798.00			
						4755.00			
					2	4560.00	4495.40		4468.00
						4513.00			
						4468.00			
						4468.00			
						3967.00			
NRA5%-5.8-5	99.80	66.00	10346.521	1.703	1	4051.00	3997.40	4254.367	
						4028.00			
						3967.00			
						3974.00			
						3902.00			
					2	4020.00	3971.20		4028.00
						3909.00			
						3997.00			
						4342.00			
						4452.00			
NRA5%-5.8-6	99.70	66.00	10336.154	1.701	1	4460.00	4412.60	4254.367	
						4415.00			
						4394.00			
						3867.00			
						3902.00			
					2	3874.00	3860.00		3846.00
						3811.00			

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 5% at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA5%-4.8-4	99.80	65.30	10236.785	1.559	1	2104.00	2096.80	1836.367
						2092.00		
						2100.00		
						2096.00		
						2092.00		
					2	1976.00	1964.60	
						1972.00		
						1943.00		
						1964.00		
						1968.00		
NRA5%-4.8-5	99.75	66.30	10388.344	1.582	1	1858.00	1862.40	
						1872.00		
						1872.00		
						1855.00		
						1855.00		
					2	1663.00	1676.00	
						1687.00		
						1671.00		
						1669.00		
						1690.00		
NRA5%-4.8-6	99.75	66.00	10341.338	1.574	1	1831.00	1838.20	
						1840.00		
						1840.00		
						1840.00		
						1840.00		
					2	1569.00	1580.20	
						1583.00		
						1587.00		
						1570.00		
						1592.00		
NRA5%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	1.445	1	1821.00	1817.00	
						1814.00		
						1811.00		
						1831.00		
						1808.00		
					2	1573.00	1560.00	
						1565.00		
						1556.00		
						1556.00		
						1550.00		
NRA5%-5.3-5	99.75	66.20	10372.675	1.449	1	1699.00	1689.80	
						1672.00		
						1690.00		
						1706.00		
						1682.00		
					2	1412.00	1427.80	
						1415.00		
						1415.00		
						1419.00		
						1478.00		
NRA5%-5.3-6	99.70	66.20	10367.476	1.448	1	1741.00	1732.80	
						1738.00		
						1728.00		
						1722.00		
						1735.00		
					2	1431.00	1428.00	
						1426.00		
						1426.00		
						1430.00		
						1427.00		
NRA5%-5.8-4	99.85	66.70	10461.496	1.292	1	1509.00	1520.80	
						1538.00		
						1515.00		
						1538.00		
						1504.00		
					2	1523.00	1485.00	
						1495.00		
						1499.00		
						1418.00		
						1490.00		
NRA5%-5.8-5	99.80	66.00	10346.521	1.277	1	1559.00	1558.20	
						1549.00		
						1552.00		
						1564.00		
						1567.00		
					2	1406.00	1393.60	
						1382.00		
						1380.00		
						1406.00		
						1394.00		
NRA5%-5.8-6	99.70	66.00	10336.154	1.276	1	1589.00	1586.40	
						1574.00		
						1593.00		
						1592.00		
						1584.00		
					2	1339.00	1334.00	
						1339.00		
						1331.00		
						1324.00		
						1337.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 5% at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA5%-4.8-4	99.80	65.30	10236.785	1.039	1	840.30	838.220	725.043
						843.50		
						841.90		
						833.90		
						831.50		
					2	728.00	726.560	
						726.50		
						730.70		
						725.60		
						722.00		
NRA5%-4.8-5	99.75	66.30	10388.344	1.054	1	708.20	707.560	
						705.50		
						709.00		
						705.50		
						709.60		
					2	718.80	715.860	
						716.50		
						716.50		
						716.50		
						711.00		
NRA5%-4.8-6	99.75	66.00	10341.338	1.050	1	708.70	710.840	
						713.00		
						716.50		
						708.70		
						707.30		
					2	650.50	651.220	
						651.10		
						651.70		
						649.90		
						652.90		
NRA5%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	0.963	1	790.10	789.880	
						794.50		
						791.20		
						786.80		
						786.80		
					2	664.10	663.720	
						667.60		
						664.80		
						661.40		
						660.70		
NRA5%-5.3-5	99.75	66.20	10372.675	0.966	1	751.90	750.400	
						748.40		
						751.90		
						746.10		
						753.70		
					2	606.40	606.420	
						607.20		
						604.50		
						608.70		
						605.30		
NRA5%-5.3-6	99.70	66.20	10367.476	0.965	1	790.60	791.220	
						786.20		
						795.10		
						795.10		
						789.10		
					2	666.30	666.000	
						666.30		
						667.40		
						660.40		
						669.60		
NRA5%-5.8-4	99.85	66.70	10461.496	0.861	1	730.00	722.200	
						722.00		
						729.00		
						715.00		
						715.00		
					2	600.70	599.120	
						597.90		
						600.70		
						603.50		
						592.80		
NRA5%-5.8-5	99.80	66.00	10346.521	0.852	1	759.90	752.380	
						744.00		
						750.60		
						750.40		
						757.00		
					2	580.80	579.580	
						578.00		
						587.30		
						571.00		
						788.20		
NRA5%-5.8-6	99.70	66.00	10336.154	0.851	1	774.10	781.200	
						782.30		
						779.10		
						782.30		
						673.50		
					2	667.90	667.780	
						667.90		
						664.00		
						664.00		
						665.60		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 7% at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)							
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด					
NRA7%-4.8-4	99.85	66.20	10383.074	2.577	1	11753.00	11747.00	12073.133					
						11730.00							
						11730.00							
						11792.00							
						11730.00							
					2	11825.00	11758.60		11815.00				
						11836.00							
						11892.00							
						11425.00							
						11818.00							
NRA7%-4.8-5	99.90	66.30	10403.965	2.582	1	11889.00	11846.40	12073.133					
						11818.00							
						11897.00							
						11810.00							
						11839.00							
					2	11859.00	11851.20		11893.00				
						11849.00							
						11816.00							
						12347.00							
						12563.00							
NRA7%-4.8-6	99.90	66.30	10403.965	2.582	1	12460.00	12459.80	12073.133					
						12469.00							
						12460.00							
						12733.00							
						12756.00							
					2	12782.00	12775.80		12852.00				
						12756.00							
						10957.00			10246.133	1	10935.00	10952.40	
						10984.00							
						10984.00							
10902.00													
10588.00	2	10537.00	10554.00										
10565.00													
10565.00													
10515.00													
10345.00		NRA7%-5.3-5		99.65	66.30	10377.929	2.370	1		10345.00	10417.80		
10345.00													
10345.00													
10655.00													
10399.00	2		10324.00						10348.40				
10345.00													
10368.00													
10322.00													
10383.00			NRA7%-5.3-6					99.70		66.40	10398.797	2.375	1
10208.00													
10184.00													
10176.00													
10184.00	2	10658.00		9023.40									
10608.00													
10608.00													
1608.00													
11635.00		NRA7%-5.8-4			99.70	66.60	10430.119		2.064				1
9308.00													
9368.00													
9316.00													
9330.00	2		9019.00	9040.60									
9029.00													
9062.00													
9041.00													
9052.00			NRA7%-5.8-5					99.80		66.40	10409.227	2.060	1
9510.00													
9535.00													
9591.00													
9550.00	2	9123.00		9155.80									
9191.00													
9123.00													
9159.00													
9115.00		NRA7%-5.8-6			99.70	66.70	10445.780		2.067				1
9424.00													
9404.00													
9404.00													
9494.00	2		9306.00	9322.20									
9326.00													
9321.00													
9329.00													
9329.00													

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 7% at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
NRA7%-4.8-4	99.85	66.20	10383.074	2.062	1	4837.00	4826.20	4882.067	
						4813.00			
						4838.00			
						4806.00			
						4837.00			
					2	4830.00	4831.40		4830.00
						4861.00			
						4823.00			
						4813.00			
						4838.00			
NRA7%-4.8-5	99.90	66.30	10403.965	2.066	1	4892.00	4861.20	4882.067	
						4831.00			
						4876.00			
						4869.00			
						4879.00			
					2	4870.00	4874.80		4879.00
						4872.00			
						4874.00			
						4981.00			
						4969.00			
NRA7%-4.8-6	99.90	66.30	10403.965	2.066	1	4989.00	4957.80	4882.067	
						4929.00			
						4921.00			
						4936.00			
						4904.00			
					2	4933.00	4941.00		4944.00
						4988.00			
						4472.00			
						4421.00			
						4421.00			
NRA7%-5.3-4	99.75	66.50	10419.681	1.903	1	4409.00	4431.80	4409.600	
						4436.00			
						4343.00			
						4385.00			
						4388.00			
					2	4335.00	4358.80		4343.00
						4443.00			
						4477.00			
						4493.00			
						4409.00			
NRA7%-5.3-5	99.65	66.30	10377.929	1.896	1	4435.00	4451.40	4409.600	
						4465.00			
						4433.00			
						4404.00			
						4452.00			
					2	4412.00	4433.20		4448.00
						4409.00			
						4448.00			
						4456.00			
						4417.00			
NRA7%-5.3-6	99.70	66.40	10398.797	1.900	1	4317.00	4435.60	4409.600	
						4364.00			
						4362.00			
						4321.00			
						4370.00			
					2	3726.00	4346.80		3704.00
						3733.00			
						3768.00			
						3733.00			
						3731.00			
NRA7%-5.8-4	99.70	66.60	10430.119	1.651	1	3761.00	3732.80	3748.533	
						3768.00			
						3737.00			
						3768.00			
						3757.00			
					2	3711.00	3753.00		3793.00
						3723.00			
						3757.00			
						3724.00			
						3762.00			
NRA7%-5.8-5	99.80	66.40	10409.227	1.648	1	3724.00	3748.20	3748.533	
						3757.00			
						3724.00			
						3757.00			
						3700.00			
					2	3764.00	3733.40		3737.00
						3764.00			
						3737.00			
						3791.00			
						3797.00			
NRA7%-5.8-6	99.70	66.70	10445.780	1.653	1	3717.00	3761.20	3748.533	
						3723.00			
						3797.00			
						3797.00			
						3732.00			
					2	3764.00	3762.60		3764.00
						3737.00			
						3791.00			
						3797.00			
						3732.00			

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 7% at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
NRA7%-4.8-4	99.85	66.20	10383.074	1.546	1	1948.00	1943.20	1908.333	
						1948.00			
						1946.00			
						1942.00			
						1932.00			
					2	1875.00	1872.80		1875.00
						1870.00			
						1869.00			
						1875.00			
						1875.00			
NRA7%-4.8-5	99.90	66.30	10403.965	1.549	1	1919.00	1913.00	1908.333	
						1916.00			
						1921.00			
						1908.00			
						1901.00			
					2	1865.00	1866.40		1868.00
						1862.00			
						1863.00			
						1874.00			
						2028.00			
NRA7%-4.8-6	99.90	66.30	10403.965	1.549	1	2032.00	2019.80	1908.333	
						2013.00			
						1998.00			
						2028.00			
						1849.00			
					2	1835.00	1834.80		1829.00
						1837.00			
						1824.00			
						1824.00			
						1824.00			
NRA7%-5.3-4	99.75	66.50	10419.681	1.428	1	1951.00	1939.20	1852.833	
						1954.00			
						1946.00			
						1928.00			
						1917.00			
					2	1736.00	1734.00		1736.00
						1734.00			
						1733.00			
						1731.00			
						1731.00			
NRA7%-5.3-5	99.65	66.30	10377.929	1.422	1	1928.00	1925.40	1852.833	
						1921.00			
						1925.00			
						1921.00			
						1932.00			
					2	1786.00	1775.00		1777.00
						1772.00			
						1772.00			
						1768.00			
						1768.00			
NRA7%-5.3-6	99.70	66.40	10398.797	1.425	1	1982.00	1970.20	1738.367	
						1958.00			
						1982.00			
						1958.00			
						1971.00			
					2	1786.00	1773.20		1799.00
						1799.00			
						1780.00			
						1702.00			
						1702.00			
NRA7%-5.8-4	99.70	66.60	10430.119	1.238	1	1951.00	1943.80	1738.367	
						1943.00			
						1957.00			
						1934.00			
						1934.00			
					2	1789.00	1794.40		1794.00
						1799.00			
						1796.00			
						1794.00			
						1794.00			
NRA7%-5.8-5	99.80	66.40	10409.227	1.236	1	1851.00	1846.20	1738.367	
						1851.00			
						1843.00			
						1843.00			
						1843.00			
					2	1537.00	1532.20		1526.00
						1533.00			
						1528.00			
						1537.00			
						1537.00			
NRA7%-5.8-6	99.70	66.70	10445.780	1.240	1	1725.00	1720.40	1738.367	
						1720.00			
						1726.00			
						1712.00			
						1719.00			
					2	1592.00	1593.20		1597.00
						1590.00			
						1596.00			
						1597.00			
						1591.00			

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 7% at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA7%-4.8-4	99.85	66.20	10383.074	1.031	1	893.10	893.140	826.050
						894.00		
						892.40		
						892.10		
						894.10		
					2	773.80	773.200	
						773.20		
						775.00		
						772.30		
						771.70		
NRA7%-4.8-5	99.90	66.30	10403.965	1.033	1	913.50	912.280	
						913.50		
						909.70		
						913.50		
						911.20		
					2	766.70	768.320	
						769.20		
						768.70		
						768.20		
						768.80		
NRA7%-4.8-6	99.90	66.30	10403.965	1.033	1	848.20	845.020	
						848.20		
						844.50		
						843.90		
						840.30		
					2	764.20	764.340	
						764.20		
						762.40		
						764.90		
						766.00		
NRA7%-5.3-4	99.75	66.50	10419.681	0.952	1	836.60	837.000	
						833.70		
						839.20		
						837.50		
						838.00		
					2	706.70	707.780	
						711.30		
						706.70		
						706.70		
						707.50		
NRA7%-5.3-5	99.65	66.30	10377.929	0.948	1	776.50	770.940	
						770.60		
						765.30		
						772.90		
						769.40		
					2	675.30	675.340	
						675.60		
						670.90		
						675.60		
						679.30		
NRA7%-5.3-6	99.70	66.40	10398.797	0.950	1	799.40	795.880	
						791.20		
						791.80		
						799.40		
						797.60		
					2	773.60	765.440	
						764.40		
						765.70		
						759.80		
						763.70		
NRA7%-5.8-4	99.70	66.60	10430.119	0.825	1	795.00	788.500	
						787.10		
						790.70		
						789.90		
						779.80		
					2	711.60	711.760	
						711.60		
						713.20		
						709.20		
						713.20		
NRA7%-5.8-5	99.80	66.40	10409.227	0.824	1	729.80	726.080	
						728.10		
						726.50		
						726.50		
						719.50		
					2	660.00	655.760	
						656.10		
						654.70		
						655.30		
						652.70		
NRA7%-5.8-6	99.70	66.70	10445.780	0.827	1	837.10	838.860	
						840.80		
						843.50		
						835.30		
						837.60		
					2	726.10	728.200	
						728.30		
						733.20		
						728.30		
						725.10		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 9% at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA9%-4.8-4	99.65	65.90	10315.317	2.250	1	11858.00	11799.80	11446.667
						11858.00		
						11567.00		
						11858.00		
						11858.00		
					2	14112.00	13804.40	
						13270.00		
						14515.00		
						13369.00		
						13756.00		
NRA9%-4.8-5	99.90	65.80	10325.504	2.252	1	11542.00	11345.00	
						11202.00		
						12024.00		
						10999.00		
						10958.00		
					2	11061.00	11338.40	
						11306.00		
						11306.00		
						11563.00		
						11456.00		
NRA9%-4.8-6	99.75	66.20	10372.675	2.262	1	10458.00	10623.80	
						10912.00		
						10096.00		
						10953.00		
						10700.00		
					2	9743.00	9768.60	
						9524.00		
						9916.00		
						9953.00		
						9707.00		
NRA9%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	2.078	1	10395.00	10449.00	
						10653.00		
						10653.00		
						10149.00		
						10395.00		
					2	9873.00	9878.00	
						10047.00		
						9873.00		
						9489.00		
						10108.00		
NRA9%-5.3-5	99.70	66.80	10461.441	2.101	1	10462.00	10755.40	
						11005.00		
						10770.00		
						10770.00		
						10770.00		
					2	9972.00	9751.60	
						9392.00		
						9584.00		
						10436.00		
						9374.00		
NRA9%-5.3-6	99.70	66.10	10351.815	2.079	1	9571.00	9516.40	
						9195.00		
						9436.00		
						9590.00		
						9790.00		
					2	9304.00	8930.80	
						8795.00		
						8795.00		
						8982.00		
						8778.00		
NRA9%-5.8-4	99.65	66.90	10471.847	1.805	1	8212.00	6228.00	
						6325.00		
						6037.00		
						6241.00		
						6325.00		
					2	9488.00	9613.40	
						9488.00		
						9697.00		
						9697.00		
						9697.00		
NRA9%-5.8-5	99.60	66.40	10388.367	1.790	1	8030.00	8004.60	
						8011.00		
						7721.00		
						8213.00		
						8048.00		
					2	9426.00	9713.40	
						9701.00		
						9470.00		
						10223.00		
						9747.00		
NRA9%-5.8-6	99.30	67.00	10450.665	1.801	1	8650.00	8402.20	
						8101.00		
						8309.00		
						8466.00		
						8485.00		
					2	7958.00	7991.80	
						8270.00		
						7958.00		
						8139.00		
						7634.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 9% at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
NRA9%-4.8-4	99.65	65.90	10315.317	1.800	1	5218.00	5164.00	4739.500	
						5170.00			
						5068.00			
						5258.00			
						5106.00			
					2	5170.00	5271.40		5367.00
						5226.00			
						5376.00			
						5218.00			
						4899.00			
NRA9%-4.8-5	99.90	65.80	10325.504	1.802	1	4865.00	4887.40	4739.500	
						4857.00			
						4857.00			
						4959.00			
						4857.00			
					2	4775.00	4816.20		4775.00
						4899.00			
						4775.00			
						4397.00			
						4363.00			
NRA9%-4.8-6	99.75	66.20	10372.675	1.810	1	4296.00	4353.80	4739.500	
						4377.00			
						4336.00			
						3942.00			
						3970.00			
					2	3881.00	3944.20		3908.00
						4020.00			
						3869.00			
						3841.00			
						3935.00			
NRA9%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	1.662	1	3958.00	3900.20	4739.500	
						3898.00			
						3677.00			
						3576.00			
						3651.00			
					2	3594.00	3629.80		3651.00
						3858.00			
						3851.00			
						3843.00			
						3801.00			
NRA9%-5.3-5	99.70	66.80	10461.441	1.681	1	3822.00	3835.00	4739.500	
						3801.00			
						3814.00			
						3673.00			
						3836.00			
					2	3752.00	3775.20		3863.00
						3863.00			
						3813.00			
						3820.00			
						3481.00			
NRA9%-5.3-6	99.70	66.10	10351.815	1.663	1	3522.00	3838.80	4739.500	
						3457.00			
						3481.00			
						3445.00			
						3547.00			
					2	3446.00	3477.20		3510.00
						3419.00			
						3411.00			
						3467.00			
						3489.00			
NRA9%-5.8-4	99.65	66.90	10471.847	1.444	1	3452.00	3540.40	4739.500	
						3481.00			
						3445.00			
						3480.00			
						3492.00			
					2	3337.00	3446.40		3337.00
						3344.00			
						3386.00			
						3323.00			
						3456.00			
NRA9%-5.8-5	99.60	66.40	10388.367	1.432	1	3406.00	3470.00	4739.500	
						3421.00			
						3437.00			
						3493.00			
						3348.00			
					2	3302.00	3345.40		3382.00
						3336.00			
						3336.00			
						3362.00			
						3406.00			
NRA9%-5.8-6	99.30	67.00	10450.665	1.441	1	3421.00	3442.60	4739.500	
						3437.00			
						3493.00			
						3348.00			
						3302.00			
					2	3382.00	3346.00		3336.00
						3336.00			
						3362.00			
						3406.00			
						3421.00			

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 9% at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA9%-4.8-4	99.65	65.90	10315.317	1.350	1	2329.00	2313.00	2033.600
						2287.00		
						2334.00		
						2293.00		
						2322.00		
					2	2168.00	2149.00	
						2128.00		
						2163.00		
						2133.00		
						2153.00		
NRA9%-4.8-5	99.90	65.80	10325.504	1.351	1	1983.00	1953.40	
						1966.00		
						1941.00		
						1945.00		
						1932.00		
					2	1791.00	1791.20	
						1799.00		
						1807.00		
						1764.00		
						1795.00		
NRA9%-4.8-6	99.75	66.20	10372.675	1.357	1	2096.00	2067.20	
						2088.00		
						2000.00		
						2078.00		
						2074.00		
					2	1936.00	1927.80	
						1935.00		
						1932.00		
						1918.00		
						1918.00		
NRA9%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	1.247	1	2051.00	2044.60	
						2043.00		
						2054.00		
						2039.00		
						2036.00		
					2	1876.00	1888.60	
						1886.00		
						1902.00		
						1900.00		
						1879.00		
NRA9%-5.3-5	99.70	66.80	10461.441	1.260	1	1956.00	1949.40	
						1952.00		
						1949.00		
						1943.00		
						1947.00		
					2	1837.00	1836.60	
						1847.00		
						1850.00		
						1830.00		
						1819.00		
NRA9%-5.3-6	99.70	66.10	10351.815	1.247	1	2022.00	2014.20	
						2015.00		
						2011.00		
						2012.00		
						2011.00		
					2	1834.00	1827.60	
						1834.00		
						1827.00		
						1823.00		
						1820.00		
NRA9%-5.8-4	99.65	66.90	10471.847	1.083	1	1968.00	1956.60	
						1952.00		
						1947.00		
						1958.00		
						1958.00		
					2	1763.00	1760.60	
						1766.00		
						1757.00		
						1757.00		
						1760.00		
NRA9%-5.8-5	99.60	66.40	10388.367	1.074	1	1815.00	1810.00	
						1821.00		
						1806.00		
						1804.00		
						1804.00		
					2	1748.00	1746.60	
						1752.00		
						1745.00		
						1740.00		
						1748.00		
NRA9%-5.8-6	99.30	67.00	10450.665	1.081	1	1937.00	1933.80	
						1937.00		
						1937.00		
						1929.00		
						1929.00		
					2	1872.00	1869.20	
						1875.00		
						1875.00		
						1865.00		
						1859.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 9% at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA9%-4.8-4	99.65	65.90	10315.317	0.900	1	1172.00	1163.400	896.970
						1166.00		
						1153.00		
						1156.00		
						1170.00		
					2	928.80	923.700	
						911.60		
						931.90		
						920.30		
						925.90		
NRA9%-4.8-5	99.90	65.80	10325.504	0.901	1	899.60	894.000	
						894.30		
						893.90		
						896.60		
						885.60		
					2	797.30	800.380	
						803.70		
						802.10		
						802.10		
						796.70		
NRA9%-4.8-6	99.75	66.20	10372.675	0.905	1	889.60	882.500	
						886.60		
						861.10		
						884.00		
						871.20		
					2	721.50	717.840	
						719.10		
						718.40		
						716.30		
						713.90		
NRA9%-5.3-4	99.80	66.00	10346.521	0.831	1	844.40	840.360	
						838.70		
						842.30		
						839.20		
						837.20		
					2	742.10	743.480	
						743.60		
						749.00		
						742.10		
						740.60		
NRA9%-5.3-5	99.70	66.80	10461.441	0.840	1	910.60	910.540	
						904.30		
						910.30		
						916.60		
						910.90		
					2	884.80	878.300	
						874.70		
						876.90		
						873.20		
						881.90		
NRA9%-5.3-6	99.70	66.10	10351.815	0.831	1	821.60	813.580	
						816.20		
						810.80		
						807.90		
						811.40		
					2	720.50	721.100	
						724.60		
						720.90		
						720.90		
						718.60		
NRA9%-5.8-4	99.65	66.90	10471.847	0.722	1	859.10	854.620	
						853.50		
						856.70		
						847.90		
						855.90		
					2	783.50	780.980	
						781.50		
						779.20		
						779.60		
						781.10		
NRA9%-5.8-5	99.60	66.40	10388.367	0.716	1	744.00	738.320	
						737.00		
						730.60		
						741.60		
						738.40		
					2	712.20	709.880	
						713.80		
						706.40		
						709.00		
						708.00		
NRA9%-5.8-6	99.30	67.00	10450.665	0.720	1	792.30	793.700	
						796.40		
						792.30		
						794.30		
						793.20		
					2	741.00	736.460	
						735.80		
						735.80		
						733.10		
						736.60		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 11% at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA11%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	2.132	1	10953.00	10947.00	10896.467
						10930.00		
						10930.00		
						10992.00		
						10930.00		
					2	10825.00	10838.60	
						10815.00		
						10836.00		
						10892.00		
						10825.00		
NRA11%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	2.127	1	10818.00	10806.40	
						10789.00		
						10818.00		
						10897.00		
						10710.00		
					2	10539.00	10551.20	
						10559.00		
						10593.00		
						10549.00		
						10516.00		
NRA11%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	2.119	1	11447.00	11479.80	
						11563.00		
						11460.00		
						11469.00		
						11460.00		
					2	10733.00	10755.80	
						10756.00		
						10782.00		
						10752.00		
						10756.00		
NRA11%-5.3-4	99.60	66.50	10404.012	1.959	1	9557.00	9552.40	
						9535.00		
						9584.00		
						9584.00		
						9502.00		
					2	9488.00	9454.00	
						9437.00		
						9465.00		
						9465.00		
						9415.00		
NRA11%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	1.954	1	9345.00	9357.80	
						9345.00		
						9345.00		
						9355.00		
						9399.00		
					2	9124.00	9146.20	
						9134.00		
						9168.00		
						9122.00		
						9183.00		
NRA11%-5.3-6	99.70	66.50	10414.458	1.961	1	9352.00	9360.80	
						9308.00		
						9384.00		
						9376.00		
						9384.00		
					2	9258.00	9223.40	
						9208.00		
						9208.00		
						9208.00		
						9235.00		
NRA11%-5.8-4	99.70	66.50	10414.458	1.714	1	7715.00	7727.40	
						7708.00		
						7768.00		
						7716.00		
						7730.00		
					2	7519.00	7540.60	
						7529.00		
						7562.00		
						7541.00		
						7552.00		
NRA11%-5.8-5	99.55	66.60	10414.427	1.714	1	7510.00	7539.20	
						7510.00		
						7535.00		
						7591.00		
						7550.00		
					2	7391.00	7355.80	
						7323.00		
						7359.00		
						7315.00		
						7391.00		
NRA11%-5.8-6	99.80	66.90	10487.610	1.726	1	7583.00	7541.80	
						7524.00		
						7504.00		
						7504.00		
						7594.00		
					2	7406.00	7422.20	
						7426.00		
						7421.00		
						7429.00		
						7429.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 11% at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA11%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	1.706	1	4437.00	4426.20	4461.400
						4413.00		
						4438.00		
						4406.00		
						4437.00		
					2	4330.00	4331.40	
						4330.00		
						4361.00		
						4323.00		
						4313.00		
NRA11%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	1.701	1	4538.00	4561.20	
						4592.00		
						4531.00		
						4576.00		
						4569.00		
					2	4479.00	4450.80	
						4410.00		
						4479.00		
						4472.00		
						4414.00		
NRA11%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	1.695	1	4581.00	4557.80	
						4569.00		
						4589.00		
						4529.00		
						4521.00		
					2	4436.00	4441.00	
						4404.00		
						4433.00		
						4444.00		
						4488.00		
NRA11%-5.3-4	99.60	66.50	10404.012	1.567	1	3572.00	3531.80	
						3521.00		
						3521.00		
						3509.00		
						3536.00		
					2	3443.00	3458.80	
						3485.00		
						3488.00		
						3435.00		
						3443.00		
NRA11%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	1.563	1	3543.00	3551.40	
						3577.00		
						3593.00		
						3509.00		
						3535.00		
					2	3465.00	3433.20	
						3433.00		
						3404.00		
						3452.00		
						3412.00		
NRA11%-5.3-6	99.70	66.50	10414.458	1.569	1	3548.00	3535.60	
						3509.00		
						3548.00		
						3556.00		
						3517.00		
					2	3417.00	3446.80	
						3464.00		
						3462.00		
						3421.00		
						3470.00		
NRA11%-5.8-4	99.70	66.50	10414.458	1.371	1	3326.00	3332.80	
						3304.00		
						3333.00		
						3368.00		
						3333.00		
					2	3231.00	3253.00	
						3261.00		
						3268.00		
						3237.00		
						3268.00		
NRA11%-5.8-5	99.55	66.60	10414.427	1.371	1	3257.00	3248.20	
						3211.00		
						3293.00		
						3223.00		
						3257.00		
					2	3124.00	3133.40	
						3162.00		
						3124.00		
						3157.00		
						3100.00		
NRA11%-5.8-6	99.80	66.90	10487.610	1.380	1	3264.00	3261.20	
						3237.00		
						3291.00		
						3297.00		
						3217.00		
					2	3123.00	3162.60	
						3197.00		
						3197.00		
						3132.00		
						3164.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 11% at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)						
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด				
NRA11%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	1.279	1	2248.00 2248.00 2246.00 2242.00 2232.00	2243.20	2178.333				
					2	2175.00 2175.00 2170.00 2169.00 2175.00			2172.80			
NRA11%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	1.276	1	2219.00 2216.00 2221.00 2208.00 2201.00	2213.00		2178.333			
					2	2165.00 2168.00 2162.00 2163.00 2174.00 2128.00				2166.40		
NRA11%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	1.272	1	2132.00 2113.00 2198.00 2128.00 2149.00	2139.80			2178.333		
					2	2135.00 2129.00 2137.00 2124.00					2134.80	
NRA11%-5.3-4	99.60	66.50	10404.012	1.175	1	2051.00 2054.00 2046.00 2028.00 2017.00	2039.20				2199.500	
					2	2036.00 2036.00 2034.00 2033.00 2031.00 2028.00						2034.00
NRA11%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	1.172	1	2021.00 2025.00 2021.00 2032.00	2025.40					2199.500
					2	1986.00 1977.00 1972.00 1972.00 1968.00						
NRA11%-5.3-6	99.70	66.50	10414.458	1.177	1	2082.00 2058.00 2082.00 2058.00 2071.00	2070.20	2199.500				
					2	1986.00 1999.00 1999.00 1980.00 1902.00						
NRA11%-5.8-4	99.70	66.50	10414.458	1.028	1	2051.00 2043.00 2057.00 2034.00 2034.00	2043.80		1963.033			
					2	1989.00 1994.00 1999.00 1996.00 1904.00						
NRA11%-5.8-5	99.55	66.60	10414.427	1.028	1	1951.00 1961.00 1943.00 1943.00 1943.00	1948.20			1963.033		
					2	1837.00 1826.00 1833.00 1828.00 1837.00						
NRA11%-5.8-6	99.80	66.90	10487.610	1.035	1	2025.00 2020.00 2026.00 2012.00 2019.00	2020.40				1963.033	
					2	1902.00 1997.00 1900.00 1996.00 1991.00						

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 11% at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)						
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด				
NRA11%-4.8-4	99.75	66.30	10388.344	0.853	1	913.10 914.00 912.40 912.10 914.10 903.80	913.140	917.050				
					2	903.20 905.00 902.30 901.70			903.200			
NRA11%-4.8-5	99.80	66.10	10362.198	0.851	1	923.50 923.50 929.70 923.50 921.20	924.280			917.050		
					2	916.70 919.20 918.70 918.20 918.80 928.20			918.320			
NRA11%-4.8-6	99.90	65.80	10325.504	0.848	1	928.20 924.50 933.90 930.30 914.20	929.020				917.050	
					2	914.20 912.40 914.90 916.00			914.340			
NRA11%-5.3-4	99.60	66.50	10404.012	0.784	1	906.60 903.70 909.20 907.50 908.00	907.000					900.730
					2	886.70 881.30 886.70 886.70 887.50			885.780			
NRA11%-5.3-5	99.50	66.40	10377.937	0.782	1	906.50 900.60 905.30 902.90 909.40	904.940					
					2	895.30 895.60 890.90 895.60 899.30			895.340			
NRA11%-5.3-6	99.70	66.50	10414.458	0.784	1	909.40 901.20 901.80 909.40 907.60	905.880	900.730				
					2	903.60 904.40 905.70 909.80 903.70			905.440			
NRA11%-5.8-4	99.70	66.50	10414.458	0.685	1	835.00 837.10 830.70 839.90 839.80	836.500			834.860		
					2	831.60 831.60 833.20 839.20 833.20			833.760			
NRA11%-5.8-5	99.55	66.60	10414.427	0.685	1	849.80 848.10 846.50 846.50 849.50	848.080				834.860	
					2	820.00 826.10 824.70 825.30 822.70			823.760			
NRA11%-5.8-6	99.80	66.90	10487.610	0.690	1	837.10 840.80 843.50 835.30 837.60	838.860					834.860
					2	826.10 828.30 833.20 828.30 825.10			828.200			

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 13% at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA13%-4.8-4	99.70	65.80	10304.832	1.893	1	8442.00	8615.80	9251.100
						8794.00		
						8634.00		
						8614.00		
						8595.00		
					2	9217.00	9159.00	
						9238.00		
						9258.00		
						9041.00		
						9041.00		
NRA13%-4.8-5	99.80	66.30	10393.551	1.909	1	8993.00	8886.00	
						8626.00		
						9013.00		
						8993.00		
						8805.00		
					2	8805.00	8686.20	
						8786.00		
						8607.00		
						8626.00		
						8607.00		
NRA13%-4.8-6	99.75	65.60	10278.663	1.888	1	10058.00	10042.60	
						10103.00		
						10103.00		
						9846.00		
						10103.00		
					2	10327.00	10117.00	
						10327.00		
						10327.00		
						9802.00		
						9802.00		
NRA13%-5.3-4	99.85	66.10	10367.389	1.752	1	9494.00	9183.40	
						9245.00		
						9074.00		
						9052.00		
						9052.00		
					2	8712.00	8744.40	
						8910.00		
						9096.00		
						8502.00		
						8502.00		
NRA13%-5.3-5	99.85	66.50	10430.127	1.763	1	8472.00	8495.00	
						8681.00		
						8331.00		
						8331.00		
						8660.00		
					2	8492.00	8434.60	
						8512.00		
						8311.00		
						8157.00		
						8701.00		
NRA13%-5.3-6	99.85	66.30	10398.758	1.757	1	8841.00	8606.20	
						8085.00		
						8644.00		
						8436.00		
						9025.00		
					2	9046.00	8821.80	
						8257.00		
						9488.00		
						8862.00		
						8456.00		
NRA13%-5.8-4	99.80	66.00	10346.521	1.592	1	7339.00	7371.40	
						7495.00		
						7189.00		
						7319.00		
						7515.00		
					2	6717.00	6664.80	
						6473.00		
						6962.00		
						6699.00		
						6473.00		
NRA13%-5.8-5	99.85	66.70	10461.496	1.609	1	6980.00	6755.80	
						6456.00		
						6699.00		
						6962.00		
						6682.00		
					2	6907.00	7021.60	
						6907.00		
						7378.00		
						6889.00		
						7027.00		
NRA13%-5.8-6	99.60	66.70	10435.303	1.605	1	7189.00	7068.20	
						7208.00		
						7358.00		
						6541.00		
						7045.00		
					2	6907.00	7170.20	
						7189.00		
						7208.00		
						7358.00		
						7189.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 13% at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA13%-4.8-4	99.70	65.80	10304.832	1.514	1	4557.00	4534.60	4337.100
						4548.00		
						4489.00		
						4566.00		
						4513.00		
					2	4278.00	4201.80	
						4157.00		
						4240.00		
						4185.00		
						4149.00		
NRA13%-4.8-5	99.80	66.30	10393.551	1.527	1	4439.00	4447.60	
						4481.00		
						4448.00		
						4481.00		
						4389.00		
					2	4349.00	4356.20	
						4271.00		
						4398.00		
						4422.00		
						4341.00		
NRA13%-4.8-6	99.75	65.60	10278.663	1.510	1	4401.00	4402.80	
						4475.00		
						4344.00		
						4393.00		
						4090.00		
					2	4090.00	4079.60	
						4055.00		
						4090.00		
						4073.00		
						4073.00		
NRA13%-5.3-4	99.85	66.10	10367.389	1.402	1	3426.00	3424.20	
						3426.00		
						3434.00		
						3423.00		
						3412.00		
					2	3332.00	3340.40	
						3341.00		
						3341.00		
						3347.00		
						3341.00		
NRA13%-5.3-5	99.85	66.50	10430.127	1.410	1	3426.00	3433.60	
						3438.00		
						3433.00		
						3438.00		
						3433.00		
					2	3328.00	3325.00	
						3326.00		
						3328.00		
						3318.00		
						3325.00		
NRA13%-5.3-6	99.85	66.30	10398.758	1.406	1	3492.00	3495.80	
						3492.00		
						3497.00		
						3499.00		
						3499.00		
					2	3371.00	3373.40	
						3373.00		
						3377.00		
						3369.00		
						3377.00		
NRA13%-5.8-4	99.80	66.00	10346.521	1.273	1	3547.00	3544.20	
						3571.00		
						3485.00		
						3579.00		
						3539.00		
					2	3087.00	3112.40	
						3153.00		
						3161.00		
						3033.00		
						3128.00		
NRA13%-5.8-5	99.85	66.70	10461.496	1.287	1	3315.00	3260.20	
						3208.00		
						3242.00		
						3260.00		
						3276.00		
					2	2984.00	2975.40	
						3051.00		
						2925.00		
						3020.00		
						2897.00		
NRA13%-5.8-6	99.60	66.70	10435.303	1.284	1	3193.00	3143.00	
						3211.00		
						3142.00		
						3069.00		
						3100.00		
					2	2848.00	2880.40	
						2933.00		
						2876.00		
						2855.00		
						2890.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 13% at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลสสารคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA13%-4.8-4	99.70	65.80	10304.832	1.136	1	2213.00	2215.40	2221.233
						2231.00		
						2225.00		
						2214.00		
						2194.00		
					2	2185.00	2160.60	
						2104.00		
						2167.00		
						2185.00		
						2162.00		
NRA13%-4.8-5	99.80	66.30	10393.551	1.146	1	2316.00	2348.80	
						2304.00		
						2398.00		
						2339.00		
						2387.00		
					2	2205.00	2215.80	
						2210.00		
						2227.00		
						2227.00		
						2210.00		
NRA13%-4.8-6	99.75	65.60	10278.663	1.133	1	2270.00	2252.40	
						2248.00		
						2253.00		
						2221.00		
						2129.00		
					2	2155.00	2134.40	
						2134.00		
						2125.00		
						2129.00		
						2129.00		
NRA13%-5.3-4	99.85	66.10	10367.389	1.051	1	2242.00	2223.00	
						2236.00		
						2218.00		
						2216.00		
						2203.00		
					2	2108.00	2111.60	
						2108.00		
						2108.00		
						2105.00		
						2129.00		
NRA13%-5.3-5	99.85	66.50	10430.127	1.058	1	2146.00	2137.40	
						2122.00		
						2133.00		
						2142.00		
						2144.00		
					2	2070.00	2070.40	
						2062.00		
						2076.00		
						2076.00		
						2068.00		
NRA13%-5.3-6	99.85	66.30	10398.758	1.054	1	2265.00	2262.80	
						2282.00		
						2295.00		
						2203.00		
						2269.00		
					2	2073.00	2073.00	
						2084.00		
						2072.00		
						2068.00		
						2068.00		
NRA13%-5.8-4	99.80	66.00	10346.521	0.955	1	2004.00	2027.00	
						2008.00		
						2008.00		
						2099.00		
						2016.00		
					2	1910.00	1907.80	
						1902.00		
						1906.00		
						1915.00		
						1906.00		
NRA13%-5.8-5	99.85	66.70	10461.496	0.966	1	2192.00	2178.00	
						2199.00		
						2199.00		
						2113.00		
						2187.00		
					2	2014.00	2062.40	
						2099.00		
						2007.00		
						2098.00		
						2094.00		
NRA13%-5.8-6	99.60	66.70	10435.303	0.963	1	2115.00	2113.60	
						2102.00		
						2105.00		
						2125.00		
						2121.00		
					2	1965.00	1952.20	
						1957.00		
						1953.00		
						1945.00		
						1941.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : NRA 13% at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
NRA13%-4.8-4	99.70	65.80	10304.832	0.757	1	1108.00	1105.400	1032.473
						1107.00		
						1112.00		
						1093.00		
						1107.00		
					2	906.70	906.640	
						908.00		
						905.10		
						906.70		
						906.70		
NRA13%-4.8-5	99.80	66.30	10393.551	0.764	1	1031.00	1035.000	
						1033.00		
						1039.00		
						1037.00		
						1035.00		
					2	922.00	919.980	
						922.00		
						922.30		
						911.60		
						922.00		
NRA13%-4.8-6	99.75	65.60	10278.663	0.755	1	1204.00	1199.200	
						1196.90		
						1197.00		
						1201.00		
						1197.10		
					2	1032.50	1028.620	
						1026.40		
						1031.90		
						1029.20		
						1023.10		
NRA13%-5.3-4	99.85	66.10	10367.389	0.701	1	1070.90	1070.940	
						1073.40		
						1070.60		
						1067.80		
						1072.00		
					2	1001.30	992.400	
						989.90		
						989.90		
						991.40		
						989.50		
NRA13%-5.3-5	99.85	66.50	10430.127	0.705	1	1051.50	1046.300	
						1049.00		
						1042.50		
						1041.00		
						1047.50		
					2	1026.20	1022.520	
						1022.50		
						1021.80		
						1024.60		
						1017.50		
NRA13%-5.3-6	99.85	66.30	10398.758	0.703	1	914.60	917.820	
						922.20		
						919.10		
						915.50		
						917.70		
					2	890.70	883.460	
						885.70		
						881.60		
						876.60		
						882.70		
NRA13%-5.8-4	99.80	66.00	10346.521	0.637	1	995.10	981.360	
						986.10		
						983.20		
						974.50		
						967.90		
					2	916.80	909.160	
						905.50		
						908.40		
						908.40		
						906.70		
NRA13%-5.8-5	99.85	66.70	10461.496	0.644	1	987.20	987.240	
						990.50		
						985.00		
						985.00		
						988.50		
					2	891.80	887.960	
						886.20		
						894.10		
						883.80		
						883.90		
NRA13%-5.8-6	99.60	66.70	10435.303	0.642	1	969.60	969.400	
						971.80		
						969.60		
						969.60		
						966.40		
					2	818.40	818.660	
						819.70		
						819.70		
						819.70		
						815.80		

Resilient Modulus Test

Materials Type : PMA at 15 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
PMA-4.8-4	99.75	66.10	10357.006	3.479	1	8631.00	8632.60	8551.633	
						8735.00			
						8758.00			
						8620.00			
						8419.00			
					2	9051.00	8791.20		8724.00
						8679.00			
						8586.00			
						8916.00			
						9110.00			
PMA-4.8-5	99.55	65.90	10304.966	3.462	1	9098.00	9057.20	8551.633	
						8984.00			
						8996.00			
						9098.00			
						8601.00			
					2	8635.00	8628.60		8716.00
						8612.00			
						8579.00			
						7712.00			
						7816.00			
PMA-4.8-6	99.60	66.30	10372.722	3.484	1	7990.00	7902.00	8551.633	
						8080.00			
						7912.00			
						8255.00			
						8438.00			
					2	8361.00	8298.20		8161.00
						8276.00			
						6735.00			
						6735.00			
						6639.00			
PMA-5.3-4	99.90	66.00	10356.889	2.771	1	6670.00	6673.00	8551.633	
						6586.00			
						8158.00			
						8035.00			
						8284.00			
					2	8271.00	8186.40		8184.00
						8663.00			
						8676.00			
						8676.00			
						8806.00			
PMA-5.3-5	99.80	66.20	10377.874	2.777	1	8442.00	8652.60	8551.633	
						9546.00			
						9687.00			
						9365.00			
						9531.00			
					2	9263.00	9478.40		8388.00
						8257.00			
						8044.00			
						7935.00			
						8142.00			
PMA-5.3-6	99.65	66.20	10362.276	2.773	1	8049.00	8153.20	8551.633	
						8108.00			
						7812.00			
						7699.00			
						7800.00			
					2	6176.00	7893.60		6311.00
						6311.00			
						6243.00			
						6243.00			
						6570.00			
PMA-5.8-4	99.80	66.60	10440.581	2.713	1	6804.00	6256.80	8551.633	
						6826.00			
						6443.00			
						6724.00			
						7504.00			
					2	7408.00	6673.40		7408.00
						7397.00			
						7577.00			
						7420.00			
						7704.00			
PMA-5.8-5	99.80	66.20	10377.874	2.697	1	7846.00	7461.20	8551.633	
						7890.00			
						8138.00			
						7808.00			
						6997.00			
					2	6997.00	7877.20		6997.00
						7106.00			
						7008.00			
						6808.00			
						7391.00			
PMA-5.8-6	99.80	67.10	10518.963	2.734	1	7487.00	6983.20	8551.633	
						7286.00			
						7380.00			
						7500.00			
						7500.00			
					2	7418.80	7418.80		7418.80
						7418.80			
						7418.80			
						7418.80			
						7418.80			

Resilient Modulus Test

Materials Type : PMA at 25 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
PMA-4.8-4	99.75	66.10	10357.006	2.783	1	3905.00	3876.80	3774.833	
						3865.00			
						3874.00			
						3870.00			
						3870.00			
					2	3687.00	3699.00		3687.00
						3723.00			
						3691.00			
						3707.00			
						3707.00			
PMA-4.8-5	99.55	65.90	10304.966	2.769	1	4278.00	4267.60	3774.833	
						4278.00			
						4231.00			
						4273.00			
						4278.00			
					2	3738.00	3740.00		3750.00
						3702.00			
						3755.00			
						3755.00			
						3773.00			
PMA-4.8-6	99.60	66.30	10372.722	2.787	1	3773.00	3795.00	3774.833	
						3773.00			
						3845.00			
						3811.00			
						3264.00			
					2	3264.00	3270.60		3285.00
						3264.00			
						3264.00			
						3276.00			
						3276.00			
PMA-5.3-4	99.90	66.00	10356.889	2.217	1	3175.00	3184.40	3610.867	
						3220.00			
						3161.00			
						3205.00			
						3161.00			
					2	3136.00	3112.40		3113.00
						3104.00			
						3132.00			
						3077.00			
						3077.00			
PMA-5.3-5	99.80	66.20	10377.874	2.221	1	4188.00	4175.80	3610.867	
						4114.00			
						4169.00			
						4194.00			
						4214.00			
					2	4138.00	4153.80		4138.00
						4203.00			
						4138.00			
						4163.00			
						4127.00			
PMA-5.3-6	99.65	66.20	10362.276	2.218	1	3586.00	3591.00	3610.867	
						3599.00			
						3618.00			
						3657.00			
						3595.00			
					2	3468.00	3447.80		3495.00
						3455.00			
						3417.00			
						3404.00			
						3404.00			
PMA-5.8-4	99.80	66.60	10440.581	2.171	1	2905.00	2936.20	3055.667	
						2943.00			
						2947.00			
						2960.00			
						2926.00			
					2	2684.00	2693.80		2703.00
						2699.00			
						2688.00			
						2695.00			
						2695.00			
PMA-5.8-5	99.80	66.20	10377.874	2.157	1	3197.00	3189.80	3055.667	
						3186.00			
						3197.00			
						3167.00			
						3202.00			
					2	3084.00	3071.20		3052.00
						3070.00			
						3084.00			
						3066.00			
						3066.00			
PMA-5.8-6	99.80	67.10	10518.963	2.187	1	3354.00	3329.80	3055.667	
						3325.00			
						3320.00			
						3325.00			
						3325.00			
					2	3105.00	3113.20		3128.00
						3128.00			
						3095.00			
						3114.00			
						3124.00			

Resilient Modulus Test

Materials Type : PMA at 35 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)		
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด
PMA-4.8-4	99.75	66.10	10357.006	2.087	1	2329.00	2328.20	2273.600
						2331.00		
						2329.00		
						2323.00		
						2329.00		
					2	2245.00	2242.60	
						2247.00		
						2247.00		
						2237.00		
						2237.00		
PMA-4.8-5	99.55	65.90	10304.966	2.077	1	2332.00	2330.40	
						2336.00		
						2330.00		
						2330.00		
						2324.00		
					2	2258.00	2264.80	
						2264.00		
						2264.00		
						2275.00		
						2263.00		
PMA-4.8-6	99.60	66.30	10372.722	2.091	1	2253.00	2253.80	
						2255.00		
						2259.00		
						2249.00		
						2216.00		
					2	2220.00	2221.80	
						2224.00		
						2222.00		
						2227.00		
						2227.00		
PMA-5.3-4	99.90	66.00	10356.889	1.663	1	2392.00	2386.00	
						2390.00		
						2377.00		
						2387.00		
						2384.00		
					2	2120.00	2118.40	
						2118.00		
						2118.00		
						2118.00		
						2118.00		
PMA-5.3-5	99.80	66.20	10377.874	1.666	1	2124.00	2131.80	
						2139.00		
						2135.00		
						2133.00		
						2128.00		
					2	2094.00	2056.40	
						2007.00		
						2092.00		
						2088.00		
						2001.00		
PMA-5.3-6	99.65	66.20	10362.276	1.664	1	2183.00	2180.00	
						2177.00		
						2183.00		
						2177.00		
						2180.00		
					2	2154.00	2151.60	
						2157.00		
						2152.00		
						2143.00		
						2152.00		
PMA-5.8-4	99.80	66.60	10440.581	1.628	1	2115.00	2113.40	
						2112.00		
						2115.00		
						2110.00		
						2115.00		
					2	2056.00	2052.80	
						2052.00		
						2054.00		
						2050.00		
						2052.00		
PMA-5.8-5	99.80	66.20	10377.874	1.618	1	2180.00	2178.00	
						2178.00		
						2176.00		
						2178.00		
						2178.00		
					2	2117.00	2122.40	
						2122.00		
						2122.00		
						2127.00		
						2124.00		
PMA-5.8-6	99.80	67.10	10518.963	1.640	1	2211.00	2206.20	
						2200.00		
						2208.00		
						2206.00		
						2206.00		
					2	2129.00	2129.80	
						2133.00		
						2128.00		
						2128.00		
						2131.00		

Resilient Modulus Test

Materials Type : PMA at 45 °C, Load Frequency 1 Hz.

Item	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Direction	ค่าโมดูลัสการคืนตัว MR (Mpa)			
						5 รอบสุดท้าย	เฉลี่ยแต่ละทิศทาง	เฉลี่ยทั้งหมด	
PMA-4.8-4	99.75	66.10	10357.006	1.392	1	1151.80	1150.720	1147.857	
						1157.70			
						1151.90			
						1151.90			
						1140.30			
					2	1104.00	1123.500		1104.20
						1106.10			
						1199.00			
						1104.20			
						1162.40			
PMA-4.8-5	99.55	65.90	10304.966	1.385	1	1162.40	1161.540	1147.857	
						1162.40			
						1158.30			
						1164.30			
						1160.30			
					2	1086.20	1088.120		1087.60
						1087.60			
						1089.60			
						1089.60			
						1197.80			
PMA-4.8-6	99.60	66.30	10372.722	1.394	1	1193.90	1187.920	1147.857	
						1184.20			
						1172.50			
						1191.20			
						1178.50			
					2	1175.30	1175.340		1175.00
						1176.60			
						1176.60			
						1171.30			
						1150.40			
PMA-5.3-4	99.90	66.00	10356.889	1.108	1	1145.50	1151.400	1042.463	
						1155.40			
						1157.80			
						1147.90			
						901.60			
					2	905.60	903.880		904.20
						903.00			
						905.00			
						1180.10			
						1167.20			
PMA-5.3-5	99.80	66.20	10377.874	1.111	1	1169.80	1171.840	1042.463	
						1172.30			
						1169.80			
						1012.00			
						1023.00			
					2	1012.00	1015.600		1017.00
						1014.00			
						1088.10			
						1080.90			
						1086.40			
PMA-5.3-6	99.65	66.20	10362.276	1.109	1	1086.90	1085.940	1042.463	
						1087.40			
						927.20			
						926.80			
						924.90			
					2	926.80	926.120		924.90
						924.90			
						1026.10			
						1025.20			
						1024.60			
PMA-5.8-4	99.80	66.60	10440.581	1.085	1	1020.30	1024.860	1005.663	
						1028.10			
						948.20			
						949.20			
						941.00			
					2	938.90	944.280		944.10
						944.10			
						1113.70			
						1117.40			
						1109.20			
PMA-5.8-5	99.80	66.20	10377.874	1.079	1	1106.90	1112.560	1005.663	
						1115.60			
						936.30			
						934.00			
						935.90			
					2	937.90	936.000		935.90
						935.90			
						1079.00			
						1085.00			
						1072.00			
PMA-5.8-6	99.80	67.10	10518.963	1.093	1	1085.00	1078.600	1005.663	
						1072.00			
						1085.00			
						1072.00			
						935.00			
					2	938.60	937.680		940.10
						935.60			
						939.10			
						939.10			
						939.10			

Fatigue Test at 25°C

Load Frequency 1 Hz., Stress level 0.25 MPa, Repeated Haversine Pulse

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Start MR (Mpa)	Last MR (Mpa)	Cycle	Average cycle	
AC 60-70	AC-4.8-7	99.55	66.40	10383.152	2.596	5199.00	2600.00	3328	3407.67	
	AC-4.8-8	99.60	66.30	10372.722	2.593	5251.00	2600.00	3534		
	AC-4.8-9	99.70	66.30	10383.137	2.596	5007.00	2500.00	3361		
	AC 60-70	AC-5.3-7	99.80	66.20	10377.874	2.594	4944.00	2450.00	3769	3687.67
		AC-5.3-8	99.85	66.20	10383.074	2.596	4349.00	2150.00	3500	
		AC-5.3-9	99.70	66.30	10383.137	2.596	4533.00	2250.00	3794	
	AC 60-70	AC-5.8-7	99.75	66.40	10404.012	2.601	4893.00	2400.00	3874	3903.33
		AC-5.8-8	99.80	66.20	10377.874	2.594	4252.00	2100.00	3936	
		AC-5.8-9	99.60	66.80	10450.948	2.613	4759.00	2350.00	3900	
NRA 1%	NRA 1%-4.8-7	99.95	65.90	10346.372	2.587	5952.00	2950.00	3872	3562.00	
	NRA 1%-4.8-8	99.90	66.50	10435.350	2.609	5873.00	2900.00	3456		
	NRA 1%-4.8-9	99.70	66.10	10351.815	2.588	5866.00	2900.00	3358		
	NRA 1%	NRA 1%-5.3-7	99.90	66.00	10356.889	2.589	5722.00	2850.00	3778	3885.33
		NRA 1%-5.3-8	99.50	66.90	10456.084	2.614	5298.00	2600.00	3996	
		NRA 1%-5.3-9	99.80	65.90	10330.845	2.583	5650.00	2800.00	3882	
	NRA 1%	NRA 1%-5.8-7	99.50	66.20	10346.678	2.587	5417.00	2700.00	4060	4229.33
		NRA 1%-5.8-8	99.70	66.20	10367.476	2.592	5030.00	2500.00	4184	
		NRA 1%-5.8-9	99.80	67.00	10503.287	2.626	4887.00	2400.00	4444	
NRA 3%	NRA 3%-4.8-7	99.65	66.40	10393.582	2.598	5585.00	2750.00	4120	4124.67	
	NRA 3%-4.8-8	99.70	66.60	10430.119	2.608	5619.00	2800.00	4334		
	NRA 3%-4.8-9	99.80	66.30	10393.551	2.598	5132.00	2550.00	3920		
	NRA 3%	NRA 3%-5.3-7	99.90	66.10	10372.581	2.593	4829.00	2400.00	4222	4578.00
		NRA 3%-5.3-8	99.60	66.50	10404.012	2.601	5178.00	2550.00	5064	
		NRA 3%-5.3-9	99.50	66.20	10346.678	2.587	4822.00	2400.00	4448	
	NRA 3%	NRA 3%-5.8-7	99.85	66.40	10414.442	2.604	4270.00	2100.00	5040	4756.67
		NRA 3%-5.8-8	99.70	67.10	10508.423	2.627	4785.00	2350.00	4744	
		NRA 3%-5.8-9	99.80	66.60	10440.581	2.610	4670.00	2300.00	4486	

Fatigue Test at 25°C

Load Frequency 1 Hz., Stress level 0.25 MPa, Repeated Haversine Pulse

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Start MR (Mpa)	Last MR (Mpa)	Cycle	Average cycle	
NRA 5%	NRA 5%-4.8-7	99.85	65.50	10273.283	2.568	5367.00	2650.00	4380	4532.67	
	NRA 5%-4.8-8	99.80	66.20	10377.874	2.594	5111.00	2550.00	4752		
	NRA 5%-4.8-9	99.70	65.60	10273.511	2.568	5283.00	2600.00	4466		
	NRA 5%	NRA 5%-5.3-7	99.70	65.90	10320.493	2.580	5164.00	2550.00	5168	5192.00
		NRA 5%-5.3-8	99.80	65.90	10330.845	2.583	4931.00	2450.00	5098	
		NRA 5%-5.3-9	99.80	66.50	10424.904	2.606	5004.00	2500.00	5310	
	NRA 5%	NRA 5%-5.8-7	100.00	66.40	10430.088	2.608	4724.00	2350.00	6268	5963.33
		NRA 5%-5.8-8	99.85	66.80	10477.180	2.619	4375.00	2150.00	5914	
		NRA 5%-5.8-9	99.50	66.50	10393.567	2.598	4376.00	2150.00	5708	
NRA 7%	NRA 7%-4.8-7	99.85	65.90	10336.020	2.584	5010.00	2500.00	5972	6138.67	
	NRA 7%-4.8-8	99.70	66.50	10414.458	2.604	4879.00	2400.00	6336		
	NRA 7%-4.8-9	99.90	66.10	10372.581	2.593	4774.00	2350.00	6108		
	NRA 7%	NRA 7%-5.3-7	99.80	66.50	10424.904	2.606	4540.00	2250.00	7474	7452.00
		NRA 7%-5.3-8	99.60	66.90	10466.593	2.617	4238.00	2100.00	7378	
		NRA 7%-5.3-9	99.80	66.70	10456.257	2.614	4125.00	2050.00	7504	
	NRA 7%	NRA 7%-5.8-7	99.70	66.20	10367.476	2.592	4048.00	2000.00	9022	9109.33
		NRA 7%-5.8-8	99.85	66.30	10398.758	2.600	3897.00	1900.00	9162	
		NRA 7%-5.8-9	99.75	66.80	10466.687	2.617	4257.00	2100.00	9144	
NRA 9%	NRA 9%-4.8-7	99.75	66.30	10388.344	2.597	5546.00	2750.00	8236	8260.00	
	NRA 9%-4.8-8	99.75	65.80	10310.000	2.578	5767.00	2850.00	8408		
	NRA 9%-4.8-9	99.75	66.20	10372.675	2.593	5624.00	2800.00	8136		
	NRA 9%	NRA 9%-5.3-7	99.80	66.30	10393.551	2.598	4750.00	2350.00	9156	9652.00
		NRA 9%-5.3-8	99.70	66.90	10477.102	2.619	4721.00	2350.00	9736	
		NRA 9%-5.3-9	99.70	66.20	10367.476	2.592	4611.00	2300.00	10064	
	NRA 9%	NRA 9%-5.8-7	99.50	67.20	10502.973	2.626	3782.00	1850.00	10333	11145.67
		NRA 9%-5.8-8	99.70	66.60	10430.119	2.608	3607.00	1800.00	11344	
		NRA 9%-5.8-9	99.65	66.90	10471.847	2.618	3399.00	1700.00	11760	

Fatigue Test at 25°C

Load Frequency 1 Hz., Stress level 0.25 MPa, Repeated Haversine Pulse

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Force (kN)	Start MR (Mpa)	Last MR (Mpa)	Cycle	Average cycle	
NRA 11%	NRA 11%-4.8-7	99.95	65.90	10346.372	2.587	4214.00	2100.00	9872	9770.67	
	NRA 11%-4.8-8	99.90	66.50	10435.350	2.609	4444.00	2200.00	9360		
	NRA 11%-4.8-9	99.70	66.10	10351.815	2.588	4086.00	2000.00	10080		
	NRA 11%	NRA 11%-5.3-7	99.90	66.00	10356.889	2.589	3587.00	1750.00	11664	11621.33
		NRA 11%-5.3-8	99.50	66.90	10456.084	2.614	3335.00	1650.00	11496	
		NRA 11%-5.3-9	99.80	65.90	10330.845	2.583	3378.00	1650.00	11704	
	NRA 11%	NRA 11%-5.8-7	99.50	66.20	10346.678	2.587	3217.00	1600.00	14024	13645.33
		NRA 11%-5.8-8	99.70	66.20	10367.476	2.592	3385.00	1650.00	13648	
		NRA 11%-5.8-9	99.80	67.00	10503.287	2.626	3456.00	1700.00	13264	
NRA 13%	NRA 13%-4.8-7	99.75	65.50	10262.994	2.566	4332.00	2150.00	12376	13064.00	
	NRA 13%-4.8-8	99.95	65.90	10346.372	2.587	4353.00	2150.00	13048		
	NRA 13%-4.8-9	99.60	65.60	10263.206	2.566	4277.00	2100.00	13768		
	NRA 13%	NRA 13%-5.3-7	99.90	65.70	10309.812	2.577	3976.00	1950.00	15336	15276.00
		NRA 13%-5.3-8	99.80	66.40	10409.227	2.602	4109.00	2050.00	15236	
		NRA 13%-5.3-9	99.55	66.90	10461.339	2.615	4119.00	2050.00	15256	
	NRA 13%	NRA 13%-5.8-7	99.95	66.10	10377.772	2.594	3636.00	1800.00	17644	17710.67
		NRA 13%-5.8-8	99.85	66.90	10492.864	2.623	3380.00	1650.00	17532	
		NRA 13%-5.8-9	99.65	66.30	10377.929	2.594	3308.00	1650.00	17956	
PMA	PMA-4.8-7	99.60	66.40	10388.367	2.597	4154.00	2050.00	26792	24886.67	
	PMA-4.8-8	99.85	66.20	10383.074	2.596	4206.00	2100.00	22240		
	PMA-4.8-9	99.75	66.20	10372.675	2.593	3997.00	2000.00	25628		
	PMA	PMA-5.3-7	99.55	66.30	10367.515	2.592	3216.00	1600.00	35576	35002.00
		PMA-5.3-8	99.70	66.50	10414.458	2.604	3945.00	1950.00	32340	
		PMA-5.3-9	99.65	66.30	10377.929	2.594	3874.00	1900.00	37090	
	PMA	PMA-5.8-7	99.70	66.30	10383.137	2.596	3585.00	1750.00	42340	43575.33
		PMA-5.8-8	99.75	66.80	10466.687	2.617	4001.00	2000.00	45570	
		PMA-5.8-9	99.85	66.40	10414.442	2.604	3797.00	1850.00	42816	

Dynamic Creep Test (Permanent Deformation) at 50°C

Stress 0.200 MPa , Accumulated Strain = 10,000 Microstrain or dH = 1%

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Max. Force (kN)	Cycle	Average (cycle)		
AC 60-70	AC-4.8-10	99.90	66.20	7838.282	1.568	2748	3238.67		
	AC-4.8-11	99.60	65.90	7791.275	1.558	3608			
	AC-4.8-12	99.65	66.00	7799.100	1.560	3360			
	AC 60-70	AC-5.3-10	99.70	65.90	7806.928	1.562	2596	1773.33	
		AC-5.3-11	99.75	66.30	7814.761	1.563	1540		
		AC-5.3-12	99.95	65.60	7846.130	1.569	1184		
	AC 60-70	AC-5.8-10	99.80	66.30	7822.597	1.565	1696	1440.00	
		AC-5.8-11	99.85	66.20	7830.437	1.566	1264		
		AC-5.8-12	99.80	66.00	7822.597	1.565	1360		
NRA 1%		NRA 1%-4.8-10	99.70	66.00	7806.928	1.562	3344	3425.33	
		NRA 1%-4.8-11	99.80	66.90	7822.597	1.565	3080		
		NRA 1%-4.8-12	99.70	66.10	7806.928	1.562	3852		
		NRA 1%	NRA 1%-5.3-10	99.75	66.10	7814.761	1.563	2592	2269.33
			NRA 1%-5.3-11	99.70	66.40	7806.928	1.562	2296	
			NRA 1%-5.3-12	99.80	66.00	7822.597	1.565	1920	
	NRA 1%	NRA 1%-5.8-10	99.60	66.50	7791.275	1.558	1488	1469.33	
		NRA 1%-5.8-11	99.60	66.70	7791.275	1.558	1174		
		NRA 1%-5.8-12	99.80	66.80	7822.597	1.565	1746		
NRA 3%	NRA 3%-4.8-10	99.75	66.30	7814.761	1.563	4860	4394.67		
	NRA 3%-4.8-11	99.75	65.70	7814.761	1.563	4224			
	NRA 3%-4.8-12	99.75	66.20	7814.761	1.563	4100			
	NRA 3%	NRA 3%-5.3-10	99.90	66.50	7838.282	1.568	3012	2679.33	
		NRA 3%-5.3-11	99.75	66.70	7814.761	1.563	2378		
		NRA 3%-5.3-12	99.70	66.70	7806.928	1.562	2648		
	NRA 3%	NRA 3%-5.8-10	99.90	66.50	7838.282	1.568	1699	1858.33	
		NRA 3%-5.8-11	99.80	67.20	7822.597	1.565	1764		
		NRA 3%-5.8-12	99.80	67.10	7822.597	1.565	2112		

Dynamic Creep Test (Permanent Deformation) at 50°C

Stress 0.200 MPa , Accumulated Strain = 10,000 Microstrain or dH = 1%

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Max. Force (kN)	Cycle	Average (cycle)	
NRA 5%	NRA 5%-4.8-10	99.75	66.20	7814.761	1.563	5420	5281.33	
	NRA 5%-4.8-11	99.80	66.20	7822.597	1.565	5252		
	NRA 5%-4.8-12	99.85	65.80	7830.437	1.566	5172		
	NRA 5%	NRA 5%-5.3-10	99.70	65.40	7806.928	1.562	3140	2886.67
		NRA 5%-5.3-11	99.75	66.10	7814.761	1.563	2624	
		NRA 5%-5.3-12	99.80	65.60	7822.597	1.565	2896	
	NRA 5%	NRA 5%-5.8-10	99.70	66.40	7806.928	1.562	2206	1984.67
		NRA 5%-5.8-11	99.90	66.50	7838.282	1.568	1908	
		NRA 5%-5.8-12	99.70	66.30	7806.928	1.562	1840	
NRA 7%	NRA 7%-4.8-10	99.65	66.10	7799.100	1.560	6322	6348.67	
	NRA 7%-4.8-11	99.70	66.30	7806.928	1.562	6180		
	NRA 7%-4.8-12	99.80	66.30	7822.597	1.565	6544		
	NRA 7%	NRA 7%-5.3-10	99.80	66.20	7822.597	1.565	3592	3602.67
		NRA 7%-5.3-11	99.80	66.40	7822.597	1.565	3296	
		NRA 7%-5.3-12	99.70	66.10	7806.928	1.562	3920	
	NRA 7%	NRA 7%-5.8-10	99.65	66.30	7799.100	1.560	2488	2169.33
		NRA 7%-5.8-11	99.50	66.60	7775.638	1.555	2074	
		NRA 7%-5.8-12	99.70	66.70	7806.928	1.562	1946	
NRA 9%	NRA 9%-4.8-10	99.80	66.10	7822.597	1.565	8472	8672.00	
	NRA 9%-4.8-11	99.80	65.60	7822.597	1.565	8588		
	NRA 9%-4.8-12	99.80	66.10	7822.597	1.565	8956		
	NRA 9%	NRA 9%-5.3-10	99.80	66.50	7822.597	1.565	4464	4509.33
		NRA 9%-5.3-11	99.60	66.40	7791.275	1.558	4776	
		NRA 9%-5.3-12	99.75	66.40	7814.761	1.563	4288	
	NRA 9%	NRA 9%-5.8-10	99.80	66.60	7822.597	1.565	2418	2602.00
		NRA 9%-5.8-11	99.70	66.60	7806.928	1.562	2739	
		NRA 9%-5.8-12	99.75	67.00	7814.761	1.563	2649	

Dynamic Creep Test (Permanent Deformation) at 50°C

Stress 0.200 MPa , Accumulated Strain = 10,000 Microstrain or dH = 1%

Binder Type	% Binder Content	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm ²)	Max. Force (kN)	Cycle	Average (cycle)	
NRA 11%	NRA 11%-4.8-10	99.70	66.00	7806.928	1.562	9444	9525.33	
	NRA 11%-4.8-11	99.80	66.90	7822.597	1.565	9180		
	NRA 11%-4.8-12	99.70	66.10	7806.928	1.562	9952		
	NRA 11%	NRA 11%-5.3-10	99.75	66.10	7814.761	1.563	6592	6936.00
		NRA 11%-5.3-11	99.70	66.40	7806.928	1.562	7296	
		NRA 11%-5.3-12	99.80	66.00	7822.597	1.565	6920	
	NRA 11%	NRA 11%-5.8-10	99.60	66.50	7791.275	1.558	4488	4502.67
		NRA 11%-5.8-11	99.60	66.70	7791.275	1.558	4074	
		NRA 11%-5.8-12	99.80	66.80	7822.597	1.565	4946	
NRA 13%	NRA 13%-4.8-10	99.75	65.40	7814.761	1.563	11320	11581.33	
	NRA 13%-4.8-11	99.90	66.00	7838.282	1.568	11456		
	NRA 13%-4.8-12	99.75	65.90	7814.761	1.563	11968		
	NRA 13%	NRA 13%-5.3-10	99.60	66.40	7791.275	1.558	8848	8557.33
		NRA 13%-5.3-11	99.80	66.20	7822.597	1.565	8100	
		NRA 13%-5.3-12	99.70	66.60	7806.928	1.562	8724	
	NRA 13%	NRA 13%-5.8-10	99.70	66.30	7806.928	1.562	6020	5733.33
		NRA 13%-5.8-11	99.75	66.50	7814.761	1.563	5460	
		NRA 13%-5.8-12	99.70	66.50	7806.928	1.562	5720	
PMA	PMA-4.8-10	99.65	66.10	7799.100	1.560	23082	21933.33	
	PMA-4.8-11	99.70	66.10	7806.928	1.562	20496		
	PMA-4.8-12	99.80	66.20	7822.597	1.565	22222		
	PMA	PMA-5.3-10	99.90	66.00	7838.282	1.568	17584	17802.67
		PMA-5.3-11	99.85	66.10	7830.437	1.566	17872	
		PMA-5.3-12	99.75	66.00	7814.761	1.563	17952	
	PMA	PMA-5.8-10	99.95	66.50	7846.130	1.569	11976	11643.33
		PMA-5.8-11	99.70	66.40	7806.928	1.562	11522	
		PMA-5.8-12	99.50	66.50	7775.638	1.555	11432	



ภาคผนวก ค

วิธีการทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่า Penetration Index (PI)

1 เป้าหมาย และจุดประสงค์

- 1.1 มาตรฐานนี้ จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบหา Penetration Index ของแอสฟัลต์
- 1.2 โดยทั่วไป แอสฟัลต์จะแยกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้
 - 1.2.1 ค่า PI > +1 จะเป็นแอสฟัลต์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (Low temperature susceptibility bitumen) ซึ่งมีสมบัติทาง Elasticity และ Tixotropy มักเรียกเป็น Gel Type หรือ Air-Blown เนื่องจากแอสฟัลต์ที่ได้จาก Air-Blown จะรวมอยู่ในกลุ่มนี้
 - 1.2.2 ค่า PI < -1 จะเป็นแอสฟัลต์ที่มีค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างสูง (High temperature susceptibility bitumen) ซึ่งจะเป็นแอสฟัลต์ที่มี Resin มาก
 - 1.2.3 ค่า PI ที่มีค่าระหว่าง -1 และ +1 จะมีลักษณะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 กลุ่ม ซึ่งส่วนใหญ่แอสฟัลต์ในกลุ่มนี้จะนำไปใช้ในทาง

2 การคำนวณ

- 2.1 การทดลองนี้ให้นำค่า Penetration และค่า Softening point ของวัสดุแอสฟัลต์มาคำนวณ
- 2.2 การคำนวณหาค่า PI โดยใช้สูตร

$$PI = \frac{20U - 300V}{U + 30V}$$

เมื่อ

$$U = (\log 4) \times (T_{RB} - T_p)$$

$$V = \log 800 - \log P_T$$

T_{RB} = อุณหภูมิที่เป็นค่า Softening point มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

T_p = อุณหภูมิที่ทดสอบ Penetration มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

P_T = ค่า Penetration ที่อุณหภูมิ T_p

2.3 ถ้าการทดลอง Penetration ทำที่สภาวะ 25 องศาเซลเซียส และน้ำหนักเข็มกด 100 กรัม ใช้เวลา 5 วินาที ค่า PI ที่ได้จะเป็นไปตามมาตรฐานนี้

3 การรายงานผล

ให้รายงานเป็นค่าที่มีเครื่องหมายบวก หรือลบ โดยรายงานละเอียดถึงทศนิยม 1 ตำแหน่ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

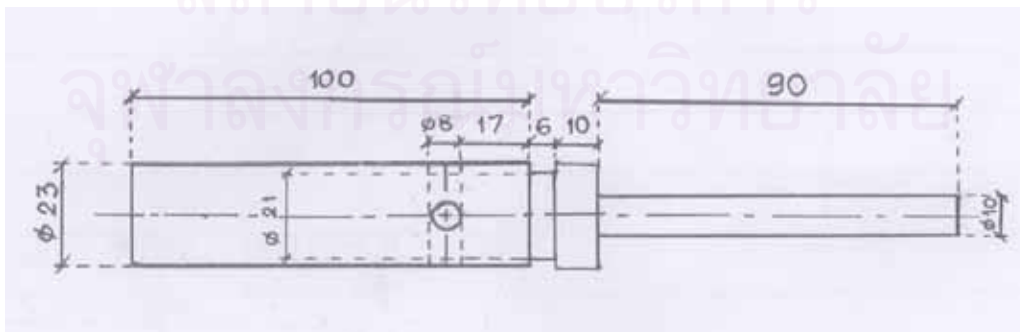
การทดสอบ Elastic Recovery ของวัสดุแอสฟัลต์

1 จุดประสงค์และขอบข่าย

- 1.1 การทดสอบนี้ ใช้ตรวจสอบคุณภาพในความยืดหยุ่น (Elastic) ของวัสดุ PMA โดยเฉพาะการ Modified วัสดุแอสฟัลต์ด้วย Polymer สำหรับใช้งานในการก่อสร้างผิวทาง
- 1.2 ภายใต้สภาวะทางธรณีภูมิอากาศ หรือการจราจรที่เป็นกรณีพิเศษ อาจมีความต้องการที่จะ Modified คุณลักษณะของแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วย Polymer ซึ่งเมื่อเติมลงไป ในแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อ Modified คุณลักษณะต่าง ๆ ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ก็เพื่อปรับปรุงการทำงานของมันภายใต้สภาวะที่เป็นพิเศษนั้น
- 1.3 การเติม Polymer ชนิดหนึ่งในปริมาณหนึ่ง ๆ จะมีผลให้ Modified binder ที่ได้นั้น มาเพิ่มความยืดหยุ่น และความเหนียว ให้เพิ่มขึ้นจากเดิม
- 1.4 วิธีการทดสอบนี้จะใช้ถ้วยทรงกระบอกที่มีขนาดแน่นอน ซึ่งมี Polymer binder บรรจุอยู่เต็มจนถึงระดับที่วัดได้ โดยมีแกนโลหะทรงกระบอกที่ปิดอยู่กึ่งกลางตัวอย่าง จากนั้นนำไปวางลงใน Water bath เพื่อให้ได้อุณหภูมิคงที่ เมื่อปิดแกนโลหะไป 180 องศา จากตำแหน่งเดิม และปล่อยให้ทิ้งไว้ 30 นาที วัดมุมที่หมุนกลับของแกนทรงกระบอกจากปลายเข็มชี้ที่ Scale อ่านค่ามุม

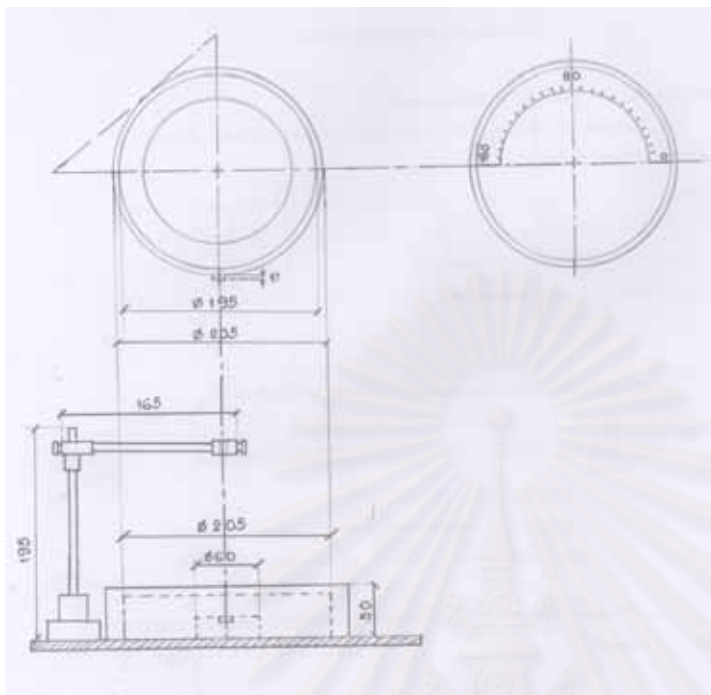
2 เครื่องมือและวัสดุ

- 2.1 แท่งบิด เป็นแท่งโลหะไร้สนิมที่ใช้ในการบิด (แรงบิดตัว ที่ศูนย์กลางของตัวอย่างที่มีขนาดตามรูปที่ ค 1)



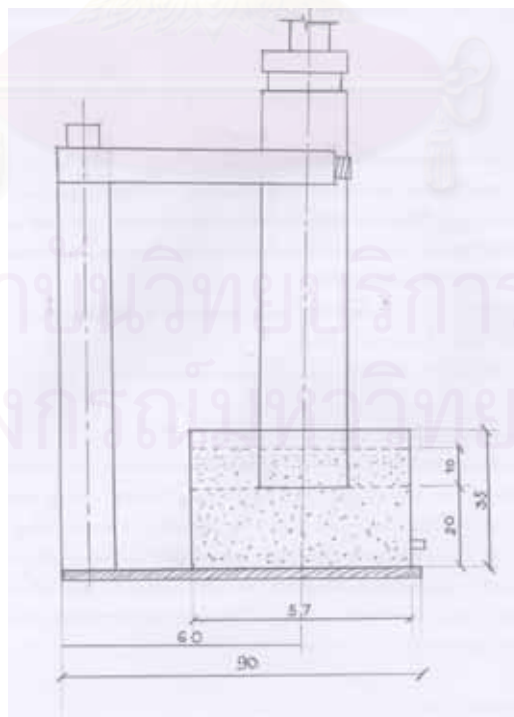
รูปที่ ค 1

- 2.2 อ่างทดสอบ เป็นโลหะไร้สนิม มี Scale รูปครึ่งวงกลมขนาด 180 องศา และมีขีดบอกองศาได้ 0 ถึง 180 องศา มีขนาดตามรูปที่ ค 2



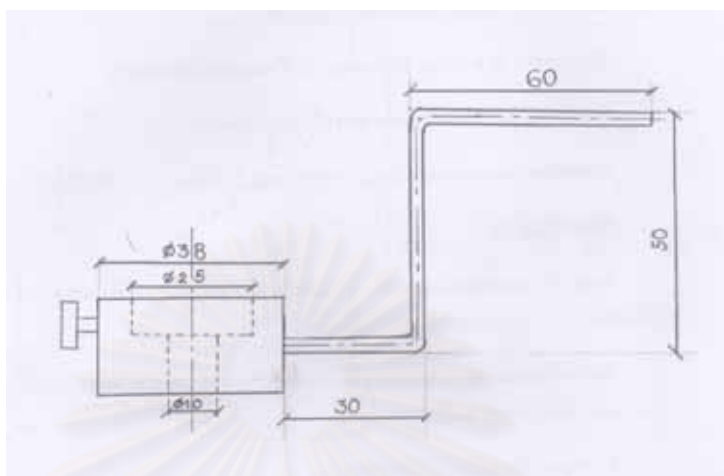
รูปที่ ค 2

- 2.3 ถ้วยใส่ตัวอย่างพร้อมขาตั้งแท่งบิต ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างทดสอบ มีขนาดตามรูปที่ ค 3



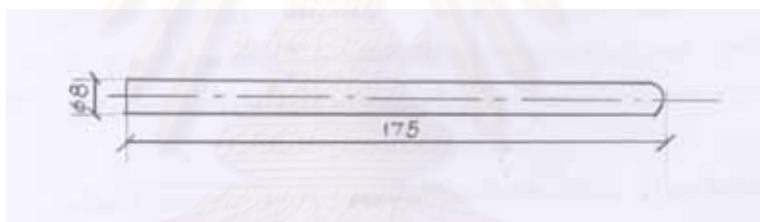
รูปที่ ค 3

- 2.4 เชื้อซีใช้สำหรับการวัดองศาของการคืนตัวกลับของวัสดุ PMA มีขนาดตามรูปที่ ค 4 หรือเป็นเชื้อซีชนิดอื่นที่สามารถวัดองศาได้



รูปที่ ค 4

- 2.5 แขนหมุนมีขนาดตามรูปที่ ค 5 หรือวัสดุอย่างอื่นที่ใช้แทนได้



รูปที่ ค 5

- 2.6 อ่างน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส
 2.7 เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิของอ่างน้ำเป็นไปตาม ASTM E1 ชนิด 17 C
 2.8 นาฬิกาจับเวลา ใช้จับเวลาได้ในช่วง 30 นาที ± 1 วินาที
 2.9 วัสดุทั่วไปใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น Spatula, Oven, Stirrer, Hot Plate และอื่น ๆ

3 การเตรียมเครื่องมือทดลอง

- 3.1 นำถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างวางลงบนฐาน ตั้งแท่งปิด แล้วนำแท่งปิดวางบนฐานตั้งแท่งปิดซึ่งต้องอยู่สูงจากถ้วยตัวอย่างประมาณ 20 มิลลิเมตร และเลื่อนถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างให้ติดขอบของแกนปิด

4 วิธีทดสอบ

- 4.1 ให้ความร้อนกับตัวอย่าง และคนอย่างสม่ำเสมอ หรือจนกระทั่งเหลวพอเทได้ (ปกติไม่เกิน 110 องศาเซลเซียส เหนือจุดที่คาดว่าจะเป็จุด Softening point) ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองต้องเป็นตัวอย่างของผลิตภัณฑ์จริง ๆ และเป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่มีการปะปนของวัสดุอื่น ๆ
- 4.2 เทตัวอย่างตามข้อ 4.1 ลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง จนกระทั่งสูงถึงขีดระดับที่ทำเครื่องหมายไว้หรือจนกระทั่งแท่งบีดจมอยู่ในตัวอย่างประมาณ 10 มิลลิเมตร แล้วเลื่อนถ้วยใส่ตัวอย่างให้อยู่กึ่งกลางของแท่งบีด
- 4.3 ปล่อยตัวอย่างไว้ให้เย็นในอากาศเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นนำไปแช่ใน Water bath ที่มีอุณหภูมิคงที่ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ให้ระดับน้ำสูงกว่าระดับตัวอย่างอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร
- 4.4 เมื่อครบกำหนด 90 นาที ตามข้อ 4.3 แล้ว ให้นำตัวอย่างพร้อมแท่งบีดใส่ลงไปในอ่างทดสอบ และใส่เข็มชี้ลงไปในแท่งบีด ล็อคแท่งบีดให้แน่น ปรับปลายเข็มชี้ไปที่ 180 องศา ล็อคเข็มชี้ให้แน่น เสียบแกนหมุนลงไปในรูของแท่งบีด หมุนแท่งบีดไป 180 องศา ให้ปลายเข็มชี้ไปที่ 0 องศา ภายในช่วงเวลา 3 – 5 วินาที ทันทีที่ถึงมุม 0 องศา ให้เอาแกนหมุนออกทันที และเริ่มจับเวลา หลังจากนั้นปล่อยทิ้งไว้ 30 นาที \pm 15 วินาที ให้อ่านค่ามุมที่เข็มชี้บน Scale ที่หมุนไปจาก 0 ถึง 180 องศา ค่าที่อ่านได้นี้เป็นค่าการคืนตัวกลับของตัวอย่าง (Elastic recuperation) หน่วยเป็นมุมองศา

5 ผลการทดสอบ

รายงานผลที่ได้จากการทดลองนี้ เป็นเปอร์เซ็นต์ขององศาที่หมุนกลับ เมื่อเทียบกับการหมุนไป 180 องศาในตอนแรก

$$R = \frac{100(L)}{180}$$

เมื่อ

R = Elastic recuperation by torsion (การคืนตัวกลับของ Elastic โดยการบีด)

L = Angle of recuperation (มุมของการคืนตัวกลับ)



รูปที่ ค 6 ลักษณะการทดสอบสมบัติ Elastic ของวัสดุเชื่อมประสานด้วยวิธี Torsional Recovery

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบ Toughness และ Tenacity ของวัสดุแอสฟัลต์

1 ขอบข่าย

มาตรฐานนี้ เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติยืดออกได้ (Tensile) ของวัสดุแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย Polymer (Polymer Modified Asphalt : PMA) คุณสมบัตินี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Toughness และ Tenacity ปกติใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคุณภาพของ PMA

2 คำจำกัดความ

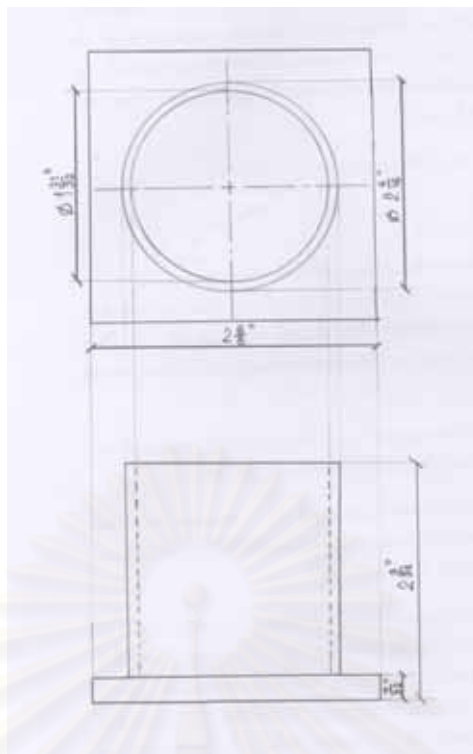
- **Toughness** หมายถึง พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบขาดอย่างสมบูรณ์ ภายใต้แรงเค้น (Stress) และใน Diagram ของแรงกับการยืดตัว (Force and Elongation) ได้แก่ พื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้น Curve ดังรูปที่ ค 11
- **Tenacity** หมายถึง งาน (Work) ที่กระทำจากจุดรับ Load สูงสุดจนกระทั่งตัวอย่างขาด ใน Diagram ระหว่างแรงกับการยืดตัว (Force and Elongation) ได้แก่ พื้นที่ภายใต้เส้น Curve ทางด้านขวาของเส้นสัมผัส (Tangent line) ดังรูปที่ ค 11

3 หลักการ

จุ่มหัวเครื่องลงกลมลงไปในตัวอย่าง และภายใต้สภาวะที่กำหนด ยึดตั้งด้วยความเร็วคงที่จนแยกขาดจากกัน

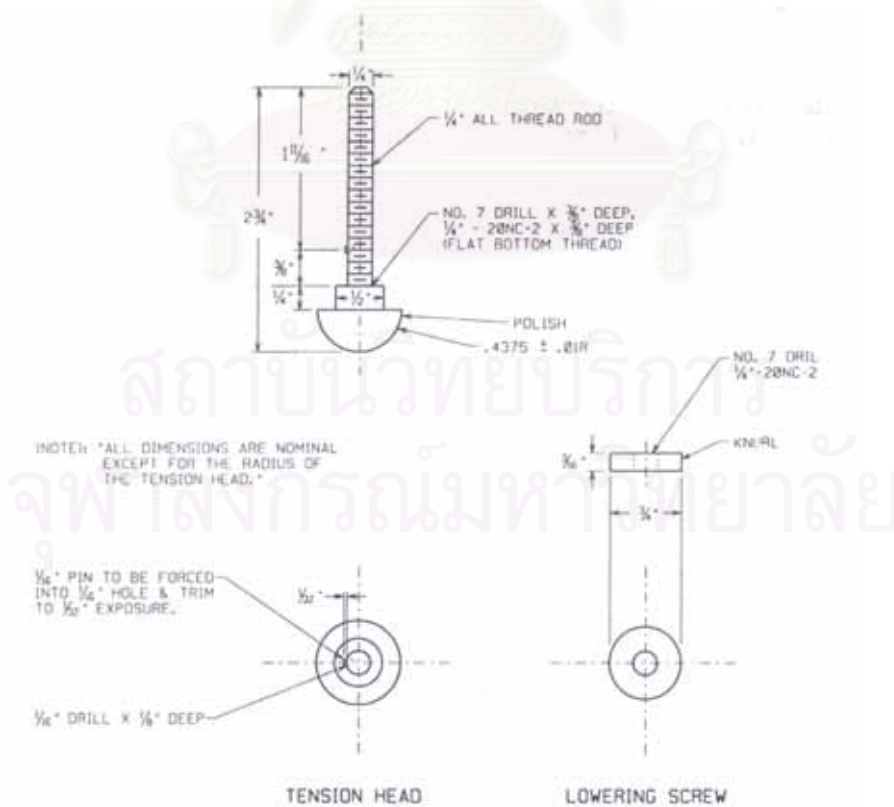
4 เครื่องมือ

- 4.1 เครื่องทดสอบ ต้องสามารถควบคุมความเร็วของการเคลื่อนที่ออกให้คงที่ด้วยความเร็ว 500 ± 5 มิลลิเมตรต่อนาที และเครื่องบันทึกค่า Plot ของ Force กับ Elongation
- 4.2 Mold หล่อแบบชิ้นทดสอบ ประกอบด้วย 4 ชิ้นส่วนได้แก่
 - 4.2.1 ถ้วยใส่ตัวอย่าง (Sample container) มีขนาดตามรูปที่ ค 7



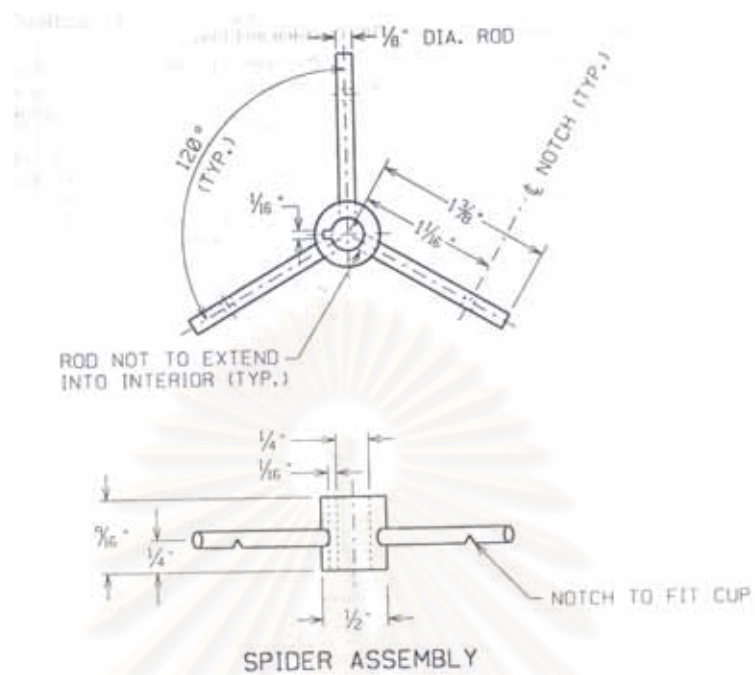
รูปที่ ค 7

4.2.2 หัวดึง (Tension head) และ เกลียวปรับระดับ (Lowering screw) ใช้สำหรับปรับระดับหัวดึงมีขนาดตาม มีขนาดตามรูปที่ ค 8



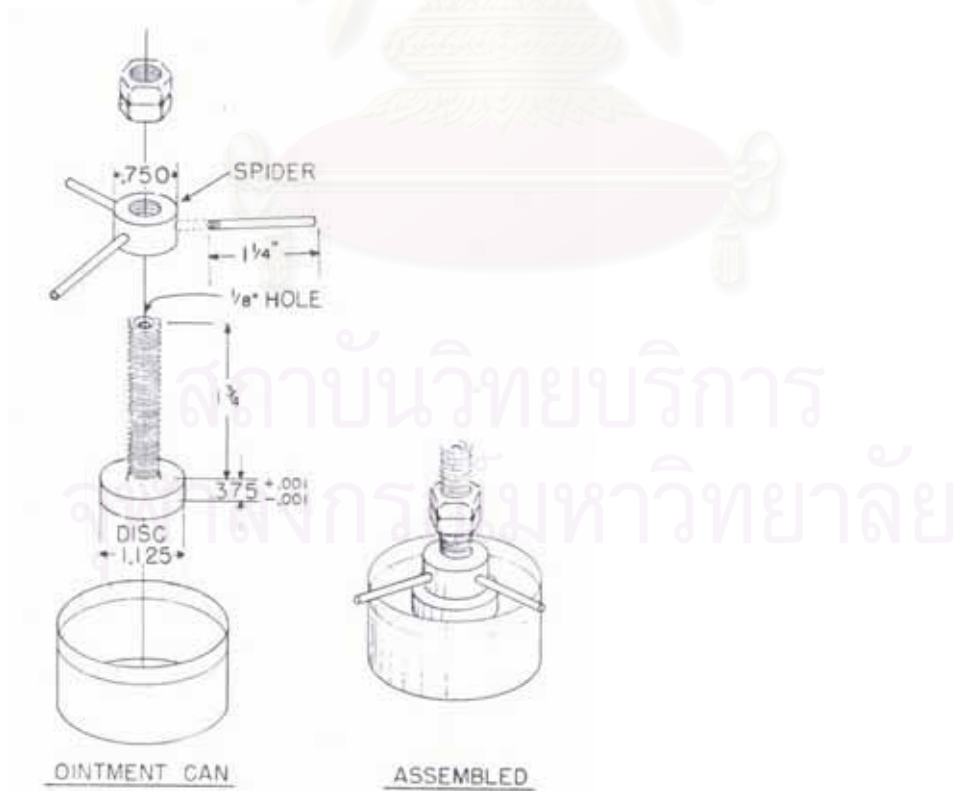
รูปที่ ค 8

4.2.3 ขา (Spider assembly) สำหรับยึดหัวดิ่งมีขนาดตามรูปที่ ค 9



รูปที่ ค 9

4.2.4 นำทุกส่วนมาประกอบรวมกันตามรูปที่ ค 10



รูปที่ ค 10

- 4.3 อ่างน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส
- 4.4 ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ 163 ± 5 องศาเซลเซียส
- 4.5 เทอร์โมมิเตอร์ ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิของอ่างน้ำเป็นไปตาม ASTM E1 ชนิด 17 C
- 4.6 อุปกรณ์ยึดติด Mold ให้ติดกับส่วนของเครื่องทดสอบ

5 การเตรียมเครื่องมือ

นำถ้วยใส่ตัวอย่าง (Sample container), หัวดึง (Tension head), ขา (Spider assembly) และเกลียวปรับระดับ (Lowering screw) ไปอบที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิตัวอย่างนาน 15 นาที

6 วิธีการทดสอบ

- 6.1 ให้ความร้อนกับตัวอย่างโดยการอบ และคนตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ หรือจนกระทั่งเหลวพอเทได้ (ปกติไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส เหนือจุดที่คาดว่าจะเป็จุด Softening point)
- 6.2 เทตัวอย่างตามข้อ 6.1 ประมาณ 50 กรัม ลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง หย่อหัวดึง (Tension head) ลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง โดยให้ระดับตัวอย่างอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของครึ่งวงกลม การปรับระดับหัวดึงทำได้โดยปรับเกลียวปรับระดับ (Lowering screw)
- 6.3 ปลอ่ยตัวอย่างให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องนาน 60 นาที หลังจากนั้น นำตัวอย่างไปแช่ใน Water bath ที่มีอุณหภูมิคงที่ 25 ± 0.1 องศาเซลเซียส นาน 60 นาที
- 6.4 เมื่อครบกำหนด 60 นาที ตามข้อ 6.3 แล้วนำตัวอย่าง (ให้มีน้ำอยู่ในถ้วยทดสอบเพื่อช่วยไม่ให้ความเย็นลดลงจากผิวของตัวอย่างในขณะที่ทำการทดสอบ) ทำการทดสอบ โดยทำการทดสอบอย่างน้อย 2 ตัวอย่าง

7 การคำนวณ

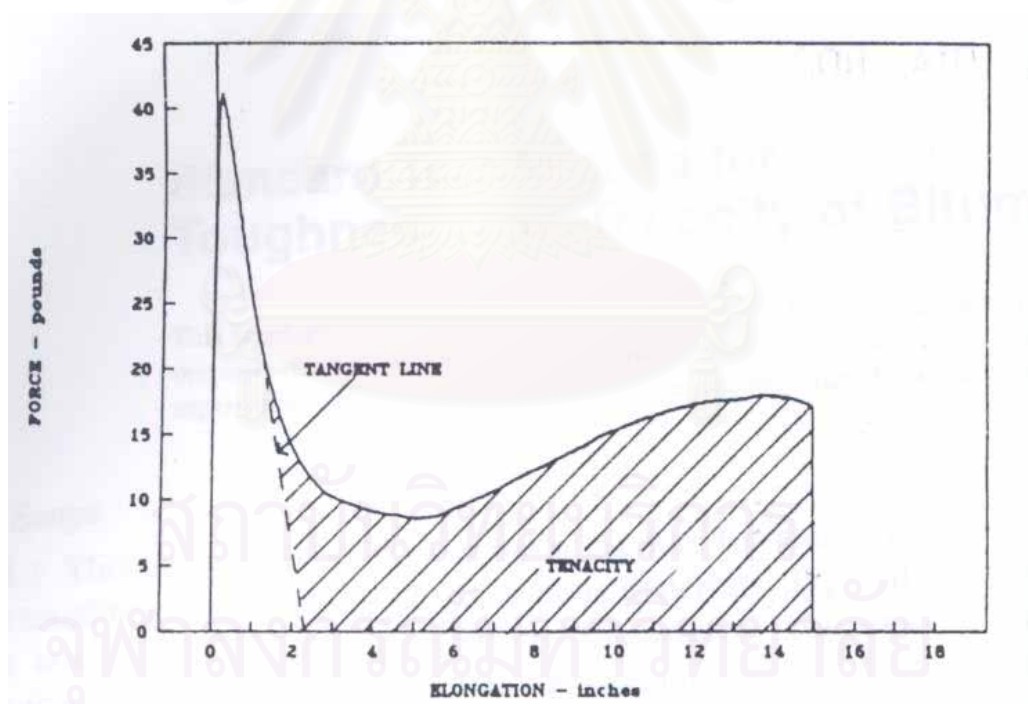
ในการวิเคราะห์ Curve ของเส้นสัมผัส (Tangent line) จะถูกขยายออกไปด้านขวาของ Curve ระหว่าง Force กับ Elongation ในขณะที่ Curve จะลดลงจากค่าสูงสุด โดยตรวจจสอบดังนี้

- วัดค่า Toughness ได้แก่ พื้นที่ทั้งหมดภายใต้ Curve หน่วยเป็น Kg-cm

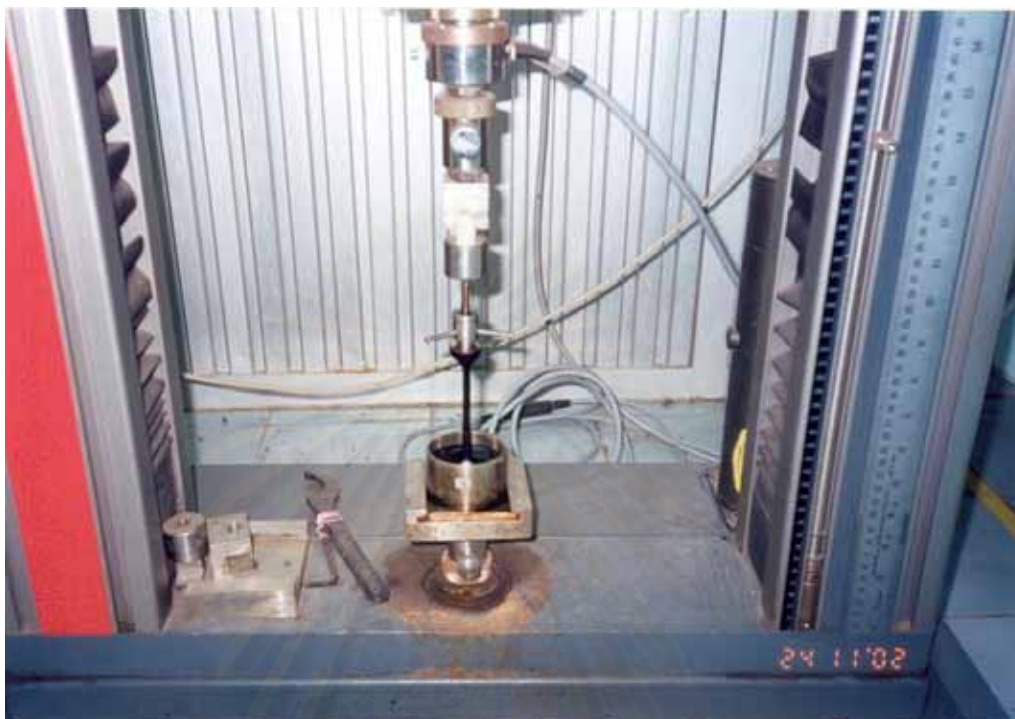
- วัดค่า Tenacity ได้แก่พื้นที่ภายใต้ Curve ทางด้านขวาของเส้นสัมผัส (Tangent line) หน่วย Kg-cm

8 การรายงานผลการทดสอบ

- 8.1 ให้รายงานผลคุณสมบัติขณะทดสอบ ถ้าไม่ได้กำหนดเป็นอย่างอื่น ให้ทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส
- 8.2 ประเภทของการขาด มีดังนี้
 - Cohesive (เป็นการขาดของตัวอย่าง)
 - Adhesive (เป็นการขาดโดยการหลุดออกจาก Tension head)
 - ถ้าการขาดที่นอกเหนือจากนี้ ให้รายงานเพิ่มเติม
- 8.3 ค่า Toughness
- 8.4 ค่า Tenacity



รูปที่ ค 11



รูปที่ ค 12 ลักษณะการทดสอบค่า Toughness and Tenacity ของวัสดุเชื่อมประสาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การตรวจสอบความหนืดของแอสฟัลต์โดยใช้เครื่อง Brookfield Thermosel

1 ขอบข่าย

การทดสอบนี้เป็นวิธีการทดสอบสำหรับการตรวจวัดหา Apparent viscosity ของแอสฟัลต์ในช่วงอุณหภูมิ 38 ถึง 260 องศาเซลเซียส โดยการใช้เครื่อง Brookfield Thermosel Viscometer ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ ค 13

2 คำจำกัดความ

- 2.1 *Apparent viscosity* เป็นอัตราส่วนของ Shear stress ต่อ Shear rate ของของเหลวที่เป็น Newtonian และ Non-Newtonian
- 2.2 *Newtonian liquid* หมายถึง ของเหลวที่ Rate of Shear เป็นสัดส่วนกับ Shearing stress อัตราส่วนที่คงที่ระหว่าง Shearing stress กับ Rate of Shear จะเป็นค่า Viscosity ของของเหลวนี้ ถ้าอัตราส่วนนี้ไม่คงที่ ของเหลวนี้จะเป็น Non-Newtonian ของเหลวหลายชนิดจะมีพฤติกรรมเป็นทั้ง Newtonian และ Non-Newtonian ขึ้นอยู่กับ Shear rate
- 2.3 *Viscosity* คือ อัตราส่วนระหว่าง Shear stress และ Rate of Shear เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของความหนืด ค่าสัมประสิทธิ์นี้เป็นการวัดความต้านทานการไหลของของเหลว โดยทั่วไปเรียกว่าความหนืด หน่วยในระบบ SI ของความหนืดจะเป็น Pascal Second (Pa.s) และ Centipoise (cP) จะมีค่าเท่ากับ 1 milli Pascal Second (mPa.s) ซึ่งใช้เป็นหน่วยของความหนืด

3 วิธีการทดลอง

Brookfield Thermosel Viscosity ตามที่ได้กล่าวในวิธีนี้สามารถใช้ตรวจวัดหาความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิสูง แรงบิด (Torque) บน Spindle ที่กำลังหมุนภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพิเศษ บรรจุตัวอย่างแอสฟัลต์เล็กน้อย จะใช้เป็นการวัดความต้านทานการหมุน (Relative resistance to rotation) และใช้แฟกเตอร์ (A Factor) กับการอ่านค่าแรงบิด (Torque) ที่หน้าปัดเพื่อจะให้ค่าความหนืดของแอสฟัลต์มีหน่วยเป็น milli Pascal Second (mPa.S)

4 ความสำคัญและการใช้

- 4.1 การทดสอบวิธีนี้สามารถใช้ตรวจวัด Apparent viscosity ของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิที่มีการใช้งาน
- 4.2 แอสฟัลต์บางประเภทจะแสดงพฤติกรรมเป็น Non-Newtonian ภายใต้สภาวะของการทดลองนี้หรือในระหว่างการใช้ที่อุณหภูมิภายในช่วงของวิธีนี้ นอกจากนี้ ค่าความหนืดแบบ Non-Newtonian จะไม่มีคุณสมบัติเป็น Unique material แต่จะสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมของของไหล (Fluid) และระบบตรวจวัด จะต้องระมัดระวังว่าการตรวจวัดโดยวิธีนี้อาจจะทำนายพฤติกรรมภายใต้สภาวะของการใช้งาน (Performance)
- 4.3 การเปรียบเทียบค่าความหนืดระหว่าง Non-Newtonian จะทำได้ก็ต่อเมื่อการตรวจวัดนั้นใช้ Viscometer เหมือนกัน ภายใต้สภาวะเดียวกันของ Shearing stress และ Shear history

5 เครื่องมือ

- 5.1 Brookfield Thermosel High Temperature Viscosity Measurement System Using a Standard Brookfield Synchro - Electric Viscometer Model ที่ใช้อาจเป็น LV, RV, HA หรือ HB Series ซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงความหนืด
- 5.2 Spindle สำหรับ Brookfield Thermosel Viscometer
- 5.3 ระบบ Thermosel
- 5.4 ภาชนะที่มีระบบให้ความร้อน (Thermo container) และช่องใส่ตัวอย่าง (Sample และ Probe chamber)
- 5.5 ระบบควบคุม (SCR Controller)
- 5.6 อุปกรณ์เขียนกราฟ

6 วิธีการสำหรับ Brookfield Thermosel

- 6.1 อ่านและทำความเข้าใจ วิธีการใช้ตามคู่มือการใช้ของผู้ผลิตเครื่องก่อนทำการทดลอง
- 6.2 เปิดปุ่ม Thermosel Power
- 6.3 ปรับปุ่มควบคุมอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบ
- 6.4 ปรับเทียบ Controller ตามคู่มือการใช้เครื่อง

- 6.5 รอทิ้งไว้ 90 นาที (รอจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่) โดยมี Spindle ที่ใช้อยู่ในช่องใส่ตัวอย่าง
- 6.6 นำภาชนะบรรจุตัวอย่างออก และเติมตัวอย่างตามจำนวนที่ระบุสำหรับ Spindle ที่ใช้ ให้ระวังเพื่อหลีกเลี่ยงตัวอย่างถูกความร้อนสูงเกินไป และหลีกเลี่ยงการลुकติดไฟของ ตัวอย่างที่จุดวาบไฟต่ำ คำนวณมวลที่ได้จากความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะ โดยจะใช้ตัวอย่างประมาณ 8 – 10 มิลลิลิตร
- 6.7 อย่าเติมตัวอย่างในภาชนะบรรจุตัวอย่างจนล้น ปริมาตรของตัวอย่างมีผลอย่างมาก กับระบบการทดสอบ และควรคนตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 6.8 ระดับของของเหลวควรจะตัดที่แกนใบพัดที่จุดสูงกว่าส่วนบนของจุดตัดประมาณ 3.2 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) หรือปรับตามคู่มือของผู้ผลิต
- 6.9 นำภาชนะใส่ตัวอย่างแล้ว ใส่งไปในระบบให้ความร้อน (Thermo container)
- 6.10 ใส่ Spindle ที่เลือกไว้ลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง และยึดติดเข้ากับ Viscometer การเลือก Spindle ที่เหมาะสมอาจจะต้องใช้ Spindle เกินกว่า 1 อัน
- 6.11 ปลดอยทิ้งให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิคงที่ (ประมาณ 15 นาที)
- 6.12 เมื่ออุณหภูมิคงที่แล้วให้เริ่มการทดสอบ โดยเลือกความเร็วรอบของ Brookfield สำหรับความเร็วรอบของการทดสอบในแต่ละรุ่นมีดังนี้
- Viscometer รุ่น RV, HA, HB ใช้ความเร็วรอบที่ 20 รอบต่อนาที (RPM)
 - Viscometer รุ่น LV ใช้ความเร็วรอบที่ 12 รอบต่อนาที (RPM)
- ถ้าค่าที่อ่านได้จาก Display อยู่ระหว่าง 2 – 98 หน่วย (ค่า % Torque) ให้ดำเนินการดังนี้
- 6.13 บันทึกค่าที่อ่านได้ 3 ค่า เว้นช่วง 60 วินาที ที่แต่ละอุณหภูมิทดสอบ
- 6.14 ทำการทดลองตามวิธีขั้นต้น สำหรับแต่ละอุณหภูมิตดสอบตามที่ต้องการ
- 6.15 ถ้าค่าที่อ่านได้หลายค่าสูงกว่า 98 หน่วย ที่อุณหภูมิต่ำสุด ให้ลดรอบของ Spindle และทำการทดลองต่อ
- 6.16 ถ้าค่าที่อ่านค่าเดียวเกินกว่า 98 หน่วย ให้ใช้ Spindle เบอร์ที่เล็กกว่าและทำการทดลองซ้ำโดยใช้ปริมาตรตัวอย่างตามที่ระบุ
- 6.17 อ่านค่าที่วัดได้เป็นหน่วย Centipoise (cP)
- 6.18 อย่าเปลี่ยนความเร็วรอบในขณะที่ตรวจวัด ซึ่งจะทำให้ Shear rate เปลี่ยน

7 การรายงานผล

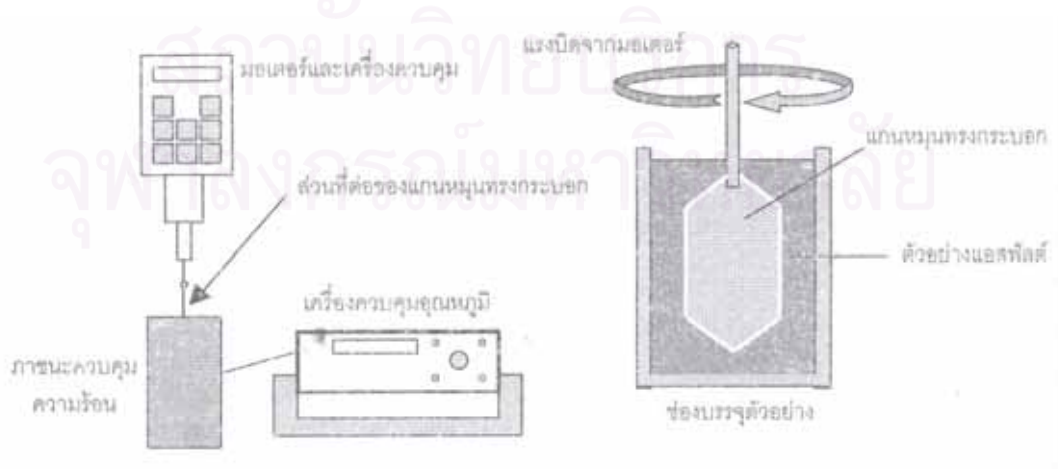
- 7.1 รายงานคุณสมบัติทดสอบ หมายเลข Spindle และความเร็ว (Speed) พร้อมผลการทดลองตัวอย่าง เช่น Viscosity ที่ 60 องศาเซลเซียส = 105 Mpa with Spindle number
- 7.2 เขียนกราฟระหว่างค่า Viscosity กับคุณสมบัติที่ทดสอบจริง สำหรับแต่ละคุณสมบัติทดสอบและลากเส้น Curve

8 ความเที่ยงตรง

- 8.1 เกณฑ์ต่อไปนี้จะใช้สำหรับการตัดสิน การยอมรับของผลการทดสอบใด ๆ (ระดับความเชื่อมั่น 95%)
- 8.1.1 Repeatability ค่า 2 ค่าที่ได้จากผู้ทดลองคนเดียวกัน จะไม่นำมาพิจารณายอมรับ ยกเว้นที่แตกต่างกันไม่เกิน 3.5%
- 8.1.2 Repredicibility ค่าที่รายงานจากห้องปฏิบัติการ 2 แห่ง แต่ละค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 2 ครั้ง จะไม่นำมาพิจารณายอมรับ ยกเว้นที่แตกต่างกันไม่เกิน 14.5%

9 เอกสารอ้างอิง

ASTM D 4402-87 : Standard Test Method for “ Viscosity Determination of Unfilled Asphalt Using the Brookfield Thermosel Apparatus ”



รูปที่ ค 13 ลักษณะการทำงานของเครื่อง Brookfield Thermosel Viscometer

การตรวจสอบเสถียรภาพการเก็บของ Modified Asphalt

1 ขอบข่าย

มาตรฐานนี้ใช้สำหรับ Modified Asphalt ซึ่งเป็นที่รู้จักกัน โดยเฉพาะ Polymer Modified Asphalt หรือวัสดุ PMA บางครั้ง จะแสดงการแยกชั้น (Phase separation) ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดความเสถียร (Stability) ของ Modified Asphalt ที่อุณหภูมิสูง วิธีการทดลองส่วนใหญ่ที่ตรวจสอบเสถียรภาพการเก็บของ Polymer Modified Asphalt จะใช้ภาชนะทรงแคบ และใช้ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจะไม่ได้เคียงกับสถานะที่เป็นจริงในการเก็บที่โรงงาน ในวิธีนี้ภาชนะบรรจุจะมีขนาดที่คล้ายกันกับขนาดของถังเก็บที่โรงงาน นอกจากนี้ การให้ความร้อนจะทำให้ที่ด้านล่างของภาชนะบรรจุ ซึ่งจะทำให้แอสฟัลต์ในถังเก็บมีการเคลื่อนตัวเมื่อร้อน (Convection movement) เช่นเดียวกับเมื่ออยู่ในถังเก็บ

2 หลักการ

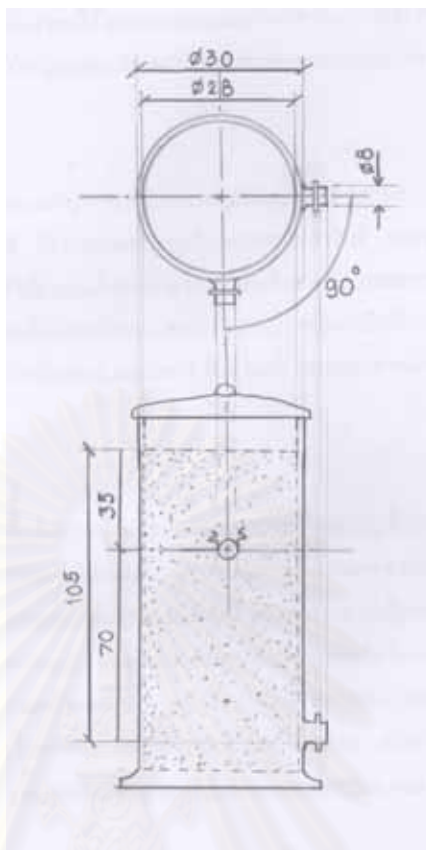
ตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันของ Modified Asphalt Cement จะถูกเก็บไว้ในภาชนะที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 120 ชั่วโมง (5 วัน) หลังจากครบกำหนดตรวจสอบค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของตัวอย่างที่นำออกมาจากส่วนบน และส่วนล่าง

3 เครื่องมือ

3.1 ภาชนะทำด้วยเหล็กไร้สนิม มีลักษณะดังรูปที่ ค 14 และมีขนาดตามรูปที่ ค 15



รูปที่ ค 14



รูปที่ ค 15

- 3.2 เครื่องชั่งที่สามารถอ่านได้ละเอียด ± 0.1 กรัม
- 3.3 ตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 165 ± 2 องศาเซลเซียส
- 3.4 ภาชนะกั้นแบนสำหรับรองรับตัวอย่าง (Porcelain capsule, $\varnothing 8$ cm.)
- 3.5 อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น แท่งแก้ว ถุงมือ เป็นต้น

4 วิธีการ

- 4.1 เตรียมตัวอย่างตาม WQC 027
- 4.2 เทตัวอย่างปริมาณ 180 ± 1 กรัม ใส่ในภาชนะตัวอย่าง หลังจากปิดวาล์วด้านข้างทั้งสอง
- 4.3 นำฝาปิดภาชนะบรรจุทันที และนำไปอบในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 165 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (5 วัน)
- 4.4 หลังจากครบกำหนดแล้ว ให้นำภาชนะบรรจุตัวอย่างออกจากตู้อบ โดยหลีกเลี่ยงการทำให้ตัวอย่างภายในเคลื่อนที่ และนำออกมาวางในแนวตั้ง

- 4.5 เปิดฝาออกแล้ว เปิดวาล์วด้านบนก่อน โดยใช้ภาชนะรองรับตัวอย่างรอง แล้วปล่อยให้ตัวอย่างไหลออกมา 60 ± 1 มิลลิลิตร หลังจากนั้นให้เปิดวาล์วด้านล่าง โดยให้ตัวอย่างไหลออกมาเท่ากันใส่ในภาชนะรองรับอีกอันที่เตรียมไว้ (สำหรับวาล์วด้านล่าง ถ้าเปิดแล้วไม่ไหลสามารถให้ความร้อนอีกเล็กน้อยได้)
- 4.6 นำตัวอย่างในภาชนะรองรับเทลงใน Mold สำหรับทดสอบหาค่า Softening point จากวาล์วด้านบนและด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ ค 16

5 การรายงานผล

บันทึกค่าผลต่างของจุดอ่อนตัว (Softening point) ระหว่างตัวอย่างส่วนบนและส่วนล่าง ค่าความแตกต่างระหว่างค่า Softening point ของส่วนบนและส่วนล่าง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่า Softening point} = \text{ค่า Softening point บน} - \text{ค่า Softening point ล่าง}$$

6 เอกสารอ้างอิง

- 6.1 ESM NE 30/86 “Preparation of Test Sample of Modified Bitumen”
- 6.2 ASTM D 36-86 “Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring and Ball Apparatus)”



รูปที่ ค 16 การทดสอบ Softening point

วิธีการทดสอบการหลุดลอก (Stripping Test) โดยวิธี Plate Test

1 ขอบข่าย

วิธีการทดลองนี้ เป็นการทดลองเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การหลุดลอกระหว่างวัสดุแอสฟัลต์หรือวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) กับวัสดุมวลรวม (Aggregate) ซึ่งได้ปรับปรุงการทดลองของ The Department of Main Roads, New South Wale ประเทศออสเตรเลีย

2 วิธีทำ

2.1 เครื่องมือ

- 2.1.1 ภาตสังกะสี หรือฝากระป๋องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 เซนติเมตร. มีขอบสูงประมาณ 1 เซนติเมตร. จำนวน 2 ภาต
- 2.1.2 เตาดอบ ซึ่งสามารถควบคุมได้ที่ 60 องศาเซลเซียส
- 2.1.3 อ่างน้ำชนิด Thermostatic Water Bath สามารถควบคุมได้ที่ 50 องศาเซลเซียส
- 2.1.4 เทอร์โมมิเตอร์ ขนาด 0 – 110 องศาเซลเซียส จำนวน 2 อัน
- 2.1.5 คีมปากจิ้งจก

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

- 2.2.1 เลือกว่าวัสดุมวลรวม ขนาดประมาณ 12.7 – 25.5 มิลลิเมตร ห้ามทำการร่อน ที่มีผิวหน้าใดหน้าหนึ่งเรียบ และความหนาพอที่คีมจะจับตั้งได้ มา 50 ก้อน
- 2.2.2 ให้ความร้อนแก่วัสดุแอสฟัลต์หรือวัสดุเชื่อมประสาน ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการก่อสร้างแล้วแต่ชนิดของวัสดุ

2.3 การทดลอง

- 2.3.1 เทแอสฟัลต์หรือวัสดุเชื่อมประสานที่ได้เตรียมไว้แล้วตามข้อ 2.2.2 ลงในภาตทั้ง 2 โดยให้แอสฟัลต์หรือวัสดุเชื่อมประสานมีความหนาประมาณ 1 – 2 มม. หรือนำน้ำหนักประมาณภาตละ 25 กรัม แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องปกติ
- 2.3.2 นำวัสดุมวลรวมตามข้อ 2.2.1 ทำการกดด้านที่เรียบลงบนผิวแอสฟัลต์หรือวัสดุเชื่อมประสานเบา ๆ ให้ผิวหน้าจมลงไป ภาตละ 25 ก้อน แล้วเอาเข้าอบในเตาดอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้เวลา 24 ชั่วโมง สำหรับ Cutback asphalt และ Emulsified asphalt ใช้เวลา 48 ชั่วโมง

- 2.3.3 หลังจากอบแล้ว ให้นำลงไปแช่น้ำในอ่างที่ควบคุมอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน แล้วเอาไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 25 – 30 องศาเซลเซียส อีกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2.3.4 จากนั้นนำเอาตาชั่งขึ้นจากน้ำ แล้วตึงเอาวัสดุมวลรวมออก โดยใช้เข็มคืบขึ้นทีละ ก้อนพยายามดึงด้วยแรงที่เท่า ๆ กัน
- 2.3.5 พิจารณาวัสดุมวลรวมที่ดึงออกมา และให้คะแนนแต่ละก้อนดังนี้
- ผิวหน้าของวัสดุมวลรวมก้อนใดที่ไม่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่เลย ให้ 1 คะแนน
 - ผิวหน้าของวัสดุมวลรวมก้อนใดที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่น้อยกว่าครึ่งหน้า ให้ 0.75 คะแนน
 - ผิวหน้าของวัสดุมวลรวมก้อนใดที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่ครึ่งหน้า ให้ 0.5 คะแนน
 - ผิวหน้าของวัสดุมวลรวมก้อนใดที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่มากกว่าครึ่งหน้า ให้ 0.25 คะแนน
 - ผิวหน้าของวัสดุมวลรวมก้อนใดที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่เต็มหน้า ให้ 0 คะแนน

3 การคำนวณ

$$\% \text{การหลุดลอก} = \frac{\text{ผลบวกของคะแนนทั้งหมดตามข้อ 2.3.5}}{\text{จำนวนก้อนวัสดุมวลรวมทั้งหมด}} \times 100\%$$

4 ข้อควรระวัง

ในการเลือกวัสดุมวลรวม จะต้องห้ามทำการร่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นที่จับก้อนวัสดุอยู่เดิม หลุดออก

5 หนังสืออ้างอิง

การทดลองที่ ทล.-ท.605/2518, “วิธีการทดสอบการหลุดลอก (Stripping) โดยวิธี Plate Test”,

กองวิเคราะห์วิจัย กรมทางหลวง



รูปที่ ค 17 ลักษณะการทดสอบ Stripping test ของวัสดุเชื่อมประสาน

วิธีการทดสอบการหลุดลอก (Stripping) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

1 ขอบข่าย

วิธีการทดสอบนี้เป็นการวัดกำลัง (Strength) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Bituminous mixtures) ในลักษณะของ Diametral tensile strength ด้วยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect tensile strength) เมื่อวัสดุได้รับผลกระทบจากปัจจัยของน้ำและความชื้น ซึ่งกำลังของวัสดุที่ได้นี้จะบ่งชี้ถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสานและวัสดุผสมรวมในขณะที่มีสภาพความชื้นอยู่ ทำให้สามารถนำไปใช้วัด Long-term stripping susceptibility ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ นอกจากนี้ยังช่วยประเมินได้ว่าสมควรที่จะใส่สารผสมเพิ่มเพื่อป้องกันการหลุดลอกนี้หรือไม่ เช่น Hydrated lime เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้ทดสอบได้ทั้งก่อนตัวอย่างที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ และก่อนตัวอย่างที่ได้จากการขุดเจาะในสนาม

2 วิธีทำ

2.1 เครื่องมือ

- 2.1.1 Vacuum container ที่มี Manometer หรือ Gauge ใช้สำหรับวัดค่าความดัน
- 2.1.2 เตาอบ ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิได้สูงถึง 250 องศาเซลเซียส
- 2.1.3 เตาอบ ซึ่งสามารถควบคุมได้ที่ 60 องศาเซลเซียส
- 2.1.4 อ่างน้ำชนิด Thermostatic water bath สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 1 และ 60 ± 1 องศาเซลเซียส
- 2.1.5 อ่างทำความเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิที่ -18 ± 3 องศาเซลเซียส (กรณีที่ใช้)
- 2.1.6 แผ่นพลาสติกใสสำหรับห่อก่อนตัวอย่าง
- 2.1.7 ถังพลาสติก และเทปปิดถุง
- 2.1.8 ขวด Cylinder ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 2.1.9 ถาดอลูมิเนียมที่มีพื้นที่ประมาณ 48,400 – 64,500 ตารางมิลลิเมตร และมีความลึกประมาณ 25 มิลลิเมตร
- 2.1.10 เครื่องทดสอบเสถียรภาพของมาร์แชลโดยมีอัตราความเร็วของน้ำหนักรีด 50 มิลลิเมตร / นาที

2.1.11 แท่งกดน้ำหนักร เป็น Steel loading strip ที่มีความกว้าง 12.7 มิลลิเมตร สำหรับก้อนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) และที่มีความกว้าง 19.05 มิลลิเมตร สำหรับก้อนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) โดยความยาวของแท่งกดน้ำหนักจะยาวมากกว่าความหนาของก้อนตัวอย่าง

2.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบ

2.2.1 โดยทั่วไป สำหรับส่วนผสมที่มีขนาดมวลรวมโตสุดเล็กกว่า 25 มิลลิเมตร จะใช้ก้อนตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร และสูง 63.5 มิลลิเมตร

2.2.2 หลังจากทำการผสมส่วนผสมโดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้ว (Optimum binder content) จะนำส่วนผสมนี้มาแผ่ลงบนภาดอลูมิเนียมโดยให้มีความหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2 ± 0.5 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมงเพื่อทำการบ่มตัวอย่าง ซึ่งจะเรียกว่า Loose mixture

2.2.3 หลังจากทำการบ่มตัวอย่างแล้ว จะนำเข้าเตาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิสำหรับการบดอัด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ทำการบดอัดก้อนตัวอย่าง ไม่ว่าจะเป็วิธี Marshall, Hveem หรือ Gyratory compactor ก็ตาม ให้ได้ปริมาณช่องว่างของอากาศเท่ากับ 7 ± 1.0 %

2.2.4 หลังจากดันก้อนตัวอย่างออกมาแล้ว ให้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 – 96 ชั่วโมง

3 การทดสอบ

หลังจากเตรียมตัวอย่างได้แล้วตามวิธีการข้างต้น ทำการหาค่า Theoretical maximum specific gravity และค่า Bulk specific gravity ทำการวัดบันทึกความกว้างเฉลี่ย และความสูงเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง หลังจากนั้นแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม ๆ ละ 3 ก้อน โดยทุกก้อนจะต้องมีค่า Theoretical maximum specific gravity และค่า bulk specific gravity ที่เท่า ๆ กัน และปริมาณช่องว่างอากาศของก้อนตัวอย่างจะต้องอยู่ในช่วง 7 ± 1.0 % โดย 2 กลุ่มนี้ประกอบไปด้วย

3.1 กลุ่ม Unconditioned

3.1.1 ทำการห่อก้อนตัวอย่างด้วยพลาสติกใส และใส่ถุงพลาสติกอีกที่ทำการปิดผนึกปากถุงให้แน่นด้วยเทป ทั้ง 3 ก้อนตัวอย่าง แล้วนำลงแช่อ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาทดสอบกำลังโดยวิธี Indirect tensile ด้วยเครื่องมาร์แชลล์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนกระทั่งก้อนตัวอย่างพังทลายเสียหาย บันทึกค่าแรงกดสูงสุดที่ได้ ซึ่งระยะเวลาตั้งแต่เริ่มนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำจนกระทั่งทดสอบแล้วเสร็จต้องใช้เวลาไม่เกิน 30 วินาที

3.2 กลุ่ม Conditioned

- 3.2.1 นำก้อนตัวอย่างใส่ใน Vacuum container ที่มีน้ำกลั่นท่วมก้อนตัวอย่างทั้ง 3 ก้อนอย่างน้อย 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ทำการ Vacuum ก้อนตัวอย่างด้วยความดัน 13 – 67 kPa (10 – 26 in Hg) เป็นเวลาสั้น ๆ ประมาณ 5 – 10 นาที หลังจากนั้นค่อย ๆ คลายความดันออกและทิ้งตัวอย่างในน้ำนานประมาณ 5 – 10 นาที เช่นกัน เพื่อเป็นตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ
- 3.2.2 ทำการหาค่า Bulk specific gravity แล้วทำการเปรียบเทียบค่า Saturated Surface Dry (SSD) ที่ได้ระหว่างก่อนและหลังการ Vacuum เพื่อคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ (Absorb water)
- 3.2.3 ทำการคำนวณหาค่าองศาการอิ่มตัว (Degree of Saturation) ของก้อนตัวอย่าง ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการดูดซึมน้ำต่อปริมาณช่องว่างของอากาศ ซึ่งค่าที่ได้ควรจะอยู่ในช่วง 55 – 80 % ถ้าค่าน้อยกว่า 55% ให้ทำการ Vacuum ใหม่ซ้ำโดยอาจจะใช้เวลานานขึ้นจนกว่าจะได้ค่าที่อยู่ในช่วง แต่ถ้าค่ามากกว่า 80% ให้ทิ้งก้อนตัวอย่างนั้นไปเพราะถือว่าเสียหาย ให้เริ่มต้นทำใหม่ โดยอาจจะทำการ Vacuum หรือใช้เวลาให้น้อยลง
- 3.2.4 (ในกรณีที่จำเป็นจะจำลองก้อนตัวอย่างให้มีสภาพแช่แข็ง ซึ่งอาจไม่ต้องทำขั้นตอนนี้ได้ ในกรณีที่ผิวทางอยู่ในประเทศเขตร้อน สามารถข้ามไปทำขั้นตอนถัดไปได้เลย) ห่อก้อนตัวอย่างที่มีองศาการอิ่มตัวอยู่ในช่วงที่ต้องการด้วยแผ่นพลาสติกใส และใส่ถุงพลาสติกปิดผนึกอีกที หลังจากนั้นนำลงแช่แช่แข็งที่ควบคุมอุณหภูมิที่ -18 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง
- 3.2.5 หลังจากนั้น แกะพลาสติกออกจากก้อนตัวอย่าง แล้วนำก้อนตัวอย่างลงอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 1 ชั่วโมง

3.2.6 เมื่อได้เวลาครบแล้วนำก้อนตัวอย่างลงแช่น้ำในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ± 1 ชั่วโมง ซึ่งบางที่อาจใส่ น้ำแข็งลงไปใอ่างน้ำช่วยด้วย เนื่องจากการนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำที่ 60 องศาเซลเซียส แล้วลงน้ำที่ 25 องศาเซลเซียสทันทีนั้น จะทำให้น้ำอุ่นขึ้นอุณหภูมิเปลี่ยนไป ดังนั้นต้องรีบทำให้อุณหภูมิของน้ำกลับมาที่ 25 องศาเซลเซียสดังเดิมภายในเวลาไม่เกิน 15 นาที

3.2.7 เมื่อเวลาครบ 2 ± 1 ชั่วโมงแล้ว ให้รีบนำขึ้นมาเช็ดด้วยผ้าขนหนู แล้วนำมาทดสอบกำลังโดยวิธี Indirect tensile ด้วยเครื่องมาร์แชลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จนกระทั่งก้อนตัวอย่างพังทลายเสียหาย บันทึกค่าแรงกดสูงสุดที่ได้ ซึ่งระยะเวลาตั้งแต่เริ่มนำก้อนตัวอย่างขึ้นมาจากน้ำจนกระทั่งทดสอบแล้วเสร็จ ต้องใช้เวลาไม่เกิน 30 วินาที

4 การคำนวณ

$$S_t = \frac{2P}{\pi Dt}$$

เมื่อ

S_t	=	กำลังรับแรงดึง หน่วย Pa
P	=	แรงกดสูงสุด หน่วย นิวตัน
D	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง หน่วย มิลลิเมตร
t	=	ความสูงเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง หน่วย มิลลิเมตร.

หลังจากได้กำลังรับแรงดึงของทั้ง 2 กลุ่มแล้วจะนำมาคำนวณหาค่า % Retain tensile strength หรือค่า Tensile Strength Ratio (TSR)

$$\text{Tensile Strength Ratio (TSR)} = \frac{S_{t, \text{conditioned}}}{S_{t, \text{unconditioned}}} \times 100\%$$

เมื่อ

$S_{t, \text{conditioned}}$	=	ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของกลุ่ม conditioned
$S_{t, \text{unconditioned}}$	=	ค่ากำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของกลุ่ม unconditioned

5 การวิเคราะห์

ค่า TSR ของส่วนผสมที่ได้จะต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 80

6 หนังสืออ้างอิง

American Association of State Highway and Transportation Official. "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage" AASHTO T283.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนราชัย ตันติวรวิทย์ เกิดวันที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมขนส่ง ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมขนส่งและจราจร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย