

สมบัติของวัสดุผิวทางระบายน้ำเพื่อใช้ในประเทศไทย



นายเอกพล อัครภาณีชัยกร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4460-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF DRAINAGED ASPHALT CONCRETE
FOR APPLICATIONS IN THAILAND



Mr. Ekapon Akarapanitkorn

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 974-17-4460-9

เอกพล อัครภาณิชย์กร : สมบัติของวัสดุผิวทางระบายน้ำเพื่อใช้ในประเทศไทย

(PROPERTIES OF DRAINAGED ASPHALT CONCRETE FOR APPLICATIONS

IN THAILAND) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ชยฉัตร

พรหมศร, 168 หน้า. ISBN 974-17-4460-9.

การออกแบบถนนโดยทั่วไปในประเทศไทยจะออกแบบผิวทางให้มีความหนาแน่นสูง โดยคำนึงถึงความแข็งแรงต่อการรับน้ำหนักเป็นสำคัญแต่ระบายน้ำออกจากผิวทางได้ช้า เมื่อเกิดฝนตกจะทำให้มีน้ำขังอยู่บนผิวทาง ส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างผิวทางกับล้อรถลดลง ทำให้มีละอองน้ำกระเด็นขึ้นมาเมื่อมียานพาหนะแล่นผ่าน และทำให้เกิดแสงสะท้อนจากผิวทางที่เปียกซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่าย ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตรมสูมมีฝนตกเกือบตลอดปี จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้ผิวทางที่มีความสามารถระบายน้ำได้

ในงานศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำ และเปรียบเทียบคุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำที่ใช้หินปูนกับตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม รวมทั้งหาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย โดยในการศึกษานี้แบ่งการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวม 2) การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวมกับที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม 3) การหาความหนาที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำสำหรับบุทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

จากผลการศึกษาพบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีความสามารถในการระบายน้ำลงสู่ด้านล่างของผิวทางได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง มีแรงเสียดทานระหว่างผิวทางกับล้อยานพาหนะมากกว่าทั้งในสภาพแห้งและเปียก รวมทั้งลดการกระเด็นของน้ำและแสงสะท้อนจากผิวทางที่เปียก โดยแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวมจะมีความสามารถในการรองรับปริมาณการจราจรมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวมเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของแอสฟัลต์ซีเมนต์กับต้นทุนของวัสดุนั้น แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับโพลีเมอร์ (SBS 40% ผสมในเรซิน) 12% โดยน้ำหนัก ซึ่งคิดเป็นปริมาณ SBS 4.8% โดยน้ำหนัก

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

4470672721 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: DRAINAGED ASPHALT PAVEMENT / DENSE GRADE ASPHALT PAVEMENT / ASPHALT CEMENT / POLYMER MODIFIED ASPHALT / DRAINAGED ASPHALT CONCRETE / DENSE GRADE ASPHALT CONCRETE

EKAPON AKARAPANITKORN : PROPERTIES OF DRAINAGED ASPHALT CONCRETE FOR APPLICATIONS IN THAILAND. THESIS ADVISOR : PROF. DIREK LAVANSIRI, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : CHAYATAN PHROMSORN, Ph.D., 168 pp.
ISBN 974-17-4460-9.

In Thailand, general approach to the design of asphalt pavement is to emphasize on high weight bearing capacity employing dense aggregate grading. However, as Thailand's climate is influenced by monsoon, heavy rainfall is experienced most of the year, and as this method of design gives an impermeable pavement surface most of the time after a heavy rain, there is an excess rainwater left over the pavement surface due to insufficient time for it to drain-off sideways. This resulted in lowering of skid resistance of the road surface, spraying of water from fast-moving heavy vehicles, and reflection at night. All of which are the factors contributed to road accident. Drained asphalt pavement employing gap aggregate grading is considered to be able to improve all these malices exhibited by the afore-mentioned design

The purpose of this research is to study properties of drained asphalt concrete in comparison with those using limestone and slag as aggregate. The research also aims at identifying suitability of its application in Thailand. Testings of asphalt concrete in this research is divided into 3 sections: 1) Test of basic properties of drained asphalt concrete in comparison with dense grade asphalt concrete ; 2) Comparison of properties of drained asphalt concrete using limestone and slag as aggregate; and 3) Identify appropriate thickness of drained asphalt concrete to be laid as wearing course on top of the dense grade asphalt concrete.

From the results, the drained asphalt concrete has a better capability to drain excess water from the pavement surface than that of dense grade asphalt concrete. It also improved the skid resistance between tyres and the surface of the pavement, eliminated spraying and reflection. Mixes employed slag gave higher bearing capacity than that using limestone. When compared the working performance of the pavement to the cost of the binder, It was found that the most suitable binder is the mixture containing asphalt cement and 12% polymer (40% Styrene Butadiene Styrene, SBS, in resin) by weigh which is an equivalent of 4.8% SBS by 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 ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ชยธันว์ พรหมศร ซึ่งเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และคอยเอาใจใส่ดูแลช่วยเหลือ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อนุศักดิ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา ซึ่งเป็นประธานกรรมการ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษา และข้อแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลงด้วยดี

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

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ Taiyu Kensetsu Company Limited โดยเฉพาะ Mr. Hiromitsu Nakanishi ที่ให้คำปรึกษา เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการสนับสนุนวัสดุโพลีเมอร์ เพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณพรชัย ศิลารมย์ และคุณณรงค์ชัย นุ่มกรรณ 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.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 วิธีดำเนินการศึกษา.....	4
บทที่ 2 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการในการศึกษา.....	46
3.1 วิธีการดำเนินการศึกษา.....	47
3.2 การเตรียมวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมโพลีเมอร์.....	53
3.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	55
3.4 การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม.....	57
3.5 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม.....	57
3.6 การเตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต.....	60
3.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต.....	65
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการศึกษา.....	72
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	72
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม.....	83
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	98
5.1 บทสรุป.....	98
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	100
รายการอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน.....	106
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	121
ภาคผนวก ค วิธีการทดสอบ.....	147
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	168



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ส่วนผสมของผิวทางระบายน้ำตาม The Belgian Specification.....	7
2.2	ส่วนผสมของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ.....	8
2.3	ขนาดคละของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ.....	8
2.4	คุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา.....	9
2.5	คุณสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงโดยการเติมโพลีเมอร์.....	9
2.6	คุณสมบัติที่ได้รับการปรับปรุงจากการใช้โพลีเมอร์.....	10
2.7	ขนาดคละของวัสดุผสมแทรก.....	33
2.8	เกณฑ์การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	42
3.1	วิธีการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานตามมาตรฐาน มอก.851-2542 และมาตรฐาน ทล.-ก. 408/2536.....	56
3.2	การตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมหยาบ.....	57
3.3	การตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด.....	57
3.4	ขนาดคละของวัสดุมวลรวมสำหรับชั้นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532.....	58
3.5	ขนาดคละของวัสดุมวลรวมสำหรับชั้นผิวทางระบายน้ำตามข้อกำหนดของญี่ปุ่น.....	59
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน.....	72
4.2	ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึ่มของวัสดุมวลรวม.....	83
4.3	ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม.....	84
4.4	ค่า Splitting strength ratio จากการทดสอบการหลุดลอกด้วยวิธี Splitting test.....	94

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness ของแอสฟัลต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่คาดหวังจะได้รับจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลีเมอร์.....	14
2.2 ความแตกต่างในคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	17
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Accumulated permanent axial strain กับจำนวนรอบที่น้ำหนักมากระทำ.....	19
2.4 องค์ประกอบโครงสร้างของวัสดุแอสฟัลต์.....	23
2.5 การยุบตัวถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	34
2.6 การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	35
2.7 การแตกร้าวเนื่องจากความล้าของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต.....	36
2.8 เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล.....	39
2.9 กราฟตัวอย่างข้อมูลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล.....	40
2.10 ลักษณะการทำงานในการบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyratory Compactor (SGC).....	42
2.11 การป้อนน้ำหนักและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบด้วย Indirect Tensile Test.....	44
2.12 ความสัมพันธ์ของจังหวะการให้ Load และ Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Repeated Load.....	45
3.1 แผนผังวิธีการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	48
3.2 แผนผังวิธีการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ.....	50
3.3 แผนผังวิธีการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง.....	51
3.4 แผนผังวิธีการทดสอบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ปูบนบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง.....	52
3.5 ลักษณะใบพัดของเครื่องผสมแรงเฉือนสูง.....	54
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทต่างๆ.....	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.7 ตัวอย่างสัญญาณวิทยาจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่าของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมโพลีเมอร์.....	55
3.8 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุผสมรวมสำหรับชั้นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532.....	58
3.9 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุผสมรวมสำหรับชั้นผิวทางระบายน้ำตามข้อกำหนดของญี่ปุ่น.....	59
3.10 การทดสอบ Running Off.....	60
3.11 ลักษณะของก้อนตัวอย่างทดสอบ Cantabro.....	62
3.12 ลักษณะก้อนตัวอย่างตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นที่เหมาะสมของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ปูทับบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง.....	65
3.13 ลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic creep test.....	66
3.14 การทดสอบการหลุดลอก (Stripping test) ด้วยวิธี Splitting test.....	67
3.15 Pendulum Skid Resistance Tester (BSI 1990).....	68
3.16 ตรวจสอบระยะของผิวสัมผัสของผิวทดสอบ.....	59
3.17 ลักษณะของเข็มชี้ของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงเสียดทาน.....	70
3.18 การทดสอบหาความสามารถในการระบายน้ำ.....	71
4.1 ค่า Penetration ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	73
4.2 ค่า % Retain Penetration ที่ผ่านการอบด้วย TFOT.....	74
4.3 ค่าจุดอ่อนตัว.....	75
4.4 ค่า Float Test.....	76
4.5 ค่า Penetration Index (PI).....	77
4.6 ค่าการยึดดึงที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียสทั้งก่อนและหลังจากการอบด้วย TFOT.....	78
4.7 ค่าร้อยละการคืนตัวกลับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสทั้งก่อนและหลังจากการอบด้วย TFOT.....	79
4.8 ค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.9 ค่าความเหน็ดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส.....	80
4.10 ความหนาแน่นของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	81
4.11 จุดวาบไฟและจุดติดไฟของวัสดุเชื่อมประสาน.....	82
4.12 ค่าร้อยละการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสานกับปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ.....	85
4.13 ค่าร้อยละการสูญเสียของวัสดุผสมรวมเนื่องจากการขัดสีกับปริมาณ วัสดุเชื่อมประสานที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ.....	86
4.14 ผลการทดสอบ Marshall ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ.....	87
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศและช่องว่างอากาศต่อเนื้อของแอสฟัลต์ คอนกรีตระบายน้ำ.....	88
4.16 ผลการทดสอบ Marshall ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง.....	89
4.17 ผลการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	90
4.18 ผลการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของแอสฟัลต์ คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูน และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม.....	92
4.19 ความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูน และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม ตามแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดต่าง ๆ.....	95
4.20 ความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาของ แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ 2 cm 4 cm และ 6 cm ปูทับบนแอสฟัลต์ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง.....	96
4.21 ผลการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสของ แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ 2 cm 4 cm และ 6 cm ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง.....	97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงก่อนที่เกิดวิกฤติเศรษฐกิจ พ.ศ. 2540 ประเทศไทยมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วทำให้มีความต้องการในการขนส่ง จึงมีการก่อสร้างถนนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ถนนโดยทั่วไปจะถูกออกแบบเป็นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง (dense grade asphalt pavement) เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักได้ดี แต่ผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงนี้เมื่อเกิดฝนตกจะทำให้เกิดการระบายน้ำบนผิวทาง ทำให้มีน้ำอยู่บนผิวทาง ส่งผลให้แรงเสียดทานระหว่างผิวทางกับล้อรถลดลง นอกจากนี้ เมื่อมียานพาหนะแล่นผ่านยังทำให้มีละอองน้ำกระเด็นขึ้นมา ส่งผลให้ทัศนวิสัยในการขับขี่ลดลง ทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ง่ายอีกด้วย

ประเทศไทยตั้งอยู่ในแถบที่มีมรสุมทำให้มีฝนตกเกือบตลอดทั้งปีโดยเฉพาะทางภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกเกือบตลอดทั้งปี การออกแบบผิวทางจึงควรคำนึงถึงความสามารถในการระบายน้ำเป็นสำคัญอีกปัจจัย ด้วยเหตุนี้จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะประยุกต์ใช้ผิวทางที่ระบายน้ำได้ดีกับประเทศไทย หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า ผิวทางระบายน้ำ (Drainaged asphalt pavement) ซึ่งช่วยลดปัญหาการท่วมขังของน้ำบนผิวทาง ทำให้แรงเสียดทานระหว่างผิวทางกับล้อรถไม่ลดลง ช่วยลดแสงสะท้อนจากผิวทางที่เปียกทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ทำให้มีทัศนวิสัยในการขับขี่ที่ดี ทั้งยังไม่ก่อให้เกิดการกระเด็นของละอองน้ำด้านหลังยานพาหนะเมื่อยานพาหนะ แล่นผ่าน ทำให้มีความปลอดภัยในการขับขี่เพิ่มมากขึ้น

นอกจากช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่แล้ว ผิวทางที่มีช่องว่างอากาศที่ค่อนข้างมากของผิวทางระบายน้ำยังมีความสามารถในการดูดซับเสียงสะท้อนจากเสียงเครื่องยนต์ของยานพาหนะได้เป็นอย่างดี อีกทั้งผิวทางที่เรียบของผิวทางระบายน้ำยังช่วยลดแรงกระแทกระหว่างผิวสัมผัสของล้อกับผิวทาง ทำให้เสียงที่เกิดจากการกระแทกลดน้อยลง ช่วยลดมลพิษทางเสียงจากการจราจรได้อีกทางหนึ่ง

ในต่างประเทศทั้งในยุโรป อเมริกา รวมทั้งญี่ปุ่น ได้มีการศึกษาและนำผิวทางระบายน้ำไปประยุกต์อย่างกว้างขวาง ได้ผลสรุปออกมาค่อนข้างเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้ หลายประเทศในเอเชีย เช่น เกาหลี จีน อินโดนีเซีย ก็ได้เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับผิวทางระบายน้ำเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เหมาะสมในแต่ละประเทศแล้วเช่นเดียวกัน ดังนั้นประเทศไทยควรเริ่ม

ศึกษาเกี่ยวกับผิวทางระบายน้ำอย่างจริงจัง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของผิวทางระบายน้ำ
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของสารปรับปรุง (modifier) ที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ (asphalt cement) เพื่อให้สามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีประสิทธิภาพในการผลิตผิวทางระบายน้ำ
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของผิวทางระบายน้ำกับผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง
4. เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำที่ใช้หินปูนกับตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม
5. เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ผิวทางระบายน้ำในงานผิวทางสำหรับประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 และ โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (Polymer Modified Asphalt ; PMA) ที่ผ่านมาตรฐานของกรมทางหลวงและมีจำหน่ายในประเทศไทย
2. ในการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ซีเมนต์ของการศึกษาครั้งนี้ ใช้โพลิเมอร์ (Polymer) ที่มี SBS (Styrene Butadiene Styrene) 40% ผสมกับเรซิน (resin) โดยจะผสมในอัตราส่วน 3% 6% 9% 12% และ 15%
3. ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ขนาดคละของผิวทางระบายน้ำตามแบบของมาตรฐานของญี่ปุ่น และขนาดคละของผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตโดยมีมวลรวมขนาดใหญ่ที่สุด (Maximum Size) 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว)

4. มาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ในการศึกษานี้ ใช้ตามมาตรฐานสำหรับประเทศไทย คือ มอก.851-2532 สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา และ ทล.-ก.408/2536 สำหรับโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์

5. ในการศึกษานี้ ทำการศึกษาเฉพาะในห้องปฏิบัติการ เพื่อสะท้อนถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของผิวทางระบายน้ำในภาคสนาม

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

ผิวทางระบายน้ำ เป็นผิวทางที่เมื่อบดอัดแล้วจะมีช่องว่างระหว่างวัสดุรวมรวมค่อนข้างมากประมาณ 20% (โดยทั่วไปประมาณ 18 - 25 %) ใช้ในการปูทับบนผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง เพื่อให้เป็นโครงข่ายของช่องสำหรับระบายน้ำออกจากผิวทางให้ได้เร็ว

ผิวทางแบบหนาแน่น เป็นผิวทางที่เมื่อบดอัดแล้วจะมีช่องว่างระหว่างวัสดุรวมรวมค่อนข้างน้อยประมาณ 4% ปัจจุบันกรมทางหลวงใช้ผิวทางแบบนี้ในงานปูผิวทาง

สารปรับปรุง (modifier) เป็นวัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เช่น ยางธรรมชาติ โพลิเมอร์ เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น

โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (Polymer Modified Asphalt ; PMA) คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดพิเศษที่ได้ปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรม ด้วยการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับโพลิเมอร์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจถึงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของผิวทางระบายน้ำทั้งที่ใช้หินปูน และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุรวมรวม

2. เข้าใจถึงคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมสารปรับปรุงในการช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีประสิทธิภาพในการผลิตผิวทางระบายน้ำ

3. ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของผิวทางระบายน้ำ เมื่อเปรียบเทียบกับผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง

4. ทราบถึงแนวทางที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ผิวทางระบายน้ำ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเผยแพร่สู่สาธารณชน อันจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาเพิ่มเติม และการประยุกต์ใช้ในการออกแบบผิวทางระบายน้ำเพื่อใช้ในประเทศไทยต่อไปในอนาคต

1.6 วิธีดำเนินการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎี แนวคิดและการศึกษาที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับผิวทางระบายน้ำ และการนำโพลีเมอร์มาช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์
2. กำหนดขอบเขตของการศึกษา และขั้นตอนการทดสอบ
3. ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษา และแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ และแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง
4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ และสรุปผลการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาและงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต รวมทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิจัยการนำยางธรรมชาติมาผสมกับวัสดุแอสฟัลต์เพื่อใช้ในงานทางดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Heystraeten และ Moraux (1990) ได้ศึกษาผลการนำผิวทางระบายน้ำมาประยุกต์ใช้ใน ประเทศเบลเยียม จากการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษา ได้ดังนี้

ผิวทางระบายน้ำ เกิดจากการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับมวลรวมที่มีช่องว่างระหว่าง วัสดุมวลรวมค่อนข้างมาก (โดยทั่วไปประมาณ 18 - 25 %) เมื่อบดอัดแล้ว ใช้ในการปูทับบนชั้นที่ไม่ให้น้ำซึมผ่านได้ (impervious layer) เพื่อให้เป็นโครงข่ายของช่องสำหรับระบายน้ำออกจาก ผิวทางให้ได้อย่างรวดเร็ว

คุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำ

ในการออกแบบผิวทางระบายน้ำ คำนึงถึงการระบายน้ำบนผิวทางให้ได้เร็วเป็นสำคัญ เพื่อเพิ่มการสัมผัสของล้อของยานพาหนะกับผิวทางให้ดีขึ้นในสภาพแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะใน สภาพที่ผิวถนนเปียก

นอกจากนี้ ผิวทางระบายน้ำ ยังช่วยลดการกระเด็นของละอองน้ำจากด้านหลังยาน พาหนะเมื่อยานพาหนะแล่นผ่าน ทั้งยังช่วยลดแสงสะท้อนจากผิวทางที่เปียกทั้งในเวลากลางวัน และกลางคืน ทำให้ทัศนวิสัยของผู้ขับขี่ยานพาหนะดีขึ้น

ยิ่งไปกว่านั้น ผิวทางระบายน้ำ ยังช่วยลดมลพิษทางเสียงทั้งภายในและภายนอกตัวรถ เนื่องจากช่องว่างในผิวทางระบายน้ำจะช่วยดูดซับเสียง ขณะที่ผิวทางระบายน้ำซึ่งเป็นผิวทางที่ เรียบจะช่วยลดแรงกระแทกระหว่างผิวสัมผัสของล้อและผิวทาง

การประยุกต์ใช้ ผิวทางระบายน้ำ

ผิวทางระบายน้ำ ใช้ได้ดีกับบริเวณที่เป็นโค้งท้องกระทะตามแนวถนนตามแนวเขา และ บริเวณที่ค่อนข้างราบซึ่งน้ำไม่ไหล เช่น บริเวณ superelevation บริเวณที่ปูผิวทางกว้าง เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังสามารถใช้กับการปูผิวทางในอุโมงค์ ซึ่งมีระดับน้ำใต้ดินสูงกว่าผิวทาง ช่วยในการระบายน้ำใต้ดินที่ไหลขึ้นสู่ผิวทางให้ระบายออกด้านข้าง และใช้ในบริเวณที่เป็นเขตชุมชน เพื่อช่วยลดมลภาวะทางเสียงได้อีกด้วย

ในการใช้ผิวทางระบายน้ำ จะต้องมีการสร้างทางน้ำไหลด้านข้างผิวทาง เพื่อเป็นที่รองรับน้ำ ซึ่งควรจะอยู่ต่ำกว่าชั้นกั้นน้ำ (impervious layer)

หมายเหตุ บริเวณที่ไม่ควรใช้ผิวทางระบายน้ำ ได้แก่

- บริเวณที่มีขยะที่ละลายน้ำได้อยู่เป็นจำนวนมาก เช่น เขตปศุสัตว์ เพราะจะทำให้เกิดมลพิษทางน้ำได้
- บริเวณที่มีการจราจรน้อย หรือเคลื่อนตัวได้ช้า เพราะฝุ่นที่ตกค้างอยู่บนผิวทางจะไม่ถูกพัดพาไปกับยานพาหนะ จึงอาจเข้าไปอยู่ในช่องว่างของผิวทางได้
- บริเวณทางโค้ง ทางแยก เพราะผิวทางชนิดนี้มีมวลรวมที่ยึดเหนี่ยวกันน้อย จึงรับแรงตามแนวสัมผัสโค้ง (tangential load) ได้น้อย

ส่วนประกอบของผิวทางระบายน้ำ

ในการผสมผิวทางระบายน้ำต้องการจะผสมให้มีปริมาณของช่องว่างอากาศมาก ดังนั้นจึงควรผสมให้เป็นแบบ open grade

- ควรมีมวลรวมซึ่งค้ำบนตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตรมากกว่า 80 %
- ควรมีส่วนผสมของมวลรวมที่มีขนาดเล็กกว่า 2/7 หรือ 2/10 มิลลิเมตร ในปริมาณน้อย
- ควรจำกัดการใช้วัสดุประสาน (Binder) เพื่อไม่ให้ไปเติมเต็มช่องว่างอากาศ และเพื่อให้มีความยึดเหนี่ยวที่ดี

ส่วนผสมของ ผิวทางระบายน้ำ สรุปได้ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของ ผิวทางระบายน้ำตาม The Belgian Specification

Property	Specification
Grading	0/14 mm gap
Stones (≥ 2 mm)	83 %
Crushed sand (0.080 mm - 2 mm)	12 %
Filler (< 0.080 mm)	5 %
Binder	
- bitumen	4 to 5 %
- modified bitumen	4 to 5 %
- rubber-bitumen	5.5 to 6.5 %
Thickness	4 cm
Voids ratio	
- average	19 to 25 %
- individual	16 to 28 %
Draining capacity	
- average	≤ 60 s
- individual	≤ 180 s

Kawanaka และ Nakanishi (n.d.) ได้ศึกษาคุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำ และการนำ โพลีเมอร์ (Polymer) ที่มี SBS (Styrene Butadiene Styrene) 40% ผสมกับเรซิน (resin) มาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำ

ส่วนผสม และขนาดคละของมวลรวม

ส่วนผสมของมวลรวมแสดงดังตารางที่ 2.2 และ ขนาดคละของมวลรวมแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

ชนิดของมวลรวม	มวลรวมหยาบ (ไม่เกิน 13 มิลลิเมตร)	ทรายหยาบ	ทรายละเอียด	Mineral Filler
ปริมาณ (%)	84	6	6	4

ตารางที่ 2.3 ขนาดคละของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

Seive Size (mm.)	19.0	13.2	4.75	2.36	0.6	0.3	0.15	0.075
% of Combined Grading	100	97.0	21.7	16.0	11.2	9.3	6.8	4.1
Rang of Grading	100	92-100	9-31	9-21	4-17	4-12	3-8	2-7

คุณสมบัติที่ตรวจสอบ

- Cantabro Scattering Loss (วิธีการนี้คิดโดย Cantabria University ในประเทศสเปน) เป็นการทดสอบเพื่อประเมินค่าความสามารถในการรับการขัดสีของมวลรวมซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาอัตราส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมในการผลิตผิวทางระบายน้ำ จากผลการทดสอบพบว่า ถ้าอัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้น อัตราส่วนค่า Cantabro Scattering Loss มีแนวโน้มที่จะลดลง

- Running off Test เป็นการทดสอบเพื่อประเมินว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์จะหลุดลอกตามการจราจรมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาอัตราส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มากที่สุดที่เหมาะสมในการผลิตผิวทางระบายน้ำ จากผลการทดสอบพบว่า ถ้าอัตราส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้น อัตราส่วนค่า Running off ก็มีแนวโน้มที่จะมากขึ้นด้วย

- Marshall Test เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในการผลิตผิวทางระบายน้ำ

- Wheel Tracking Test เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อ จากผลการทดสอบ พบว่า ถ้าอัตราส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้น ความต้านทานการเกิดร่องล้อจะลดลง

- Stripping Resistance Test (by Splitting Test) เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบความต้านทานการแตกร้าวว่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่

คุณสมบัติเบื้องต้นของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา

โพลีเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา เป็นโพลีเมอร์ (Polymer) ที่มี Styrene Butadiene Styrene (SBS) ซึ่งเป็นสาร thermoplastic elastomer ผสมกับเรซิน (resin) 40% เป็นองค์ประกอบหลัก ปกติแล้ว thermoplastic elastomer จะละลายเข้ากับแอสฟัลต์ได้ยาก แต่การเติมสารจำพวกเรซิน และพลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) เข้าไปในองค์ประกอบ จะช่วยทำให้ thermoplastic elastomer สามารถละลายเข้ากับแอสฟัลต์ได้ง่ายขึ้น เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ให้มีค่าความหนืดที่สูงขึ้น ซึ่งช่วยให้แอสฟัลต์มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา

Shape	Pellet (2-3 mm.)
Color	Light yellow
Specific gravity	0.98
Unit weight	600 kg/ m ³

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงโดยการเติมโพลีเมอร์

Test Item		Test Value	Reference
Penetration	1/10m m	43	JIS K 2207
Softening Point	°C	92.5	JIS K 2207
Ductility (15°C)	cm	95	JIS K 2207
Flash Point	°C	310	JIS K 2207
Fraass Braking Point	°C	-23	JIS K 2207
Loss on Heating Asphalt	%	-0.07	JIS K 2207
Penetration Ratio of Asphalt After Loss on Heating	%	84.5	JIS K 2207
Toughness	kg-cm	313	JEAAS
Tenacity	kg-cm	241	JEAAS
Density (15°C)	g/cm ³	1.025	JIS K 2207
Resistance of Coarse Aggregate to Stripping of Asphalt Film	%	0	JPI K 2207
Viscosity at 60°C	poise	2,530,000	JAA-001

นอกจาก โพลีเมอร์จะสามารถช่วยเพิ่มความหนืดสูงขึ้นแล้ว ยังช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติอื่น ๆ ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติที่ได้รับการปรับปรุงจากการใช้โพลีเมอร์

คุณสมบัติ	ข้อดี
<ul style="list-style-type: none"> - จุดอ่อนตัว (Softening point) สูง - Viscosity ที่ 60°C มีค่าที่สูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความต้านทานต่อ rutting สูง และ plastic flow ที่อุณหภูมิสูง - เกิด Clogging น้อยลง
<ul style="list-style-type: none"> - ความสามารถในการยึดได้สูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความต้านทานต่อ cracking
<ul style="list-style-type: none"> - แรงยึดเหนี่ยวระหว่าง aggregate สูง - ความต้านทานต่อการหลุดลอก (stripping resistance) สูง 	<ul style="list-style-type: none"> - ความต้านทานต่อการหลุดลอกของ aggregate สูง
<ul style="list-style-type: none"> - ความสามารถในการทำงาน (Workability) ดี 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีการหลุดลอกของแอสฟัลต์ซีเมนต์ - ไม่มีการแยกส่วนของส่วนผสม - ง่ายต่อการดำเนินการ

Dunn Hicks และ Gower (1990) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบผิวทางระบายน้ำ จากการศึกษาศาสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการใช้ ผิวทางระบายน้ำ (จากผลการศึกษาของ The Oregon Department of Transportation ; ODOT) ได้ลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผิวทางระบายน้ำ เรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้

1. ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ Asphalt Content
2. ขนาดคละ (Gradation)
3. การบดอัด (Compaction)
4. ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ปัจจัยดังกล่าว มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของผิวทางระบายน้ำ ได้แก่

- แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวทางกับล้อของยานพาหนะ (Skidding Resistance)
- แรงยึดเหนี่ยวของผิวทาง (Surface Texture)
- การระบายน้ำ (Hydraulic Conductivity)
- การยุบตัวของผิวทาง (Deformation)
- สภาวะการมองเห็น (Visual Condition)

การผสมและการปูผิวทางระบายน้ำ

ในการทำผิวทางระบายน้ำ ใช้วิธีการผสมตามแบบผิวทางที่มีขนาดคละแบบเปิด (open grade) เริ่มต้นจากผสมทราย หินย่อย(crushed stone) และวัสดุเติม(filler) เข้าด้วยกัน จากนั้นผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ลงไปผสมกันให้ทั่ว อุณหภูมิขณะผสมไม่ควรเกิน 170°C เพราะจะทำให้ยางไม่เกาะกับวัสดุมวลรวมซึ่งทำให้เกิดการแยกตัว จากนั้นผสมทราย วัสดุเติม และ แอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่ม แล้วจึงผสมมวลรวมหยาบลงไปและผสมซ้ำอีกครั้ง

ในการปูผิวทางระบายน้ำ ใช้เครื่องมือธรรมดาเหมือนกับการปูผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง คือ ใช้ Static smooth-wheeled ในการบดอัดผิวทาง แต่จะไม่ใช้ vibrating roller เพราะผิวทางจะหลุดติดไปกับล้อ

ประเภทของความเสียหายของผิวทางระบายน้ำ

- การแตกของผิวทางเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Reveling by freezing) ในเขตที่มีอากาศหนาวจัดในช่วงฤดูหนาว น้ำที่ซึมอยู่ในช่องว่างของผิวทางกลายเป็นน้ำแข็ง และขยายตัวดันผิวทางเสียหาย

- การหลุดล่อนของวัสดุมวลรวม (Reveling) โดยส่วนมากความเสียหายของผิวทางระบายน้ำจะเป็นในลักษณะนี้ การหลุดล่อนอาจเกิดขึ้นได้หากผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยเกินไป หรือใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติการยึดเกาะไม่ดี

- การสูญเสียคุณสมบัติการระบายน้ำ (Draindown) เกิดจากการเยิ้ม (Bleeding) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไป

- การยุบตัวเป็นร่องล้อ (Rutting) เกิดจากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไป หรือขนาดคละไม่ดี

Colwill และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาถึงผลการนำผิวทางระบายน้ำมาประยุกต์ใช้ในประเทศสหราชอาณาจักร จากการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษา ได้ดังนี้

ผิวทางระบายน้ำ เกิดจากการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์มาผสมกับวัสดุมวลรวมที่เมื่อบดอัดแล้วมีช่องว่างค่อนข้างมากประมาณ 20 % ใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของผิวทางในด้านทัศนวิสัย เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่

ข้อดีของการประยุกต์ใช้ ผิวทางระบายน้ำ

- ลดมลพิษทางเสียงทั้งในสภาพผิวทางแห้งและสภาพผิวทางเปียก
- ลดการฟุ้งกระจายของน้ำที่กระเด็นจากยานพาหนะในสภาพผิวทางเปียก
- ลดแสงสะท้อนจากผิวทางเปียก

เนื่องจาก ผิวทางระบายน้ำมีช่องว่างอากาศมาก ทำให้ออกซิเจนและรังสีอุลตราไวโอเล็ต สัมผัสกับวัสดุประสานมากขึ้น ทำให้ผิวทางเกิดการออกซิเดชันเร็วขึ้น และทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ แข็งเร็วขึ้น (Aging) ส่งผลให้อายุการใช้งานของผิวทางลดลง การผสมโพลิเมอร์ เช่น ยางธรรมชาติ aromatic-oil เป็นต้น มาช่วยในการผสมเป็นวัสดุประสาน เรียกว่า rubber-bitumen หรือ recycled elastomer ทำให้สามารถใช้น้ำปริมาณของวัสดุประสานได้มากขึ้น จึงช่วยลดปัญหาในเรื่องยางแข็งตัวเร็วลง ทำให้ช่วยยืดอายุการใช้งานของผิวทางได้นานขึ้น

ปริมาณของวัสดุประสานต้องเพียงพอสำหรับการเคลือบมวลรวม แต่ต้องไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้ปริมาณของช่องว่างอากาศลดต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ และจะทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างที่ปูผิวทางหรือใช้งานได้ นอกจากนี้ยังอาจทำให้เกิดการยุบตัวของผิวทางระบายน้ำหลังจากเปิดให้ใช้งาน (postcompacted)

บริเวณที่ต้องรับแรงสัมผัสแนวโค้ง (tangential load) เช่น ทางโค้ง ทางแยก ผิวทางจะหลุดง่าย เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวทางหลุดลอกอาจจะใช้วัสดุเติม (filler) โยบบนผิวหน้าของผิวทาง ประมาณ 50 กรัม/ตารางเมตร ก่อนเปิดใช้งาน

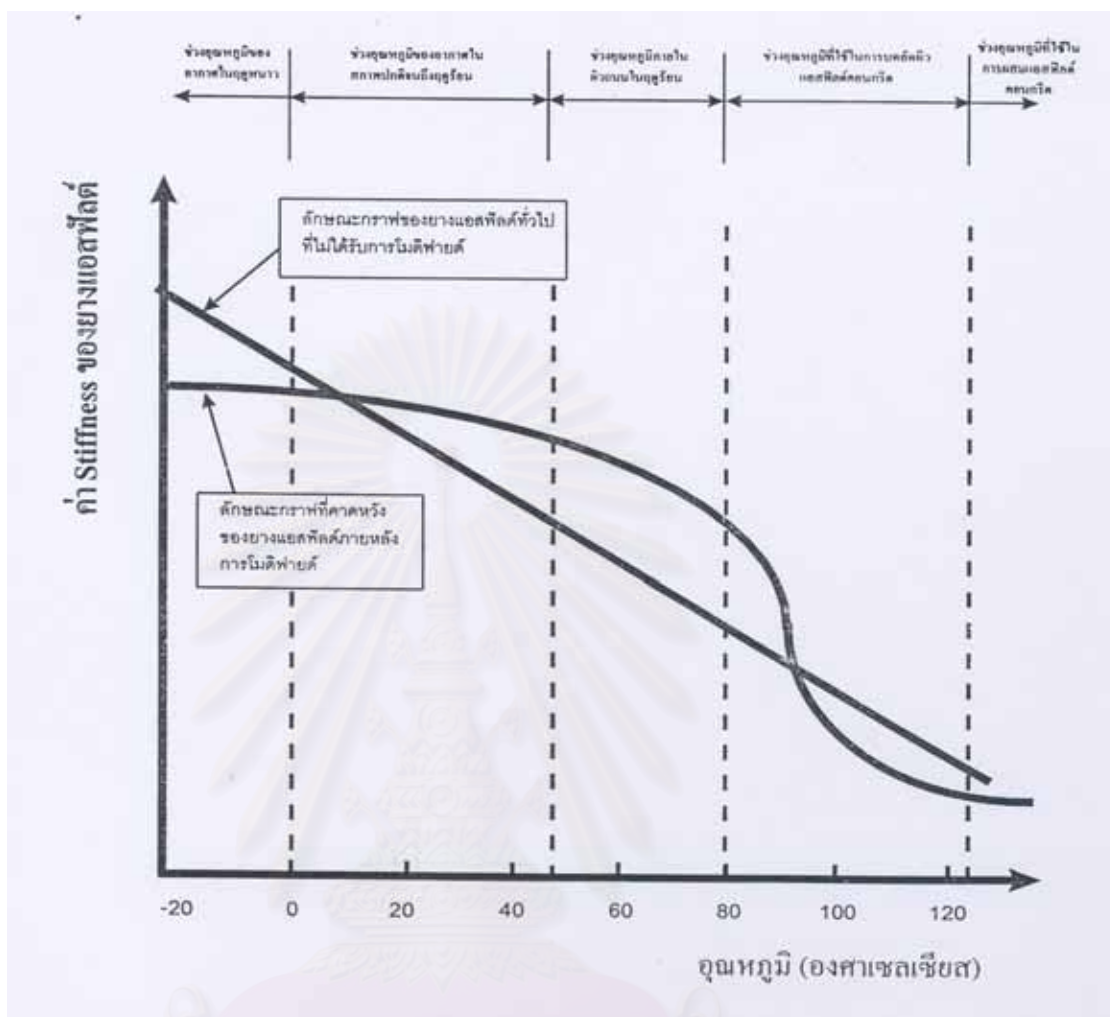
Balghunnain Dhalaan และ Noureldin (1992) ได้ศึกษาถึงการนำโพลิเมอร์มาปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อลดการเสถียรภาพของผิวทางที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยใช้โพลิเมอร์ 2 ชนิด คือ โพลีเอทิลีน (polyethylene) 7% ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เรียกว่า โนวอพัลท์ (Novophalt) และใช้สไตรีนบิวทีไดอีนโพลิเมอร์ (Styrene Butadiene Polymer) 5% ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เรียกว่า Strelf จากผลการศึกษาในห้องปฏิบัติการพบว่า โพลิเมอร์ช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้ค่า Penetration ลดลง ค่าความหนืด (Viscosity) และจุดอ่อนตัว (Softening point) สูงขึ้น และจากผลการศึกษาภาคสนามพบว่า ผิวทางที่ปูด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยโพลิเมอร์แล้วจะเสถียรภาพเนื่องจากการเกิดร่องล้อ (Rutting) น้อยมาก

Shell Chemical Company (1992) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการนำยางซึ่งเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งมาปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC-5 ซึ่งมีคุณลักษณะใกล้เคียงกับแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC60/70 โดยใช้ชื่อแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้ว่า Kraton Rubber จากการศึกษา พบว่ายางที่นำมาใช้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดังนี้

- เพิ่มความสามารถในการดัดงอที่อุณหภูมิต่ำ
- เพิ่มความต้านทานต่อการไหลและการเสียรูปที่อุณหภูมิสูง
- เพิ่มค่าโมดูลัสแข็งแกร่งที่อุณหภูมิสูง
- ปรับปรุงคุณสมบัติในการรับแรงดึง
- ปรับปรุงความสามารถในการเกาะยึดกับมวลรวม
- เพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอที่ผิวทาง
- ลดความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- ลดค่าการทะลวง
- เพิ่มความยืดหยุ่น

ชยธันว์ พรหมศร (2541) ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์กับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลิเมอร์ เพื่อเน้นการเพิ่มศักยภาพอยู่ 2 ด้านสำหรับการใช้งานในประเทศไทย คือ ด้านการรักษาความแข็งแรง (Stiffness) และความยืดหยุ่น (Elasticity) ที่อุณหภูมิสูง เพื่อป้องกันการยุบตัวถาวร (Permanent deformation) และด้านการรักษาความยืดหยุ่นไม่แข็งเปราะ ภายหลังจากผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่ง (Aging) เพื่อให้สามารถทนต่อการแตกร้าวเนื่องจากความล้าได้ (Fatigue cracking) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่คาดว่าจะได้รับหลังจากผสมโพลิเมอร์ลงไปแอสฟัลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness ของแอสฟัลต์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่คาดหวังจะได้รับจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารโพลิเมอร์

ในการศึกษาได้เลือกใช้สารโพลิเมอร์ 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 การผสมสารโพลิเมอร์กับวัสดุแอสฟัลต์ข้างต้นทั้งหมดนั้นจะกระทำในระหว่างกระบวนการการผลิตแอสฟัลต์ที่โรงงานทั้งสิ้น การทดสอบทั้งหมดอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM โดยจะเปรียบเทียบกับระหว่างแอสฟัลต์ที่มีส่วนผสมสารโพลิเมอร์ กับที่ไม่มีส่วนผสมของโพลิเมอร์ จากการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

ในส่วนที่เป็นวัสดุแอสฟัลต์ผสมสารโพลีเมอร์

- การผสมสารโพลีเมอร์ชนิด SBS ในวัสดุแอสฟัลต์ ส่งผลให้มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงมากขึ้นแม้ที่อุณหภูมิสูง โดยสารโพลีเมอร์ชนิด SBS ได้แสดงคุณสมบัตินี้ชัดเจนกว่าสารโพลีเมอร์โมดิฟายด์ชนิดอื่น

- สารโพลีเมอร์ชนิด SBS ที่ผสมในวัสดุแอสฟัลต์เกรดอ่อนสามารถช่วยให้วัสดุแอสฟัลต์นั้นมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงมากกว่าวัสดุแอสฟัลต์เกรดแข็ง แต่มีความแข็งแรงเปราะที่อุณหภูมิต่ำน้อยกว่าวัสดุแอสฟัลต์เกรดแข็ง โดยสารโพลีเมอร์ชนิด SBS แสดงคุณสมบัตินี้ได้ชัดเจนกว่าสารโพลีเมอร์โมดิฟายด์ชนิดอื่นเช่นกัน

- สารโพลีเมอร์ชนิด SBS ที่ผสมในวัสดุแอสฟัลต์ได้แสดงความสามารถในการช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ภายหลังจากการใช้งานไประยะหนึ่ง (Aging) ได้

- สารโพลีเมอร์ทุกชนิดได้แสดงความสามารถในการช่วยเพิ่มค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ให้แก่วัสดุแอสฟัลต์ได้

ในส่วนที่เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

- สารโพลีเมอร์ทุกชนิดได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการช่วยเพิ่มเสถียรภาพ (Stability) ให้แก่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้

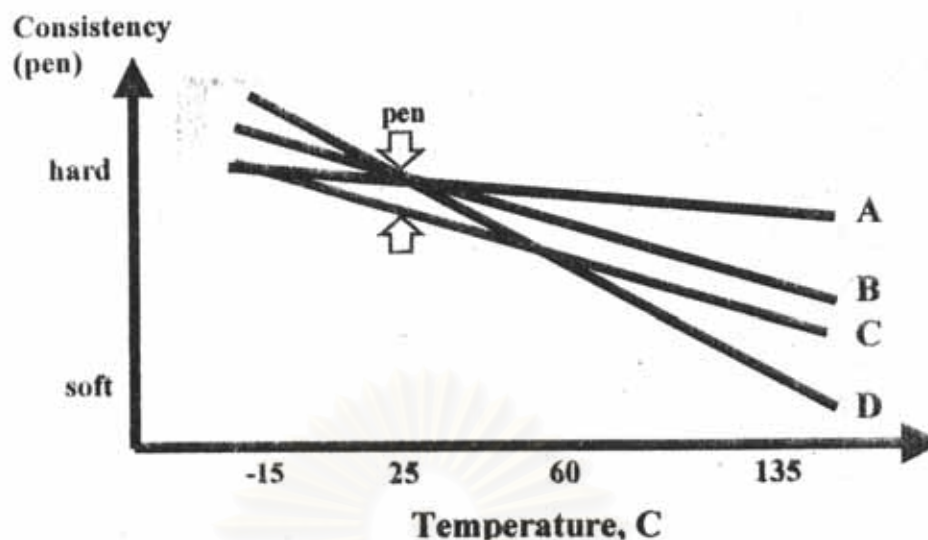
- สารโพลีเมอร์ชนิด SBS ได้แสดงความสามารถที่โดดเด่นที่สุดในการเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบค่า Tensile strength และค่า Tensile strain ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ทุกค่าอุณหภูมิตดสอบ โดยเฉพาะผลการทดสอบก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตและก้อนตัวอย่างโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมขึ้นโดยการบดอัดด้วยวิธี Standard compaction

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ พิภพณ์ คุหิรัญ และ ชยธันว์ พรหมศร (2544) ได้ร่วมกันนำเสนอข้อแนะนำในการปรับปรุงการออกแบบวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับถนนที่มีปริมาณการจราจรสูงในประเทศไทย เนื่องจากผิวทางในประเทศไทยมักมีลักษณะความเสียหายหลักอยู่ 2 รูปแบบ คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร (Permanent deformation) และการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking)

สำหรับความเสียหายในลักษณะแรกมักเกิดในบริเวณที่มีการสัญจรไปมามากและมีการหยุดจอดและออกตัวบ่อย เช่น บริเวณทางแยก ทำให้ผิวทางต้องรับน้ำหนักมากจนเกิดการยุบตัวและเกิดร่องล้อ (Rutting) ขึ้น อีกทั้งประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน วัสดุผิวทางแอสฟัลต์จึงอ่อนตัวได้ง่าย สาเหตุของความเสียหายในลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวรที่พบได้ ได้แก่ สาเหตุจากการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ดีพอ ชั้นโครงสร้างทางต่างๆ ไม่แข็งแรง

เพียงพอ มีการบรรทุกน้ำหนักเกินพิกัดที่กฎหมายกำหนด และที่สำคัญวัสดุแอสฟัลต์ที่ใช้เป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณภาพไม่ดีพอ ขาดความยืดหยุ่นและความแข็งแรง สำหรับความเสียหายของผิวทางที่แตกร้าวเนื่องจากความล้า นั้นมักเกิดจากการรับน้ำหนักบรรทุกในลักษณะซ้ำซากและวัสดุผิวทางมีคุณภาพที่ไม่ดีพอ ประกอบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนเมื่อผิวทางผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่ง ทำให้ผิวทางมีความแข็งแรงเปราะมากขึ้น ขาดความยืดหยุ่นทำให้เกิดการแตกร้าวได้ การแข็งตัวของยาง (Aging) นี้ จะเกิดซ้ำเร็วแตกต่างกันตามแหล่งและชนิดของวัสดุแอสฟัลต์ สำหรับสาเหตุอื่นๆ ของความเสียหายในลักษณะที่สองนี้มีลักษณะใกล้เคียงกันกับสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถาวร จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้เลือกประเด็นของการคัดเลือกและพิจารณาปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นหลัก

จากการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์นั้น ยังไม่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์ได้อย่างเพียงพอ ว่าจะป็นวัสดุที่ดี และเมื่อนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วจะทำให้ได้ผิวทางที่มีคุณภาพที่ดีตามมาได้หรือไม่ สำหรับทางหลวงในประเทศไทยในปัจจุบันได้ใช้ข้อกำหนดของกรมทางหลวงในการก่อสร้าง โดยกำหนดเกรดของวัสดุแอสฟัลต์ด้วยการทดสอบ Penetration ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเพียงอย่างเดียว จะเห็นได้ว่าการทดสอบดังกล่าวเป็นเพียงการวัดความแข็งแรงอ่อนเพื่อแบ่งเกรดของวัสดุแอสฟัลต์เท่านั้น ขณะที่อุณหภูมิการใช้งานบนถนนบางเส้นทางอาจสูงถึง 50-60 องศาเซลเซียส การที่แต่ละเส้นทางที่ใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดเดียวกัน แต่กลับมีความสามารถในการต้านทานความเสียหายที่แตกต่างกัน ในระยะเวลาที่ต่างกัน ย่อมเป็นการบ่งบอกถึงผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิที่ทำให้คุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์เปลี่ยนแปลงไป จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าวัสดุแอสฟัลต์ทั้ง 4 ชนิด สามารถผ่านข้อกำหนดเกรด Penetration เดียวกัน แต่เมื่อนำไปใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันแล้ว กลับแสดงคุณสมบัติที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสซึ่งอาจเป็นอุณหภูมิของผิวทางในฤดูร้อน ดังนั้น วัสดุแอสฟัลต์ชนิด A จึงน่าจะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยพิจารณา ลักษณะของ Temperature susceptibility ประกอบไปด้วย



รูปที่ 2.2 ความแตกต่างในคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

จากกรณีดังกล่าวจึงได้มีการคิดค้นและพัฒนาการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์ขึ้น โดยได้จัดให้มีโปรแกรมเฉพาะกิจเพื่อปรับปรุงคุณภาพการทดสอบการออกแบบวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา คือ Strategic Highway Research Program หรือที่เรียกกันโดยย่อว่า SHRP ซึ่งต่อมาได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง โปรแกรมนี้ได้สร้างข้อกำหนดในการตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์และวัสดุเชื่อมประสาน (Binders) ชนิดอื่น ๆ เช่น ยาง โพลีเมอร์ และวัสดุ Modified asphalt ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบด้วย Dynamic Shear Rheometer (DSR) เพื่อให้สามารถวัดสมบัติทาง Rheology properties ของวัสดุประเภท visco-elastic ที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง (5-40 องศาเซลเซียส) และที่ช่วงอุณหภูมิสูง (มากกว่า 45 องศาเซลเซียส) ได้

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

- วิธีการทดสอบมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- การพังทลายของวัสดุเนื่องจากการทดสอบไม่มีผลต่อสภาพของผิวของวัสดุทดสอบ จึงทำให้แน่ใจว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง
- การพังทลายของวัสดุเกิดขึ้นบริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุที่สามารถหาได้จากวิธีการทดสอบนี้ สามารถแบ่งได้เป็น การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักคงที่ (Static indirect tensile test) ได้ค่า ดังนี้

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

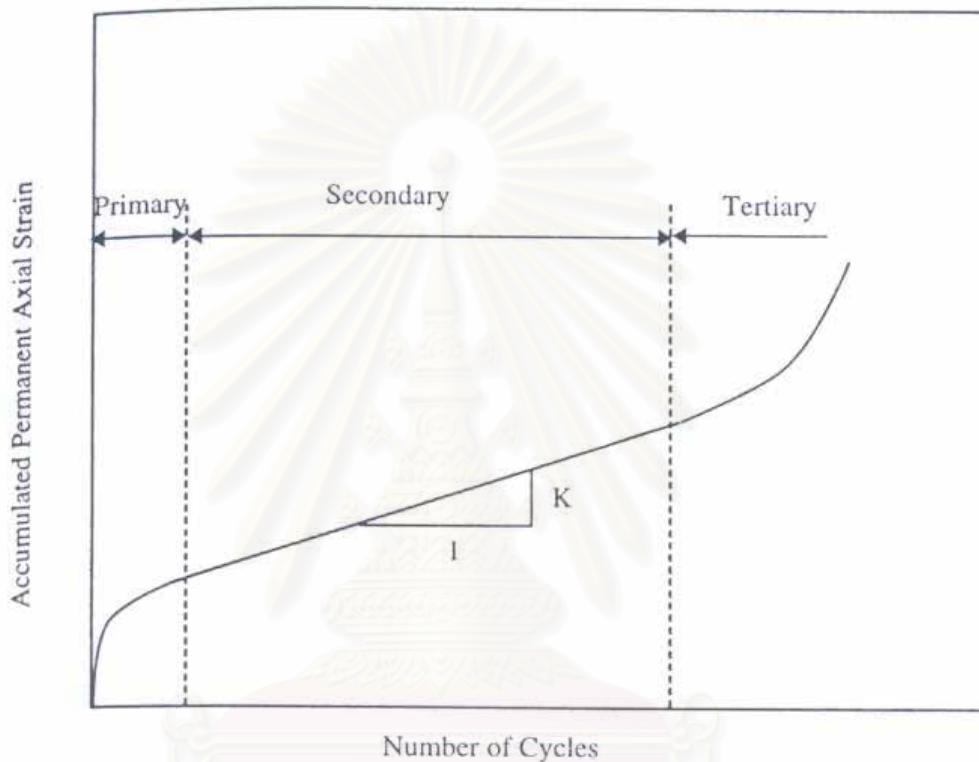
การทดสอบแรงดึงทางอ้อมโดยให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated-Load/Dynamic indirect tensile test) ได้ค่าดังนี้

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

Mohamed และ Yue (1994) ได้ศึกษาการประเมินผลจากการเกิดร่องล้อบนผิวทาง แอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งในอดีตการวัดการเกิดร่องล้อจะทำการทดสอบโดยใช้ล้ออย่างจำลองวิ่งบน แผ่นวัสดุตัวอย่างด้วยความเร็วและอุณหภูมิที่กำหนด หลังจากนั้นจะวัดหาความลึกที่เกิดจากร่องล้อ (Rut depth) แล้วนำค่าที่ได้ไปประเมินสภาพผิวทางในสนาม ต่อมาหน่วยงานทางหลวง Strategic Highway Research Program (SHRP) ได้คิดค้นวิธีใหม่ในการประเมินผลโดยการหาค่า Accumulated permanent axial strain บนผิวทางที่เกิดร่องล้อซึ่งเกิดความเสียหายจาก Shear damage ด้วยวิธีการทดสอบ Repetitive uniaxial compression test ทำให้สามารถประเมินความเสียหายจากการเกิดร่องล้อและการยุบตัวถาวร (Permanent deformation) ของผิวทางได้ เสมือนการจำลองน้ำหนักบรรทุกจริงในสนามโดยใช้ระยะเวลาในการทดสอบน้อย อีกทั้งยังสะดวก เพราะตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนี้ทั้งที่ได้มาจากการขุดเจาะ (Core) ในสนาม และที่ได้มาจากการเตรียมในห้องปฏิบัติการโดยใช้เครื่องบดอัด SHRP Gyrotary compactor จะมีลักษณะทางกายภาพ เช่น ความสูง ความหนาแน่น และปริมาณช่องว่างอากาศที่ใกล้เคียงกัน เป็นต้น

สำหรับการศึกษานี้ได้กำหนดลักษณะของการป้อนน้ำหนักเป็นรูปแบบ Square pulse ใช้เวลา 2 วินาทีต่อ 1 รอบการให้น้ำหนัก โดยแบ่งเป็นให้น้ำหนัก 0.2 วินาที แล้วหยุดพัก 1.8 วินาที และใช้ความถี่ 0.5 Hz หน่วยแรงที่ใช้ป้อนคือ 690 kPa ซึ่งเป็นค่าตัวแทนของน้ำหนักล้อของรถ

ที่สัญจรบนทางหลวงในอเมริกาเหนือ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส ปัจจุบันที่มีผลต่อการกำหนดเกณฑ์ในการทดสอบ คือ ความสูงของก้อนตัวอย่าง ระดับการป้อนน้ำหนัก ลักษณะการบดอัดทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ และสภาพแวดล้อมในช่วงอุณหภูมิสูง 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 เนื่องจากก้อนตัวอย่างจะเริ่มแน่นอย่างรวดเร็วเพราะน้ำหนักที่มากกระทำ วัสดุมวลรวมภายในโครงสร้างของส่วนผสมจะมีการเคลื่อนตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ขึ้น ข้อมูลในช่วงแรกนี้ยังไม่สามารถประเมินสมบัติการยุบตัวของตัวอย่างได้

- **ช่วงที่ 2 (Secondary)** หลังจากที่ตั้งตัวอย่างแน่นขึ้นและการเคลื่อนตัวของมวลรวมลดลง อัตราการเพิ่มของค่า Accumulated permanent axial strain จะเริ่มคงที่ การยุบตัวที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จึงอาจมีสาเหตุมาจาก Shear flow โดยจากกราฟในรูปที่ 2.3 ค่าความชัน K จะเป็นค่าคงที่ของการยุบตัว ซึ่งมีในทุกก่อนตัวอย่างและมีลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละก่อนตัวอย่าง โดยค่า K นี้จะเป็นตัวชี้วัดหรือเป็นเกณฑ์ที่สำคัญในการประเมินการเกิดการยุบตัวหรือการเกิดร่องล้อของผิวทาง ถ้าค่า K มาก การยุบตัวจะเกิดขึ้นมาก ปัจจัยที่มีผลต่อค่า K ในก่อนตัวอย่าง ได้แก่ ความสูงของก่อนตัวอย่างโดยเฉพาะในกรณีที่คุณหนุมสูง เนื่องจากก่อนตัวอย่างจะมีความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้นเมื่อถูกน้ำหนักมากกระทำที่คุณหนุมสูง นอกจากนี้ปริมาณน้ำหนักที่มากกระทำก็จะมีผลต่อค่า K เช่นกัน กล่าวคือ ค่า K จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณน้ำหนักที่มากกระทำ
- **ช่วงที่ 3 (Tertiary)** ช่วงนี้เป็นช่วงสุดท้ายของการทดสอบ โดยค่า Accumulated permanent axial strain จะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดการยุบตัวอย่างฉับพลันจนนำไปสู่สถานะแตกเสียหาย ปัจจัยบางประการที่อาจทำให้ก่อนตัวอย่างเสียหายได้ก่อนกำหนดคือ ความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม ความเอียงของแผ่นเหล็กที่รองรับน้ำหนักกระทำบนตัวอย่าง และความไม่สม่ำเสมอบนผิวหน้าของตัวอย่าง

Kennedy และคณะ (1996) ได้กล่าวถึงการบดอัดที่ทำในห้องปฏิบัติการ ว่าเป็นการจำลองความหนาแน่นของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถรองรับปริมาณการจราจรได้จนถึงระดับที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีมาร์แชลและวิธีฮวีม (Hveem) ที่ใช้มาแต่เดิมนั้นไม่สามารถจำลองความหนาแน่นของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อก่อสร้างเสร็จใหม่ หรือในสภาพการใช้งานจริงที่ปริมาณการจราจรมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ประมาณการไว้ได้ ซึ่งหากปริมาณการจราจรมีมากกว่าหรือน้อยกว่าที่ประมาณการเอาไว้ก็จะส่งผลให้ปริมาณช่องว่างของอากาศ (Air void) มีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่าที่ประมาณไว้ในห้องปฏิบัติการได้เช่นกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถทราบได้ว่าปริมาณช่องว่างของอากาศที่มีน้อยกว่าหรือมากกว่าที่ประมาณการไว้จะอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ แตกต่างจากวิธีการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory compactor สามารถประมาณปริมาณช่องว่างของอากาศที่มีอยู่และสามารถจำลองความหนาแน่นที่เกิดขึ้นตั้งแต่ก่อสร้างเสร็จจนกระทั่งเมื่อได้รองรับระดับปริมาณการจราจรตามที่ต้องการหรือมากกว่าได้ เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวสามารถบดอัดจนได้ปริมาณช่องว่างของอากาศที่น้อยกว่าแบบวิธีมาร์แชล ดังนั้นหากถนนจริงต้องรับปริมาณการจราจรที่น้อยกว่าหรือมากกว่าที่ประมาณการไว้ ก็จะสามารถทราบปริมาณช่องว่างของอากาศได้ว่าอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ นอกจากนี้การบดอัดด้วย

เครื่อง Gyrotory compactor ยังช่วยให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความแปรปรวนที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างในแต่ละก้อนน้อยลง

2.2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวกับผิวทางระบายน้ำ

ผิวทางระบายน้ำเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ภายหลังการบดอัดแล้วมีช่องว่างอากาศค่อนข้างมาก (โดยทั่วไปประมาณ 18 - 25 %) ใช้ในการปูทับบนผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง เพื่อให้สามารถระบายน้ำออกจากผิวทางได้เร็ว

ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน (binder) ต้องเพียงพอสำหรับการเคลือบมวลรวม แต่ต้องไม่มากเกินไป เพราะจะทำให้ปริมาณช่องว่างอากาศลดต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ และทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างที่ปูผิวทางหรือใช้งานได้ นอกจากนี้เนื่องจากผิวทางระบายน้ำจะต้องรักษาให้มีปริมาณช่องว่างอากาศสูง ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานนี้อาจเย็นไหลออกมาได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการใช้วัสดุอื่นๆ มาผสม เช่น ใช้โพลีเมอร์มาผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเกาะยึด เป็นต้น

ในการออกแบบผิวทางระบายน้ำนั้น คำนึงถึงการระบายน้ำบนผิวทางลงสู่ข้างใต้ผิวทางให้ได้เร็วเป็นสำคัญ เพื่อช่วยเพิ่มการสัมผัสของล้อของยานพาหนะกับผิวทางให้ดีขึ้นในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยเฉพาะในสภาพที่ผิวถนนเปียก นอกจากนี้ ผิวทางระบายน้ำยังช่วยลดการกระเด็นของละอองน้ำด้านหลังยานพาหนะ เมื่อยานพาหนะแล่นผ่าน ทั้งยังช่วยลดแสงสะท้อนจากผิวทางทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ทำให้ทัศนวิสัยของผู้ขับขี่ยานพาหนะดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นผิวทางระบายน้ำยังช่วยลดมลพิษทางเสียงทั้งภายในและภายนอกตัวรถ เนื่องจากช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมภายในผิวทางจะช่วยดูดซับเสียง ขณะที่ผิวทางระบายน้ำซึ่งเป็นผิวทางที่เรียบจะช่วยลดแรงกระแทกระหว่างผิวสัมผัสของล้อและผิวทาง

เนื่องจากผิวทางระบายน้ำมีช่องว่างอากาศมาก ทำให้ออกซิเจนและรังสีอุลตราไวโอเล็ตสัมผัสกับวัสดุประสานมากขึ้น ทำให้ผิวทางเกิดการออกซิเดชันเร็วขึ้น และทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์แข็งตัวเร็วขึ้น (Aging) ส่งผลให้อายุการใช้งานของผิวทางลดลง การผสมโพลีเมอร์ เช่น ยางธรรมชาติ aromatic-oil เป็นต้น มาช่วยในการผสมเป็นวัสดุประสาน เรียกว่า rubber-bitumen หรือ recycled elastomer ทำให้สามารถใช้ปริมาณของวัสดุประสานได้มากขึ้น จึงช่วยลดปัญหาในเรื่องยางแข็งตัวเร็วลง ทำให้ช่วยยืดอายุการใช้งานของผิวทางได้นานขึ้น

ปัจจัยที่ควรพิจารณาในการใช้ผิวทางระบายน้ำ ได้แก่

1. ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Content) คุณสมบัติการยึดเกาะที่อุณหภูมิสูงของวัสดุเชื่อมประสานจะต้องมีความเหมาะสม เพื่อไม่ให้วัสดุเชื่อมประสานไหลเต็มไปเต็มช่องว่างอากาศในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตของผิวทางระบายน้ำ
2. ขนาดคละ (Gradation) ของวัสดุรวมรวมที่นำมาใช้จะต้องเป็นแบบเปิด (open grade) เพื่อให้มีช่องว่างอากาศในส่วนผสมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมในการระบายน้ำได้ดี
3. การบดอัด (Compaction) จะต้องเหมาะสม เพื่อให้ผิวทางสามารถระบายน้ำได้ดี และมีความสามารถในการรับปริมาณการจราจรได้ในระดับที่ต้องการ
4. ปริมาณความชื้น (Moisture Content) มีผลต่อการยึดเกาะกับวัสดุรวมรวมของแอสฟัลต์ซีเมนต์

ประเภทของความเสียหายของผิวทางระบายน้ำ

- การแตกของผิวทางเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Reveling by freezing) ในเขตที่มีอากาศหนาวจัดในช่วงฤดูหนาว น้ำที่ซึมอยู่ในช่องว่างของผิวทางจะกลายเป็นน้ำแข็ง และขยายตัวดันผิวทางให้เสียหาย
- การหลุดล่อนของวัสดุรวมรวม (Reveling) โดยมากความเสียหายของผิวทางระบายน้ำจะเป็นในลักษณะนี้ การหลุดล่อนอาจเกิดขึ้นได้หากผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยเกินไป หรือใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติการยึดเกาะไม่ดี
- การสูญเสียคุณสมบัติการระบายน้ำ (Draindown) เกิดจากการเยิ้ม (Bleeding) ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งเป็นผลมาจากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไป หรือใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติการยึดเกาะไม่ดี
- การยุบตัวเป็นร่องล้อ (Rutting) เกิดจากการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไป หรือขนาดคละไม่ดี

2.2.2 แนวคิดและทฤษฎีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะนำเสนอทฤษฎีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา ได้แก่ นิยามและลักษณะสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานทาง ข้อกำหนด เครื่องมือและลักษณะการทดสอบต่าง ๆ

2.2.2.1 แอสฟัลต์ (Asphalt)

แอสฟัลต์ คือ วัสดุเชื่อมประสาน (Binder) สีน้ำตาลเข้มถึงดำ มีบิทูเมน (Bitumen) เป็นส่วนประกอบหลัก เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ บิทูเมนเป็น

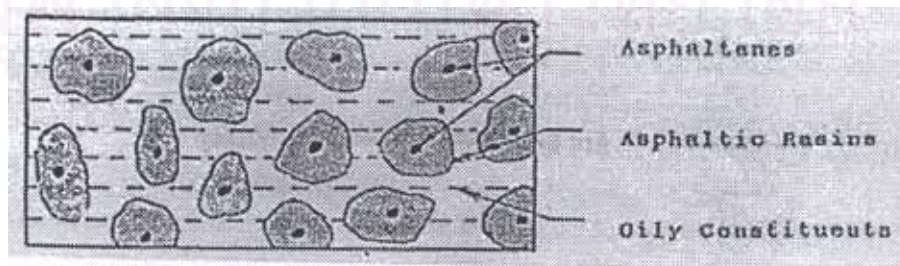
สารที่ประกอบด้วยโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 300–5,000 หน่วย มีคุณสมบัติยึดประสานและมีสภาพเป็นของแข็ง กึ่งของแข็ง หรือเหนียวหนืด มีสีดำหรือค่อนข้างดำ สามารถละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ได้ นอกจากโมเลกุลประเภทไฮโดรคาร์บอนแล้ว แอสฟัลต์ยังมีองค์ประกอบเป็นธาตุอื่นๆ ที่รวมเรียกว่า Heteroatom เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และนิกเกิล อีกด้วย สัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามแหล่งของน้ำมันดิบ มีผลให้คุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์จึงแตกต่างกัน แอสฟัลต์มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและได้จากการผลิต แอสฟัลต์จึงจัดเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีลักษณะค่อนข้างแข็งที่อุณหภูมิปกติ เมื่อให้ความร้อนจะมีลักษณะอ่อนและไหลได้ คุณสมบัตินี้ เรียกว่า Thermoplastic properties เมื่อนำมาแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับวัสดุมวลรวมที่สถานะของเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง จะมีลักษณะแข็งและยึดมวลรวมไว้ด้วยกัน เกิดเป็นชั้นผิวจราจรของผิวทางได้ ดังนั้น จึงนิยมใช้แอสฟัลต์เป็นวัสดุปูผิวทาง

แบบจำลององค์ประกอบโมเลกุลของวัสดุแอสฟัลต์

ปัจจุบันมีแบบจำลองที่ใช้อธิบายองค์ประกอบโมเลกุลของแอสฟัลต์อยู่ 2 แบบ แบบจำลองแรกเรียกว่า แบบจำลอง Micellar ซึ่งอธิบายว่าเมื่อวิเคราะห์ทางกายภาพแล้ว แอสฟัลต์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ Asphaltenes Asphaltic Rasins และ Oily Constituents แบบจำลองนี้ได้รับการยอมรับในการใช้อธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์มาเป็นเวลานาน จนกระทั่งคณะวิจัยของ Strategic Highway Research Program (SHRP) ของรัฐบาลกลางอเมริกันได้ทำการวิจัยจนพบแบบจำลองที่สามารถเข้าใจและอธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์ได้ชัดเจนมากขึ้น แบบจำลองนี้เรียกว่าแบบจำลอง SHRP

แบบจำลอง Micellar

แบบจำลองนี้อธิบายองค์ประกอบของแอสฟัลต์ว่าประกอบขึ้นจากส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ 1) Asphaltenes 2) Asphaltic Rasins และ 3) 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 มีลักษณะแข็งและเปราะที่อุณหภูมิห้อง สามารถบดให้ละเอียดได้ จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ละลายได้เมื่ออุณหภูมิสูง ประมาณ 93 องศาเซลเซียส และยังสามารถละลายได้ใน n – Heptane มีอัตราส่วน C : H ระหว่าง 0.6–0.8
- *Oily Constituents* เป็นส่วนที่เหลือจากการแยก Asphaltenes และ Asphalt Rasins ออกจากกัน มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีน้ำตาลแก่หรือน้ำตาลแกมแดง มีอัตราส่วน C : H น้อยกว่า 0.6

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

แบบจำลอง SHRP

แบบจำลองแบบใหม่นี้ ได้เสนอว่าแอสฟัลต์ประกอบขึ้นด้วยส่วนผสมที่กลมกลืนกันของหลายโมเลกุลที่แตกต่างกัน อาจแยกได้เป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ โมเลกุลที่มีขั้วและโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว โมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะทำหน้าที่เป็นโครงยึดเกาะโมเลกุลที่มีขั้ว โดยโครงข่ายของโมเลกุลที่มีขั้วนั้น จะยึดกันอยู่อย่างไม่แข็งแรงทำให้วัสดุแอสฟัลต์มีคุณลักษณะของการยืดหยุ่น (Elastic properties) โมเลกุลที่มีขั้วดังกล่าวจะกระจายอยู่ทั่วไปในแอสฟัลต์ เมื่อถูกทำให้ร้อน แรงยึดเกาะที่อ่อนแออยู่แล้วจะถูกทำลายลง ทำให้แอสฟัลต์มีสภาพเป็นของไหลที่อุณหภูมิสูง แอสฟัลต์ที่ดี ต้องมีการถ่วงดุลที่เหมาะสมระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลที่แท้จริงของโมเลกุลที่ไม่มีขั้วยังมีความสำคัญต่อพฤติกรรมของวัสดุแอสฟัลต์ โดยเฉพาะคุณภาพที่อุณหภูมิต่ำด้วย ดังนั้นแอสฟัลต์ที่มีโมเลกุลที่มีขั้วมากเกินไปจึงมีลักษณะแข็งเปราะง่าย ทำให้มักเกิดปัญหาการแตกร้าว ในทางกลับกันหากแอสฟัลต์มีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วมากเกินไปหรือมี

โมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกินไป ก็จะทำให้เกิดการอ่อนตัวของแอสฟัลต์หรือนำไปสู่ปัญหาการเกิดร่องล้อ (Rutting) บนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้

ปัจจุบันมีการนำแอสฟัลต์ไปใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีสมบัติที่สำคัญ 6 ประการ ดังนี้

- สมบัติในการยึดและประสาน (Cementing)
- สมบัติในการป้องกันการซึมของน้ำ (Water proofing)
- สมบัติในการเปลี่ยนเป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อถูกความเย็น (Thermoplastic)
- สมบัติในการคงทนต่อสภาวะแวดล้อม (Durability) เช่น กรดและด่างอ่อน ๆ
- สมบัติในด้านการเป็นฉนวน (Non-Conducting)
- สมบัติในด้านการยืดหยุ่น (Elasticity)

จากสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำแอสฟัลต์มาใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมาย โดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นตัวประสานหรือยึดเกาะวัสดุต่างๆ ในการทำผิวทาง นอกจากนี้ยังใช้แอสฟัลต์ในการลาดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ หรือผิวหน้าเขื่อนดินเพื่อป้องกันน้ำซึมได้ ทั้งยังใช้ในวงการอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ทำสีกันสนิม กระดาษกันซึม กระเบื้องยางปูพื้น เคลือบภายในท่อน้ำ เป็นต้น

ชนิดของแอสฟัลต์

แอสฟัลต์สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 2 ชนิด คือ

แอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ พบตามแหล่งต่างๆ ที่มีลักษณะเป็นบึง เนื่องจากเมื่อน้ำมันดิบตามธรรมชาติใต้ผิวโลกถูกกระทำภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น ลม และความร้อนจากแสงอาทิตย์ ส่วนประกอบที่เป็นก๊าซหรือน้ำมันระเหยง่ายก็จะแยกตัวออกไป เหลือเพียงแอสฟัลต์รวมตัวอยู่ด้วยกัน โดยอาจแทรกอยู่ในชั้นหิน เรียกว่า Rock asphalt ซึ่งส่วนใหญ่เป็นหินปูนที่มีแอสฟัลต์ซึมอยู่จนอิมตัว

แอสฟัลต์ที่เกิดจากการผลิต เป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ (Residual materials) หรือที่เรียกว่า Topped crude ซึ่งยังมีลักษณะค่อนข้างเหลว เนื่องจากยังมีส่วนที่เป็นน้ำมันต่างๆ เหลืออยู่ เมื่อแยกน้ำมันออกไปจะได้แอสฟัลต์ที่มีความข้นเหลวและความแข็งมากน้อยตามความต้องการ

ประเภทของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง

แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เป็นสารหรือผลิตภัณฑ์พื้นฐานหลักที่เหลือจากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ (Residual product) เนื่องจากไม่ระเหย มีลักษณะกึ่งอ่อนกึ่งแข็งที่อุณหภูมิปกติ มีสีดำหรือ สีน้ำตาลปนดำ ในการนำไปใช้งานจะต้องต้มให้เหลวโดยใช้อุณหภูมิ 100–150 องศาเซลเซียส

แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถแบ่งเกรดต่าง ๆ ได้ 3 ชนิด ตามผู้ผลิตกำหนด คือ

Penetration Grade เป็นแอสฟัลต์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง มีเกรดมาตรฐาน 5 เกรด ได้แก่ 40-50 60-70 80-100 120-150 และ 200-300 เพื่อให้สามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมกับงานและสภาพดินฟ้าอากาศของแต่ละพื้นที่ เช่น ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศในเขตร้อนควรใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เกรดค่อนข้างต่ำ คือ 60-70 ขณะที่ประเทศในเขตหนาวอาจต้องใช้ถึงเกรด 120-150 หรือสูงกว่า ในประเทศไทยกรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทนี้ไว้ใน ทล.-ก 401/2531 ตาม มอก. 851–2542 ค่า Penetration ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะเท่ากับ จำนวนหน่วยของระยะ (1 หน่วย = 0.1 มิลลิเมตร) ที่เข็มมาตรฐานซึ่งถูกกดด้วยน้ำหนัก 100 กรัม จมลงในแอสฟัลต์เป็นเวลา 5 วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น เข็มจมลงไป 10 มิลลิเมตร ค่า Penetration = $10/0.1$ หรือเท่ากับ 100

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

Hard Grade เป็นการนำแอสฟัลต์ชนิด Penetration Grade ไปกลั่นต่อภายใต้
 สูญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้ได้แอสฟัลต์ที่มีความแข็งมากขึ้น เช่น H 80/90 จะหมายถึง

H คือ Hard

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

ในการทำผิวทางจะต้องทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ในสภาพของเหลวด้วยความร้อน จากนั้น
 จึงผสมกับวัสดุมวลรวมต่าง ๆ แล้วจึงบดอัด เมื่อปล่อยให้เย็นลงแอสฟัลต์ซีเมนต์จะเคลือบวัสดุ
 มวลรวมและจับตัวเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดความแข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักการจราจรได้

แอสฟัลต์ชนิดเหลว (Liquid asphalt)

คัตแบคแอสฟัลต์ (Cutback asphalt) เป็นการนำแอสฟัลต์ซีเมนต์ไปละลายใน
 ตัวทำละลาย (Solvents) ซึ่งได้แก่น้ำมันต่าง ๆ เช่น Neptha (Gasoline) Kerosine และ Diesel
 oil น้ำมันที่ใช้เป็นสารละลายนี้เรียกรวมกันว่า Diluent หรือ Cutler stock แอสฟัลต์ชนิดนี้มี
 ลักษณะเหลวที่อุณหภูมิธรรมดา แต่จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และ
 Cutler stock ตลอดจนสัดส่วนระหว่างแอสฟัลต์กับ Cutler stock การใช้งานแอสฟัลต์ชนิดนี้ เมื่อบด
 อัดแล้วจะปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยไป เหลือเพียงแต่แอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งทำหน้าที่ประสาน
 วัสดุมวลรวมเข้าด้วยกัน กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานของคัตแบคแอสฟัลต์ไว้ตามมาตรฐาน
 ทล.-ก. 402/2531 และ ทล.-ก. 403/2531 โดยคัตแบคแอสฟัลต์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตาม
 ชนิดตัวทำละลาย คือ

- **ชนิดแข็งตัวเร็ว (Rapid Curing : RC)** ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลายที่
 ระเหยเร็ว ได้แก่ Neptha (Gasoline) แอสฟัลต์ชนิดนี้จะแข็งตัวเร็ว ส่วนมากใช้กับงาน
 Surface treatment
- **ชนิดแข็งตัวเร็วปานกลาง (Medium Curing : MC)** ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัว
 ทำละลายที่ระเหยเร็วปานกลาง ได้แก่ Kerosine จะมีการแข็งตัวช้ากว่าชนิด RC การใช้งาน
 ต้องใช้เวลาในการบ่มตัวนาน (Curing) ส่วนมากใช้กับงาน Prime coat และ Tack coat เพื่อ
 ให้ MC มีโอกาสซึมลงไปใต้ผิว Base course ได้มากขึ้น
- **ชนิดแข็งตัวช้า (Slow Curing : SC)** ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์กับน้ำมันที่ระเหยช้า
 ได้แก่ Diesel fuel oil หรืออาจผลิตได้จากการกลั่นโดยตรง มักนิยมเรียกว่า Road oils
 ส่วนมากใช้ทำ Road mix หรือใช้ในงานซ่อม (Patching) แต่ไม่นิยมใช้ในประเทศไทย

อิมัลชันแอสฟัลต์ (Emulsion asphalt)

อิมัลชันแอสฟัลต์ คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ถูกตีให้แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ (Colloidal particles) กระจายอยู่ในน้ำที่มี Emulsifier ผสมอยู่เล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.25 – 2 โดยน้ำหนัก อิมัลชันแอสฟัลต์ผลิตได้โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสผสมกับน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 170 องศาเซลเซียส โดยมีสารเคมีที่ช่วยในการให้อนุภาคของแอสฟัลต์กระจายตัวซึ่งเรียกว่า Emulsifier ผสมอยู่ น้ำและแอสฟัลต์จะถูกตีด้วยเครื่อง Colloidal mill ทำให้แอสฟัลต์แตกตัวเป็นอนุภาคเล็ก ๆ กระจายอยู่ในน้ำ ในอิมัลชันแอสฟัลต์จะมีแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณ 55 – 70% ที่เหลือจะเป็นน้ำทั้งหมด

Emulsifier เป็นตัวกำหนดสมบัติของอิมัลชันแอสฟัลต์ตามชนิดของประจุ คือ ชนิดประจุไฟฟ้าลบ (Anionic) ชนิดประจุไฟฟ้าบวก (Cationic) และชนิดที่เป็นกลาง (Nonionic) ในการก่อสร้างจะใช้ทั้งชนิดที่ให้ประจุไฟฟ้าบวกและที่ให้ประจุไฟฟ้าลบ ขณะที่ในงานสร้างถนนจะนิยมใช้ Cationic emulsified asphalt มากกว่า Anionic emulsified asphalt เนื่องจากหินที่ใช้ในการก่อสร้างมีผิวที่เป็นประจุลบ ตรงข้ามกับ Asphalt particle ของ Cationic emulsified asphalt แอสฟัลต์ชนิดนี้จึงมักในงานประเภท Penetration Macadam Surface treatment Prime coat Tack coat และ Seal coat เป็นต้น และเนื่องจากแอสฟัลต์ชนิดนี้มีน้ำเป็นส่วนผสม จึงสามารถนำไปใช้งานโดยผสมกับส่วนอื่นที่เป็นน้ำได้ทั้งยังสามารถทำงานในขณะที่วัสดุอื่นๆ เปียกน้ำได้อีกด้วย 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

2.2.2.2 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt concrete)

แอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง วัสดุผิวทางที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์ และมวลรวม ผสมกันในขณะร้อนด้วยอุณหภูมิสูงในเครื่องผสม จากนั้นจึงนำไปปูลาดทำเป็นผิวทางถนนในขณะที่ส่วนผสมยังคงร้อนอยู่แล้วบดอัดให้แน่นและเรียบเป็นถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีผิวทางคุณภาพดี แข็งแรง สีค่อนข้างดำ รองรับปริมาณการจราจรที่หนาแน่นมาก ๆ ได้ รู้จักกันดีในชื่อของ แบล็กท็อป (Blacktop) หรือส่วนผสมร้อน (Hot mix) แอสฟัลต์คอนกรีตนี้ มักนิยมใช้สำหรับถนนลาดยางคุณภาพดีทั่ว ๆ ไป รวมถึงลานจอดรถขนาดใหญ่ แต่จะไม่นิยมนำไปใช้สร้างถนนในชนบทหรือถนนที่มีปริมาณการจราจรเบาบางมาก เนื่องจากไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนในการก่อสร้าง ถนนลาดยางประเภทผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนี้จัดเป็นถนนที่มีความปลอดภัย มีเสถียรภาพและทนทานดี คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวม ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของส่วนผสม ตลอดจนสัดส่วนที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมและกระบวนการในการผลิตส่วนผสม

ในแอสฟัลต์คอนกรีต จะมีปริมาณสัมพัทธ์ระหว่างมวลรวม แอสฟัลต์ และอากาศ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต แอสฟัลต์ที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคมวลรวมจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานอนุภาคมวลรวมให้เกาะติดกันแน่นไม่หลุดลอกง่าย จึงเรียกว่าแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective asphalt) แอสฟัลต์บางส่วนจะถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของมวลรวม และช่องว่างอากาศ (Air void) ที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่มีแอสฟัลต์เคลือบอยู่ โดยทั่วไปปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมนี้จะน้อยกว่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของวัสดุมวลรวมชนิดนั้นได้ประมาณร้อยละ 50

องค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต

ความหนาแน่น (Density) ของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง มวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากพอจะมีอายุการใช้งานนานและมีคุณภาพดี โดยทั่วไปการบดอัดด้วยรถบดในสนามจะได้ความหนาแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นจากการบดอัดด้วยเครื่องมือในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นความหนาแน่นที่ออกแบบไว้ ดังนั้นการกำหนดค่าความหนาแน่นต่ำสุดที่ต้องบดอัดให้ได้ในสนามจึงกำหนดเป็นค่าร้อยละของความหนาแน่นที่ทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ ดังที่กรมทางหลวงได้กำหนดว่าการบดอัดต้องให้ได้ความหนาแน่นไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของความหนาแน่นที่ทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ

ช่องว่างอากาศ (Air Void : AV) ของแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง ช่องว่างเล็ก ๆ ที่อยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมที่เคลือบด้วยแอสฟัลต์ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้รับการบดอัดแล้วจะต้องมีปริมาณช่องว่างอากาศเพียงพอ หลังจากที่เปิดใช้การจราจรแล้ว ยานพาหนะที่แล่นบนผิวทางจะทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแน่นขึ้นกว่าเดิม และมีปริมาณช่องว่างอากาศลดลง ดังนั้นหากปริมาณช่องว่างอากาศของผิวทางที่ก่อสร้างเสร็จใหม่มีไม่เพียงพอ จะทำให้แอสฟัลต์ทะลักขึ้นมาบนผิวหน้าของถนนได้ นอกจากนี้ช่องว่างอากาศยังเป็นที่รองรับแอสฟัลต์ที่ขยายตัวเมื่ออากาศร้อนอีกด้วย

ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate : VMA) หมายถึง ปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างอนุภาคของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งรวมถึงช่องว่างที่ถูกแอสฟัลต์แทนที่ด้วย (Voids Filled with Asphalt : VFA) ดังนั้นช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมจึงเป็นปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์รวมกับปริมาณช่องว่างอากาศ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า $VMA = VFA + AV$ ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากัน แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA สูงกว่าจะมีความทนทานต่อการใช้งานนานกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า VMA ต่ำกว่า เนื่องจากมวลรวมที่มีค่า VMA สูงกว่า ย่อมมีปริมาตรช่องว่างสำหรับใส่แอสฟัลต์ได้มากกว่า ทำให้ได้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มผิวอนุภาคของมวลรวมหนากว่า แอสฟัลต์คอนกรีตจึงมีความทนทาน และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น (Aging resistance) ถึงแม้ส่วนผสมที่มีค่า VMA น้อยกว่าข้อกำหนดจะประหยัดกว่า เนื่องจากใช้ปริมาณแอสฟัลต์ผสมน้อยลง แต่ก็จะทำให้ได้ผิวทางที่มีความคงทนลดลงด้วย

ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt content) ในแอสฟัลต์คอนกรีต มีผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นอย่างมาก ดังนั้น ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้จะต้องถูกต้องและแน่นอน ไม่ว่าจะเป็นการผสมในห้องปฏิบัติการหรือที่โรงผสมในสนาม ข้อกำหนดต่างๆ เกี่ยวกับคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการในการออกแบบจะเป็นตัวกำหนดปริมาณแอสฟัลต์ที่ต้องใช้ในส่วนผสม

ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวมได้แก่ ขนาดคละและคุณสมบัติในการดูดซึมแอสฟัลต์ มวลรวมที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก จะต้องการแอสฟัลต์สำหรับผสมมากกว่ามวลรวมที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ เหตุผลคือในปริมาตรที่เท่ากันมวลรวมที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่ามวลรวมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

ใหญ่ จึงต้องใช้แอสฟัลต์มากกว่าเพื่อเคลือบผิวอนุภาคของมวลรวม ส่วนมวลรวมที่ดูดซึมแอสฟัลต์มากก็ต้องใช้แอสฟัลต์ผสมมากเพื่อชดเชยส่วนที่ถูกดูดซึมไป

เสถียรภาพและการไหล (Stability and Flow) ค่าเสถียรภาพ หมายถึงความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจรได้โดยไม่เกิดร่องล้อหรือเป็นคลื่น หรือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผิดไปจากเดิม (Deformation) เป็นค่าความต้านทานแรงกดสูงสุดโดยทดสอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ส่วนค่าการไหล เป็นการวัดค่าการเคลื่อนที่ หรือหน่วยการยวบตัว (Strain) โดยวัดจากระยะทางที่แอสฟัลต์คอนกรีตยวบตัวลงขณะที่ไม่มีแรงกระทำ เทียบกับขณะที่มีแรงกระทำสูงสุดของเสถียรภาพ เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในและแรงยึดประสานระหว่างอนุภาคของมวลรวม ซึ่งจะช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาคของมวลรวมเกิดการเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันเมื่อมีน้ำหนักของยานพาหนะมากระทำ

โดยทั่วไปวัสดุมวลรวมที่มีรูปร่างและอนุภาคเป็นเม็ดเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพสูง แรงยึดเกาะจะมีค่ามากหากแอสฟัลต์ที่ใช้มีความหนืดสูงที่อุณหภูมิต่ำ การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมจะทำให้ค่าแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์จนถึงระดับหนึ่ง จะทำให้แอสฟัลต์ที่เคลือบอนุภาคของมวลรวมหนานั้นเกินไป เป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมมีค่าลดลง และทำให้เสถียรภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้น ในการออกแบบส่วนผสมจึงต้องออกแบบให้มีเสถียรภาพสูงพอที่จะรับน้ำหนักการจราจรได้ อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงด้วยว่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไปจนขาดความยืดหยุ่น และอาจทำให้ผิวทางเกิดความเสียหายได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แอสฟัลต์คอนกรีตปูลงบนผิวทางเดิมที่มีการแอ่นตัวสูง

ปัจจุบัน การสร้างถนนแอสฟัลต์ส่วนใหญ่มักเป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense grade mixtures โดยแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดเกรด 60-70 ในสัดส่วนปริมาณ 3 - 8% โดยน้ำหนักของมวลรวม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของงาน

การเตรียมการก่อสร้างผิวทางแบบแอสฟัลต์คอนกรีตจะกระทำ ดังนี้

- ชั้นรองพื้นทาง ชั้นพื้นทาง และไหล่ทางต้องเรียบสม่ำเสมอได้มาตรฐาน
- ทำ Prime coat หรือในบางกรณีอาจจำเป็นต้องทำ Tack coat
- มวลรวมก่อนผสมต้องทำให้ร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 163 ± 8 องศาเซลเซียส และมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของมวลรวม

- แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดจะจัดเก็บในถังเก็บจะต้องมีอุณหภูมิไม่สูงเกิน 100 องศาเซลเซียส และเมื่อผสมกับมวลรวมต้องทำให้ร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 159 ± 8 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความหนืดคิเนแมติก 170 ± 20 เซนติสโตกส์
- เมื่อผสมเสร็จแล้วก่อนนำออกจากโรงงานผสมไปใช้ จะต้องมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงระหว่าง 121–168 องศาเซลเซียส
- ในการเทลาดถนนอุณหภูมิจะต้องไม่ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิที่แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความหนืดคิเนแมติก 280 ± 30 เซนติสโตกส์ แล้วทำการบดอัดทันที
- ขอปฏิบัติอื่น ๆ ให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ทล.-ม 408/2532 ของกรมทางหลวง

2.2.2.3 วัสดุมวลรวม (Aggregates)

วัสดุมวลรวมที่ใช้สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต สามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด คือ

มวลรวมหยาบ คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 4.75 มิลลิเมตร หรือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4

มวลรวมละเอียด คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.075 - 4.75 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 เช่น หินฝุ่นหรือทราย

วัสดุผสมแทรก คือ มวลรวมที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก กล่าวคือเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเติมส่วนละเอียดให้มากขึ้น ส่วนละเอียดนี้เป็นส่วนสำคัญในการผลิตวัสดุผสมที่แข็งแรงและมีเกรดแน่น (Dense grade) โดยทั่วไป ทรายธรรมชาติจะมีส่วนละเอียดที่ต้องการนี้ในปริมาณน้อย วัสดุผสมแทรกอาจเป็น Stone dust Portland cement Silica cement Hydrated lime และอื่น ๆ ตามข้อกำหนด ทล.-ท.205/2517 ของกรมทางหลวง ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ขนาดคละของวัสดุผสมแทรก

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

คุณสมบัติของวัสดุผสมรวมที่มีคุณภาพดีจะต้องมีลักษณะดังนี้

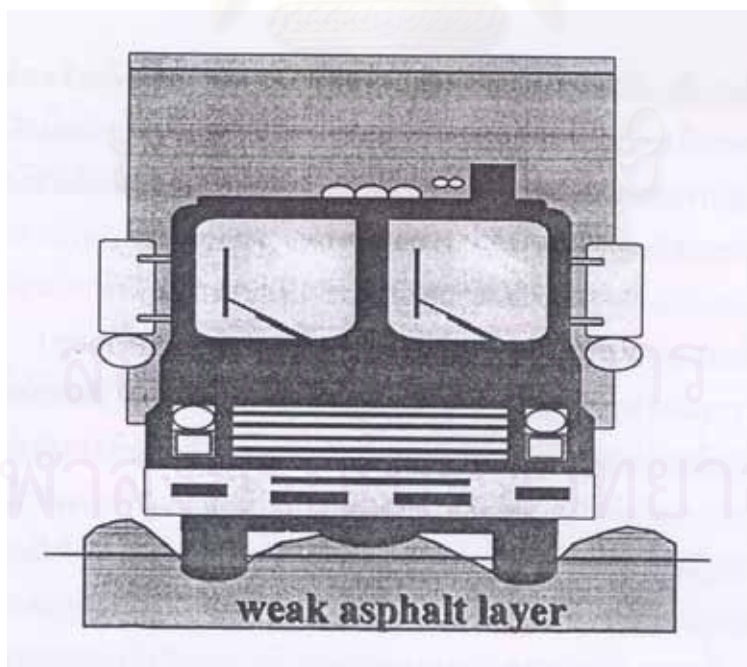
- **ขนาดคละดี** เพื่อให้ส่วนผสมแน่น หากมีความจำเป็นอาจใช้วัสดุผสมแทรกร่วมด้วย เพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่ส่วนผสม
- **แข็ง** เพื่อดำเนินงานการสึกหรอและการขีดสีจากการจราจร
- **คงทน** เพื่อดำเนินงานการแตกร้าวจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
- **ผิวขรุขระหยาบ** เพื่อให้มีแรงเสียดทานมากขึ้นและมีผิวหน้าที่ยึดเกาะกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดีขึ้น
- **รูปร่างลูกบาศก์** เนื่องจากอนุภาครูปร่างแบนยาวมีโอกาสแตกได้ง่าย
- **เกลียดน้ำ** หรือที่เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก มวลรวมจำพวกซิลิกา เช่น ควอร์ตซ์ เป็นพวกชอบน้ำ ที่เรียกว่า ไฮโดรฟิลิก หมายถึง ยึดเกาะกับน้ำได้ดีกว่ายึดเกาะกับแอสฟัลต์เนื่องจากประจุที่อยู่ผิวหน้าของอนุภาคมวลรวม เป็นสาเหตุให้เกิดการหลุดลอกของแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวอนุภาคของมวลรวมที่มีน้ำห่อหุ้มอยู่
- **ปราศจากสารที่เป็นอันตราย** วัสดุจำพวกอนุภาคของดินเหนียว ฝุ่น สิ่งสกปรก และส่วนที่มีน้ำหนักเบา อาจทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่เคลือบผิวอนุภาคของมวลรวมมีคุณภาพต่ำลงหรืออาจทำให้อนุภาคบางอนุภาคเกิดการแตกได้

2.2.2.4 ปัญหาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงจะอ่อนตัว แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำจะแตกเปราะ นอกจากนี้ปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ยังทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดปัญหาชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสูงขึ้น ลักษณะความเสียหายที่พบมีดังนี้

ผิวทางเยิ้ม (Bleeding) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุแอสฟัลต์ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไหลขึ้นมาวมกันที่ผิวหน้าเมื่ออุณหภูมิสูงหลังจากได้รับน้ำหนักบรรทุก โดยแอสฟัลต์จะไหลเยิ้มทำให้ผิวทางลื่น ลักษณะดังกล่าวเกิดจากแอสฟัลต์มีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) และมีค่าความว่องไวต่อ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) สูงมาก หรือเกิดจากปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt content) ที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมไม่ถูกต้อง อาจมีปริมาณมากเกินไป นอกจากนี้ อาจมีสาเหตุมาจากวัสดุแอสฟัลต์มีจุดอ่อนตัว (Softening point) ต่ำทำให้แอสฟัลต์อ่อนตัวง่าย ก่อให้เกิดร่องล้อ (Rutting) ที่ผิวทางขึ้นได้

ผิวทางเกิดการยุบตัวถาวร (Permanent deformation) การยุบตัวถาวรเป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นผิวทางหรือชั้นโครงสร้างทางถาวร โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุกที่แล่นผ่านหรือบริเวณที่มีการหยุดของรถบรรทุกหนักการยุบตัวถาวรอาจเกิดขึ้นเฉพาะที่ชั้นผิวทางหรือเฉพาะที่ชั้นโครงสร้างทาง หรือเกิดขึ้นทั้งที่ชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทางก็ได้ สาเหตุของการยุบตัวอาจเกิดจากการที่ชั้นทางนั้นใช้วัสดุในการก่อสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพดีพอ ทำให้เกิดการยุบตัวเนื่องจากการทับถมหรือเกิดการไหลตัวของชั้นทางนั้นอย่างถาวร หรืออาจเกิดหลังจากที่ผิวทางมีการไหลเอี่ยม (Bleeding) ก็ได้ โดยทั่วไป การยุบตัวถาวรจะมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ การยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นขนานกับทิศทางจราจรในแนวร่องล้อของน้ำหนักรถบรรทุก เรียกว่า ร่องล้อ (Rutting) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางของจราจรซึ่งมักเกิดบริเวณที่การจราจรหยุดหรือเคลื่อนตัวช้า เรียกว่า Shoving ส่วนมากตามถนนในพื้นที่นอกเมืองจะพบการยุบตัวถาวรชนิด Rutting มากกว่าเพราะการจราจรเคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงกว่า ขณะที่พื้นที่ในเมืองนั้นมักจะพบทั้ง Rutting และ Shoving โดยเฉพาะบริเวณตามทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร บ้ายรถประจำทางหรือบริเวณที่มีการจราจรติดขัดเป็นประจำ เพราะการหยุดจอดบ่อยครั้งของการจราจรที่มีน้ำหนักรถบรรทุกมากในบริเวณดังกล่าว ทำให้เกิด Shoving ได้ง่าย นอกจากนี้คุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ก็เป็นส่วนสำคัญที่จะส่งผลต่อการยุบตัวถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเช่นกัน

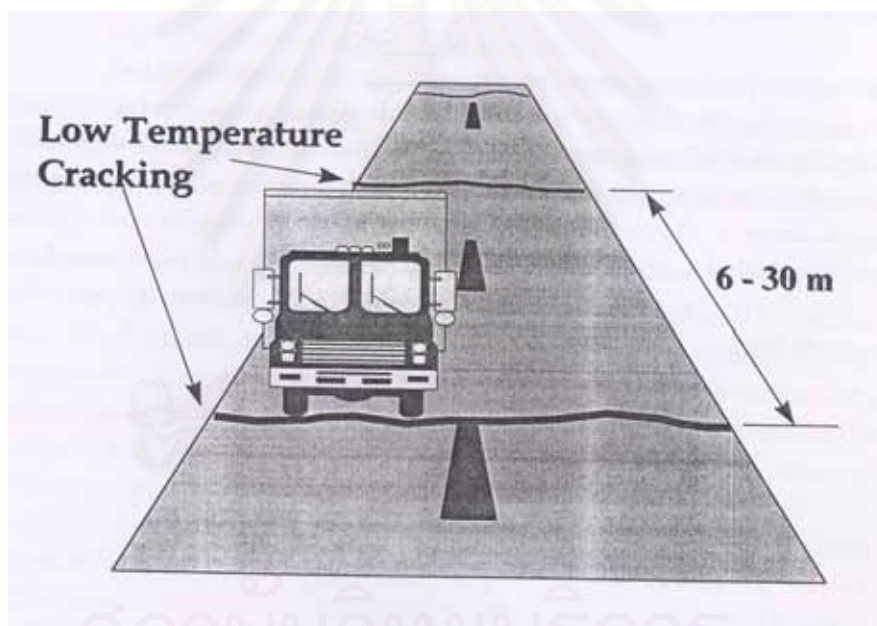


รูปที่ 2.5 การยุบตัวถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal cracking)

การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น สาเหตุเกิดจากแรงเค้นดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เย็นจัด (ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง) อย่างรวดเร็ว เมื่อแรงเค้นดึงนี้มีค่ามากเกินกว่าค่ากำลังรับแรงดึงของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถรับได้ ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น ลักษณะของรอยแตกร้าวจะเป็นรอยแตกตามแนวขวางกับทิศทางการจราจร ดังแสดงในรูปที่ 2.6

การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นผลโดยตรงจากคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์จะมีลักษณะแข็งและเปราะ ง่ายต่อการแตกร้าว คุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันตามเกรด แหล่งน้ำมันดิบ อายุ และอัตราการเกิดความเครียดของวัสดุแอสฟัลต์ จากการสังเกตพบว่า วัสดุแอสฟัลต์ที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนของอุณหภูมิสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวสูงเช่นกัน

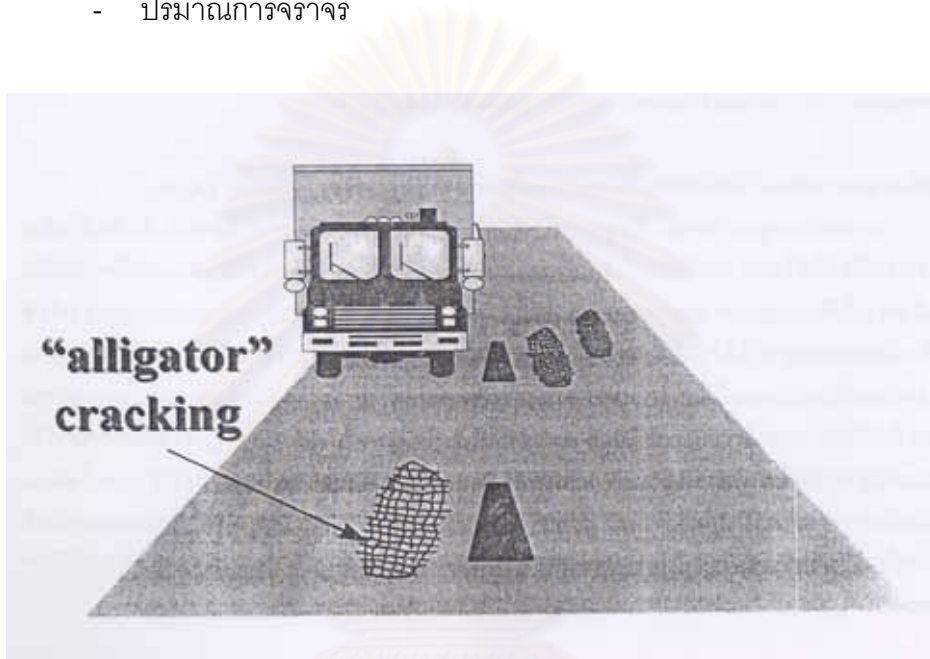


รูปที่ 2.6 การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking)

การแตกร้าวเนื่องจากความล้าจากการรับน้ำหนักบรรทุกบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เกิดจากการที่ผิวทางต้องรับน้ำหนักจากการจราจรซ้ำไปซ้ำมาเป็นระยะเวลานานจนเกิดความล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักในลักษณะซ้ำซาก ได้แก่

- การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง
- คุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณช่องว่างระหว่างวัสดุรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- คุณภาพในสนามของวัสดุชั้นทาง
- อุณหภูมิ
- ปริมาณการจราจร



รูปที่ 2.7 การแตกกร้าวเนื่องจากความล้าของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น (Moisture damage) การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้นนั้นไม่ใช่ความเสียหายของถนน แต่เป็นผลกระทบหลักที่จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น เนื่องจากความชื้นจะทำลายการยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุรวมกับวัสดุแอสฟัลต์ ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุรวมจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เรียกว่า Raveling เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อน เนื่องจากวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของวัสดุแอสฟัลต์ ถูกแรงเฉือนจากล้อรถตะกั่วจนหลุดออก ทำให้ผิวทางหยาบขรุขระ มีลักษณะเป็นหน้าข้าวตัง และมีหินใหญ่โผล่ ความเสียหายดังกล่าวทำให้โครงสร้างชั้นทางมีกำลังลดลง นำไปสู่การแตกกร้าวหรือการยุบตัวถาวรในแนวร่องล้อต่อไป

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Aging) การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ไม่ได้ก่อความเสียหายให้แก่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยตรง แต่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ในระยะเวลาดังกล่าว โดยแอสฟัลต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการแข็งเปราะ แม้ว่าการแข็งตัวของแอสฟัลต์ดังกล่าวจะเป็นผลดีต่อการต้านทานต่อการยุบตัวถาวร แต่หากเกิดการแข็งตัวมากเกินไปจนเปราะแล้ว จะทำให้เกิดการแตกร้าวและนำไปสู่การหลุดลอก (Stripping) ได้ ภาวะการเกิด Aging นี้ อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างขั้นตอนการผสมแอสฟัลต์กับมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และในระหว่างการใช้งานในสนาม ภาวะ Aging สามารถเกิดได้จาก 7 ปฏิกริยา ดังต่อไปนี้

- **ปฏิกริยา Oxidation** เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากออกซิเจนทำปฏิกริยากับวัสดุแอสฟัลต์ อัตราการเกิดปฏิกริยานี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุแอสฟัลต์ อุณหภูมิ และอัตราการกระจายตัวของออกซิเจน นอกจากนี้ ความพรุนของวัสดุมวลรวมก็มีส่วนเกี่ยวข้องด้วย ที่อุณหภูมิและความดันปกติ ปฏิกริยาระหว่างออกซิเจนและแอสฟัลต์จะเกิดขึ้นช้ามาก ปฏิกริยานี้มีผลทำให้ฟิล์มของแอสฟัลต์บนผิวทางมีความแข็งเป็นพิเศษ ซึ่งหากไม่มีการรบกวนใด ๆ ฟิล์มนี้ก็จะทำหน้าที่สกัดกั้นออกซิเจนและช่วยลดการเกิดปฏิกริยานี้ไม่ให้เกิดต่อเนื่องลงไปในชั้นผิวทาง แต่หากผิวทางเกิดแข็งเปราะขึ้นและเกิดรอยแตกจะทำให้เกิดปฏิกริยา Oxidation ต่อเนื่องในชั้นทางและเกิดการแตกร้าวอย่างต่อเนื่องได้
- **ปฏิกริยา Volatilization** เป็นปฏิกริยาการแยกระเหยของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบาจากวัสดุแอสฟัลต์ ปฏิกริยานี้จะเกิดได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการผสมแอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากแอสฟัลต์อยู่ในลักษณะของฟิล์มบางทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกริยา
- **ปฏิกริยา Polymerization** เป็นปฏิกริยาที่โมเลกุลขนาดเล็กของแอสฟัลต์หลาย ๆ โมเลกุลมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลให้เกิดการแข็งตัวขึ้น
- **ปฏิกริยา Thixotropy หรือ Steric hardening** เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของวัสดุแอสฟัลต์มีการยึดเกาะกันแน่นเมื่อถูกปล่อยไว้โดยปราศจากการรบกวนเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ถนนที่ปราศจากการสัญจรเป็นเวลานานจะเกิดการแข็งเปราะอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับถนนแบบเดียวกันที่มีการสัญจรไปมา

- **ปฏิกิริยา Syneresis** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในวัสดุแอสฟัลต์ โดยส่วนที่เป็นโมเลกุลเบาจะแยกตัวจากโมเลกุลหนักมาสู่ผิวของวัสดุแอสฟัลต์ และระเหยออกไป เป็นผลให้แอสฟัลต์โดยรวมเกิดการแข็งขึ้น
- **ปฏิกิริยา Separation** เป็นปฏิกิริยาการแยกตัวออกไปของส่วนที่เป็นของเหลวในแอสฟัลต์เช่นกัน แต่ในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากความพรุนของวัสดุรวม
- **ปฏิกิริยา Physical hardening** เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการที่วัสดุแอสฟัลต์อยู่ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำมาก ๆ แม้ว่าอุณหภูมิจะคงที่แต่แอสฟัลต์จะมีการแข็งตัวขึ้นอย่างต่อเนื่อง

วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาค่าความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเฉพาะถนนที่มีปริมาณการจราจรและปริมาณรถบรรทุกหนักสูง ก็คือ ต้องปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) เพื่อให้มีคุณสมบัติดังนี้

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

2.2.2.4 การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

แนวคิดของวิธีมาร์แชลในการออกแบบวัสดุส่วนผสมสำหรับถนนแอสฟัลต์กำหนดขึ้นโดยนาย บรูซ มาร์แชล วิศวกรบิฑูเมน กรมทางหลวงรัฐมิสซิสซิปปี ต่อมา the U.S. Corps of Engineers ได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงวิธีการและพัฒนาหลักเกณฑ์ในการออกแบบส่วนผสมจนกระทั่งได้วิธีการทดสอบที่ได้มาตรฐาน และกำหนดเป็นมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1559 และ AASHTO T245 ขึ้น

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

การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชล เป็นการใช้เครื่องทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เพื่อหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ เสถียรภาพ (Stability) การไหล (Flow) ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (Air void) หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) และค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (VFA) ในส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมวลรวมชนิดต่าง ๆ เพื่อนำไปหาค่าร้อยละของปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม (Optimum asphalt content) ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าร้อยละของช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 4

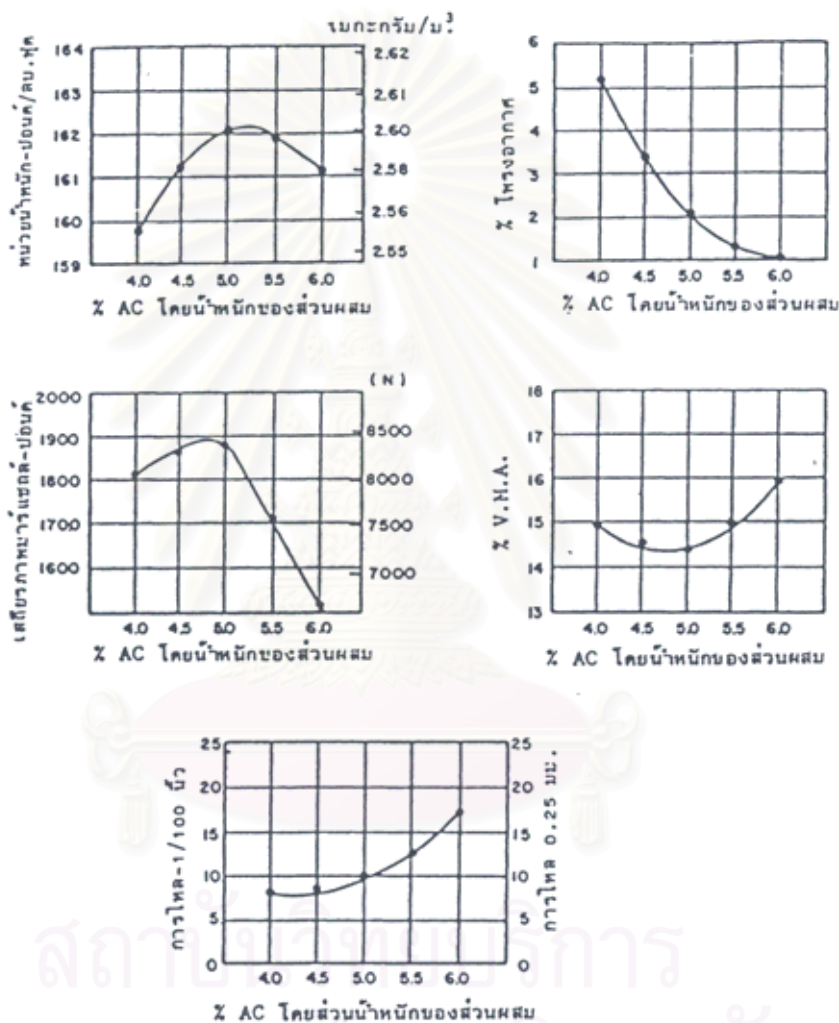


รูปที่ 2.8 เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพและการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาทำการคำนวณ แล้วเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดสอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

- ค่าเสถียรภาพมาร์แชล กับ ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าการไหลมาร์แชล กับ ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าร้อยละของปริมาณช่องว่างอากาศ กับ ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม

- ค่าร้อยละของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม กับ ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ กับ ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม
- ค่าหน่วยน้ำหนัก กับ ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนักของมวลรวม



รูปที่ 2.9 กราฟตัวอย่างข้อมูลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชล

เกณฑ์การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลสำหรับผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 เกณฑ์การทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

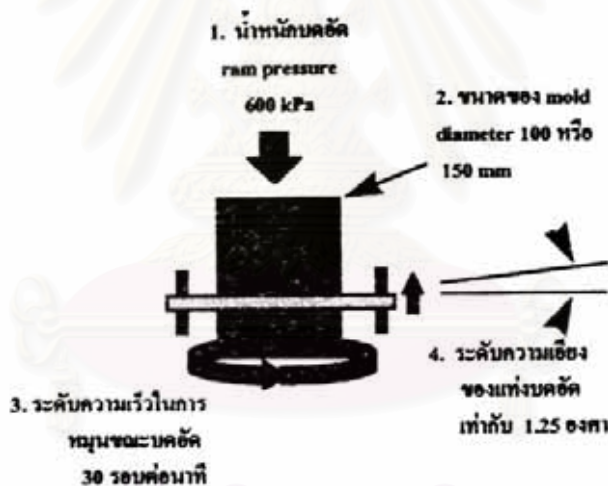
เกณฑ์ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล	ชั้นผิวทางและชั้นพื้นทาง					
	การจราจรเบาบาง		การจราจรปานกลาง		การจราจรหนาแน่น	
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
การบดอัด, จำนวนครั้งของการบดอัด ก้อนตัวอย่างแต่ละด้าน (No. of Blows/side)	35		50		75	
เสถียรภาพ , N (lb)	3,336 (750)	- -	5,338 (1200)	- -	8,006 (1800)	- -
การไหล, 0.25 มิลลิเมตร (0.01 นิ้ว)	8	18	8	16	8	14
ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (AV)	3	5	3	5	3	5
ค่าร้อยละของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (VFA)	70	80	65	78	65	75
ค่าร้อยละต่ำสุดของช่องว่างระหว่างอนุภาคของ มวลรวม (VMA) ของแต่ละขนาดของอนุภาค โตสุดที่ใช้เรียกขนาดของมวลรวม มิลลิเมตร นิ้ว	ค่าร้อยละของช่องว่างอากาศ (AV) ที่ออกแบบ					
	3		4		5	
	ค่าร้อยละต่ำสุดของ VMA					
1.18 No. 16	21.5		22.5		23.5	
2.36 No. 8	19.0		20.0		21.0	
4.75 No. 4	16.0		17.0		18.0	
9.5 3/8	14.0		15.0		16.0	
12.5 1/2	13.0		14.0		15.0	
19.0 3/4	12.0		13.0		14.0	
25.0 1.0	11.0		12.0		13.0	
37.5 1.5	10.0		11.0		12.0	
50 2.0	9.5		10.5		11.5	
63 2.5	9.0		10.0		11.0	

หมายเหตุ

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

2.2.2.5 การบดอัดก้อนวัสดุตัวอย่างโดย Superpave Gyratory Compactor

เครื่อง Superpave Gyratory Compactor (SGC) เป็นเครื่องมือกลึงอัตโนมัติที่สามารถควบคุมการให้น้ำหนักกดที่คงที่ โดยกระบวนการบดอัดจะเริ่มขึ้นเมื่อนำส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะทำการบดอัดบรรจุลงในแบบ (Mold) ซึ่งมีทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 และ 150 มิลลิเมตร จากนั้นนำ Mold ดังกล่าวเข้าติดตั้งกับส่วนฐานรับก้อนตัวอย่าง (Rotation base) ส่วนฐานนี้จะหมุนในอัตราเร็ว 30 รอบต่อนาที และจะรองรับ Mold ไว้ขณะทำการบดอัด ที่ฐานจะมีขอบเพื่อล็อกเข้ากับ Bearing ที่ทำหน้าที่บังคับวัสดุผสมใน Mold ให้ทำมุมเอียง 1.25 องศากับหัวของ Loading ram ซึ่งเป็นตัวควบคุมความดันที่กดลงบนวัสดุใน Mold ด้วยความดันคงที่ 0.6 MPa ขณะทำการบดอัดวัสดุในการหมุนแต่ละรอบ และมีระบบการวัดความสูงก้อนตัวอย่างขณะทำการบดอัดและบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 การบดอัดดังกล่าวเป็นการลอกเลียนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากสภาพจริงในสนามที่ล้อเหล็กของรถบดอัดทำกับผิวถนนขณะบดอัด



รูปที่ 2.10 ลักษณะการทำงานในการบดอัดด้วยเครื่อง Superpave Gyratory Compactor (SGC)

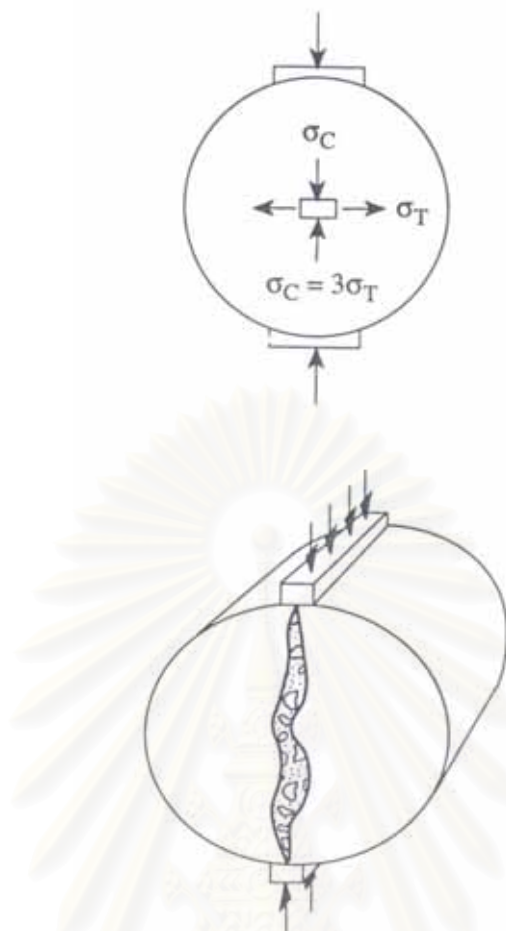
2.2.2.6 การทดสอบโดย Indirect Tensile Test

ทฤษฎี

การทดสอบแบบ Indirect Tensile Test เป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักที่เป็น Compression load ซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้งแบบ Static และแบบ Repeated / Dynamic load แล้วแต่กรณี โดยให้แรงกระทำในแนวขนานตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวตั้งของก้อนวัสดุ

ทดสอบ ตามทฤษฎีที่ Stresses พัฒนาขึ้น เนื่องจากการกระทำของแรงที่กระทำต่อก่อนวัสดุ ทดสอบทรงกระบอก ในทางปฏิบัติหากยึดการให้แรงของก่อนวัสดุทดสอบโดยตรงแล้ว จะทำให้ จุดแตกหักของวัสดุเกิดที่ตำแหน่งขอบผิวของก่อนวัสดุทดสอบที่ทำการให้แรง ผลที่ได้จะไม่ถูกต้อง ตามคุณสมบัติจริงของวัสดุที่ควรจะเป็น ดังนั้นการให้แรงจึงต้องกระทำผ่านแท่งกวดน้ำหนักที่เป็น เหล็กสแตนเลสที่มีขนาดเหมาะสม กล่าวคือ ในกรณีที่ย่อนวัสดุทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร และในกรณีที่ย่อนวัสดุทดสอบมี เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร โดยที่แท่งกวดน้ำหนักดังกล่าวต้องมีด้านสัมผัสกับผิวของก่อนวัสดุทดสอบซึ่งเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมี เท่ากับรัศมีของก่อนวัสดุทดสอบ ทำให้สามารถแนบกันได้สนิทพอดีเพื่อประโยชน์ในการกระจาย น้ำหนักและการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำคงที่ การให้แรงในลักษณะนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึง (Tensile stress) ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการให้แรง หรือแนวเส้นผ่าน ศูนย์กลางในแนวตั้ง ทำให้ก่อนวัสดุทดสอบเกิดการแตกแยกขึ้นตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ว่า จะเกิดจากการป้อน Single load หรือ Repeated load ก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 2.11

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายของ Stresses ที่เกิดขึ้นภายในก่อนวัสดุทดสอบ ขณะทำการทดสอบทั้งในแนวราบและแนวตั้ง จะสังเกตเห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางของก่อนวัสดุ ทดสอบ Compressive stress ที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่าของหน่วยแรงดึงที่เกิด ขึ้นในแนวราบ ผลจากทฤษฎีพอจะสรุปสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณหาค่า Tensile strength ค่า Tensile strain ค่า Modulus of Elasticity และค่า Poisson's Ratio ได้ โดยอาศัยโปรแกรม คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ



รูปที่ 2.11 การป้อนน้ำหนักและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง
จากการทดสอบด้วย Indirect Tensile Test

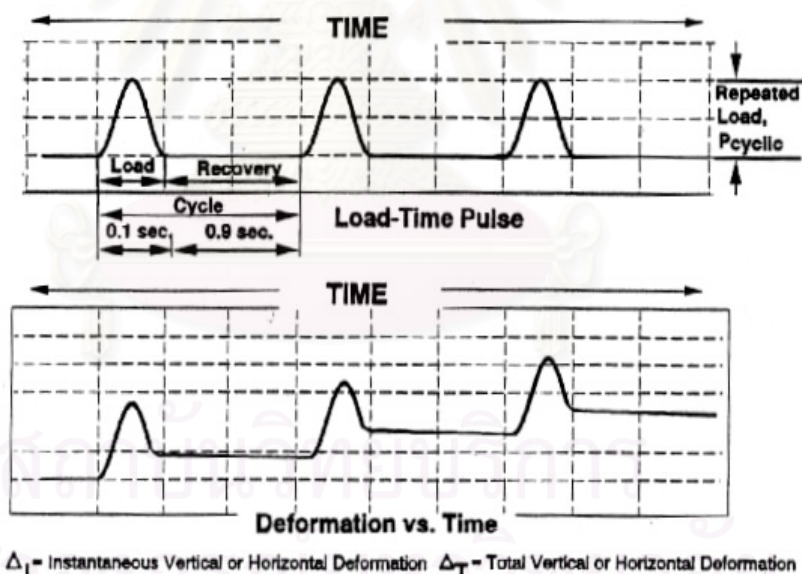
การทดสอบโดยทั่วไป

การทดสอบ Indirect Tensile แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- 1) การทดสอบแบบ Static หรือการใช้แรงกดในอัตราคงที่ ซึ่งเหมาะกับการทดสอบหาความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากผลของอุณหภูมิ (Thermal cracking) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature)
- 2) การทดสอบแบบ Repeated หรือ Dynamic load ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์หาความต้านทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากความล้า และสามารถใช้กับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้ โดยจะให้น้ำหนักทดสอบที่คงที่ค่าหนึ่งที่ไม่ถึงกับทำลายก้อนวัสดุทดสอบ จากนั้นกระทำการ Load และ Unload ซ้ำไปมา โดยตรวจสอบและบันทึกค่า Deformation ทั้งแนวราบและแนวตั้ง แต่จะให้ความสนใจเฉพาะในส่วนของค่า Recoverable deformation ซึ่งพิจารณาได้จาก

สมมติฐานที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Deformation มีลักษณะเป็นเส้นตรง เพื่อใช้ค่าเหล่านี้ในการคำนวณหาค่า Resilient Modulus

การทดสอบนี้ยังสามารถใช้ประมาณค่า Permanent deformation ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจาก Repeated load ได้อีกด้วย โดยปกติ Repeated stress ที่กระทำกับก้อนวัสดุทดสอบจะป้อนในรูปลักษณะ Haversine wave โดยมีการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อรักษาสภาพการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งคาน้ำหนักกับผิวของก้อนวัสดุทดสอบ สำหรับลักษณะความสัมพันธ์ของการให้แรงเทียบกับเวลา และความสัมพันธ์ของค่า Deformation ที่เกิดขึ้นกับก้อนวัสดุทดสอบเทียบกับเวลานั้น ได้แสดงไว้ใน รูปที่ 2.12 แต่ทั้งนี้ถ้าเครื่องมือทดสอบสามารถทำได้แนะนำให้เลือกช่วงระยะเวลาการให้แรงที่สั้น ๆ มาใช้ในการทดสอบ เพราะการทดสอบด้วยระยะเวลาการให้แรงที่สั้นจะให้ค่า Fatigue life สูงขึ้นใกล้เคียงกับค่า Fatigue life ที่เกิดขึ้นจริงในสนาม เพราะโดยปกติค่า Fatigue life ที่วิเคราะห์ได้จากการประมาณผลการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ มีแนวโน้มที่จะต่ำกว่าค่าที่เกิดจากสภาพการใช้งานจริงในสนาม สำหรับระยะเวลาการให้แรงที่มักใช้ในการทดสอบจะอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.4 วินาที และใช้อัตราเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบโดยปกติจะเป็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 – 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของจังหวะการให้แรง และการยุบตัวที่เกิดขึ้นในการทดสอบ Indirect Tensile Test แบบ Repeated Load

บทที่ 3

วิธีการในการศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นทางวิศวกรรมของผิวทางระบายน้ำในห้องปฏิบัติการ เพื่อสะท้อนคุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำในภาคสนาม ในการศึกษาที่แบ่งออกเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ประกอบด้วย การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ วัสดุผสมรวม วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย และวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมโพลีเมอร์ชนิด Styrene Butadiene Styrene (SBS) ซึ่งผสมอยู่ในเรซิน 40% ตามสัดส่วนของโพลีเมอร์ที่กำหนดไว้ นั่นคือ 3% 6% 9% 12% และ 15% โดยน้ำหนัก และการหาปริมาณที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสานประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจากการบดอัดด้วยวิธีมาร์แชล เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) จากการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory compactor ตามข้อกำหนดของขนาดคละของวัสดุผสมรวมสำหรับชั้นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงของกรมทางหลวง และตามข้อกำหนดของขนาดคละของวัสดุผสมรวมสำหรับชั้นผิวทางระบายน้ำของญี่ปุ่น สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น ค่าที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่ ความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent deformation) ความต้านทานการหลุดลอก (Stripping test) ความต้านทานแรงเสียดทาน (Skid Resistance) และความสามารถในการระบายน้ำ (Permeability) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานที่ต่างกัน รวมไปถึงความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร และความสามารถในการระบายน้ำ (Permeability) ของชั้นผิวทางระบายน้ำที่มีความหนาต่างกัน โดยจะขอกล่าวรายละเอียดของขั้นตอนการศึกษาต่าง ๆ ในลำดับต่อไป

นอกจากนี้ ในการศึกษา ยังได้เปรียบเทียบประเภทของวัสดุผสมรวมระหว่างหินปูนกับตะกรันเหล็ก (Slag) โดยจะนำผลของปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวมมาใช้เป็นข้อมูลในการผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร ความต้านทานการหลุดลอก ความต้านทานแรงเสียดทาน และความสามารถในการระบายน้ำ เมื่อใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดต่าง ๆ กับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวม

3.1 วิธีการดำเนินการศึกษา

ในการศึกษานี้ แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ และ การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต

3.1.1 การทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์

1. ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC60/70 กับโพลิเมอร์ที่มี Styrene Butadiene Styrene (SBS) ผสมอยู่ในเรซิน 40% ด้วยเครื่องผสมตามสัดส่วนของโพลิเมอร์ที่กำหนดไว้ นั่นคือ 3% 6% 9% 12% และ 15%

2. ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC60/70 ตามมาตรฐาน มอก.851-2532 และหาค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์

3. ทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยโพลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA) ตามมาตรฐาน ทล.-ก.408/2536 และหาค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์

4. วิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นตามมาตรฐานวิธีการทดสอบของประเทศไทยและเปรียบเทียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบทุกชนิด

วิธีการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.1

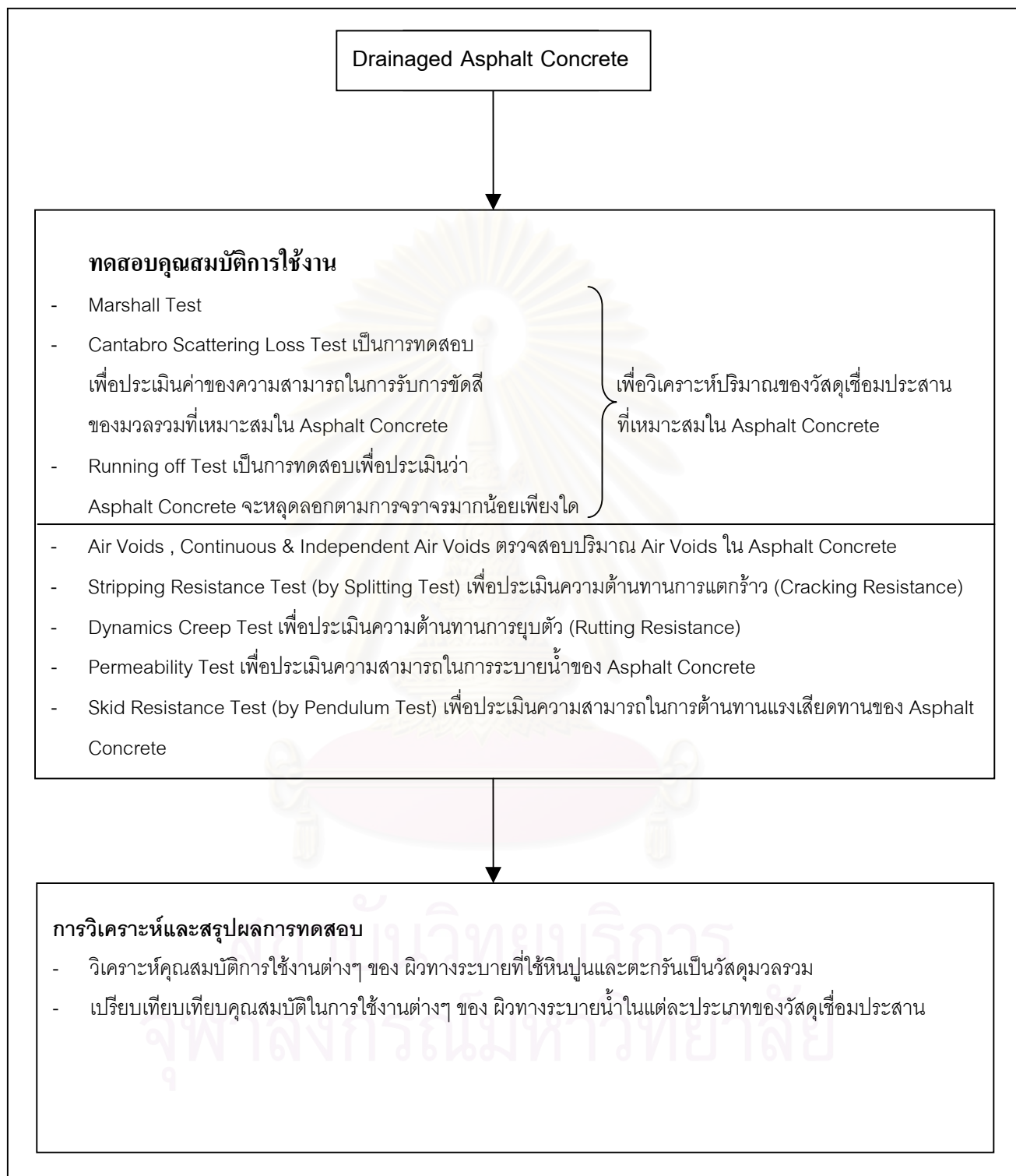
3.1.2 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต

การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต ระบายน้ำที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม 2) การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง โดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ทั้ง 7 ชนิด และ 3) การทดสอบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำในการปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตแบบแน่น

การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

1. ทำการทดสอบมาร์แชล (Marshall Test) เพื่อหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม
2. ทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงขีดสีโดยวิธี Cantabro Scattering Loss Test เพื่อหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมในการต้านทานการรับแรงขีดสี
3. ทำการทดสอบหาการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสาน โดยวิธี Running off Test เพื่อหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่มากที่สุดที่เหมาะสมในการต้านทานการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสาน
4. ทำการวิเคราะห์เพื่อเลือกปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
5. ทำการทดสอบหาปริมาณช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีต ว่ามีค่าประมาณ 20% หรือไม่ และหาสัดส่วนระหว่าง Continuous Air Voids กับ Independent Air Voids
6. ทำการทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent deformation) ด้วยวิธี Dynamic Creep Test เพื่อหาความต้านทานการยุบตัว (Rutting Resistance)
7. ทำการทดสอบความต้านทานการหลุดลอก (Stripping test) ด้วยวิธี Splitting Test เพื่อหาความต้านทานการแตกร้าว (Cracking Resistance)
8. ทำการทดสอบความสามารถในการระบายน้ำ (Permeability Test) เพื่อหาความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีต
9. ทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงเสียดทาน (Skid Resistance) ด้วยวิธี Pendulum Test
10. วิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติในการใช้งานต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต ระบายน้ำซึ่งใช้วัสดุเชื่อมประสานประเภทต่าง ๆ ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

วิธีการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.2

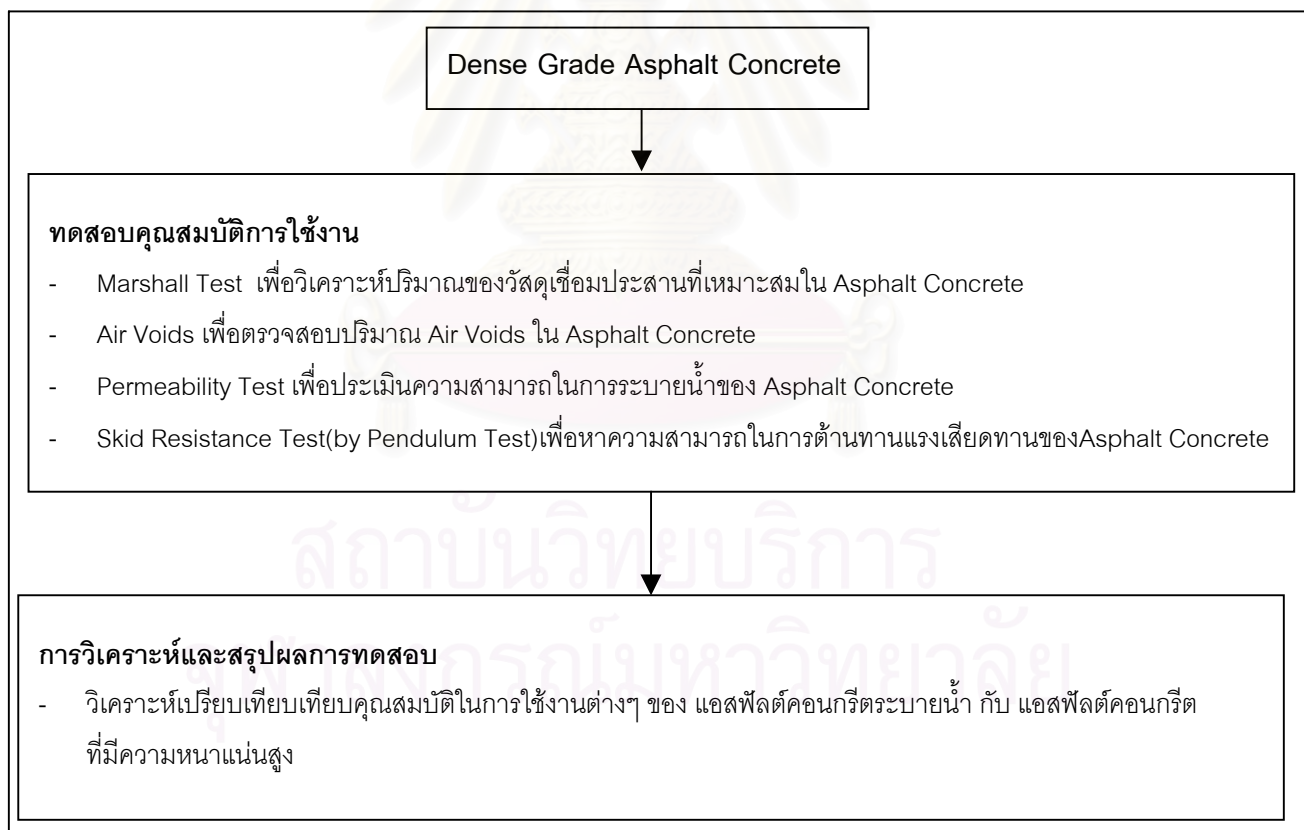


รูปที่ 3.2 แผนผังวิธีการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

1. ทำการทดสอบมาร์แชล (Marshall Test) เพื่อหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม
2. ทำการทดสอบหาปริมาณช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีต ว่ามีค่าประมาณ 3-7% หรือไม่
3. ทำการทดสอบความสามารถในการระบายน้ำ (Permeability Test) เพื่อหาความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีต
4. ทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงเสียดทาน (Skid Resistance) ด้วยวิธี Pendulum Test
5. วิเคราะห์เปรียบเทียบเทียบคุณสมบัติในการใช้งานต่างๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำกับ แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

วิธีการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.3

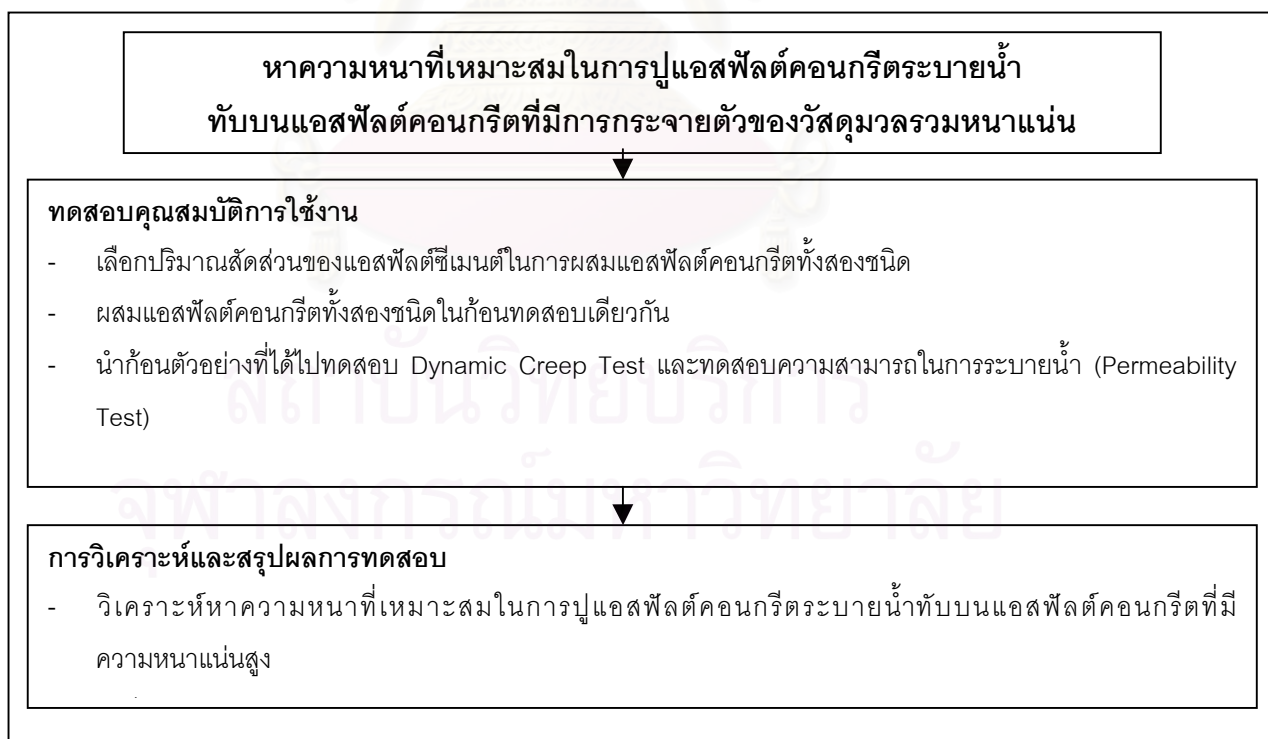


รูปที่ 3.3 แผนผังวิธีการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

การทดสอบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำในการปูทับบน
แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

1. จากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ผ่านมา พิจารณาเลือกปริมาณสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานในการผสมแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ และแอสฟัลต์คอนกรีตแบบแน่น
2. ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งสองชนิดในก้อนทดสอบเดียวกัน โดยบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง จากนั้นบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง โดยเปลี่ยนความหนาของแอสฟัลต์ระบายน้ำตามที่กำหนดไว้ คือ 2 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ
3. นำก้อนตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent deformation) ด้วยวิธี Dynamic Creep Test เพื่อหาความต้านทานการยุบตัว (Rutting Resistance) และทดสอบความสามารถในการระบายน้ำ (Permeability Test) เพื่อหาความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีต
4. วิเคราะห์หาความหนาที่เหมาะสมในการปูแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตแบบแน่น และสรุปผลการทดสอบ

วิธีการทดสอบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังวิธีการทดสอบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของ
แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

3.2 การเตรียมวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมโพลิเมอร์

วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ เป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60-70 (AC 60/70) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง มาตรฐานเลขที่ มอก. 851-2542 นำแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดดังกล่าวมาผสมกับโพลิเมอร์ชนิด SBS ซึ่งผสมอยู่ในเรซิน 40 % ด้วยเครื่องผสมตามสัดส่วนของโพลิเมอร์ที่กำหนดไว้ คือ 3% 6% 9% 12% และ 15% โดยน้ำหนัก

วิธีการผสมและข้อแนะนำ

- เตรียมภาชนะโลหะขนาด 3 ลิตรที่สะอาด เพื่อใช้บรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 จากนั้น ชั่งน้ำหนักของภาชนะแต่ละใบ บันทึกค่า
- บรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 ลงไปในภาชนะ โดยบรรจุให้มีระดับประมาณ 2 ใน 3 ของภาชนะผสมเท่านั้น เพื่อเผื่อปริมาณของส่วนผสมที่จะเติมเข้าไป รอจนแอสฟัลต์ซีเมนต์เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักของภาชนะแต่ละใบซึ่งบรรจุแอสฟัลต์ซีเมนต์ บันทึกค่า
- คำนวณหาปริมาณเม็ดโพลิเมอร์ ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ นั่นคือ 3% 6% 9% 12% และ 15% โดยน้ำหนัก
- ชั่งเม็ดโพลิเมอร์ตามปริมาณน้ำหนักที่คำนวณได้ตามปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในภาชนะแต่ละใบ
- ให้ความร้อนแก่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์จนมีอุณหภูมิประมาณ 140 - 150 องศาเซลเซียส ด้วย Hot plate จากนั้นกวนแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเครื่องผสมแรงเฉือนสูง (High shear rate mechanical mixer) ด้วยความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เครื่องผสมดังกล่าวจะมีใบพัดคู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อใช้กวนและเฉือนอนุภาคของส่วนผสม จากนั้นจะตีย้อนกลับขึ้นมาที่ผิวหน้าและหมุนกวนกลับไปอีกครั้งเพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันตลอดทั้งภาชนะ

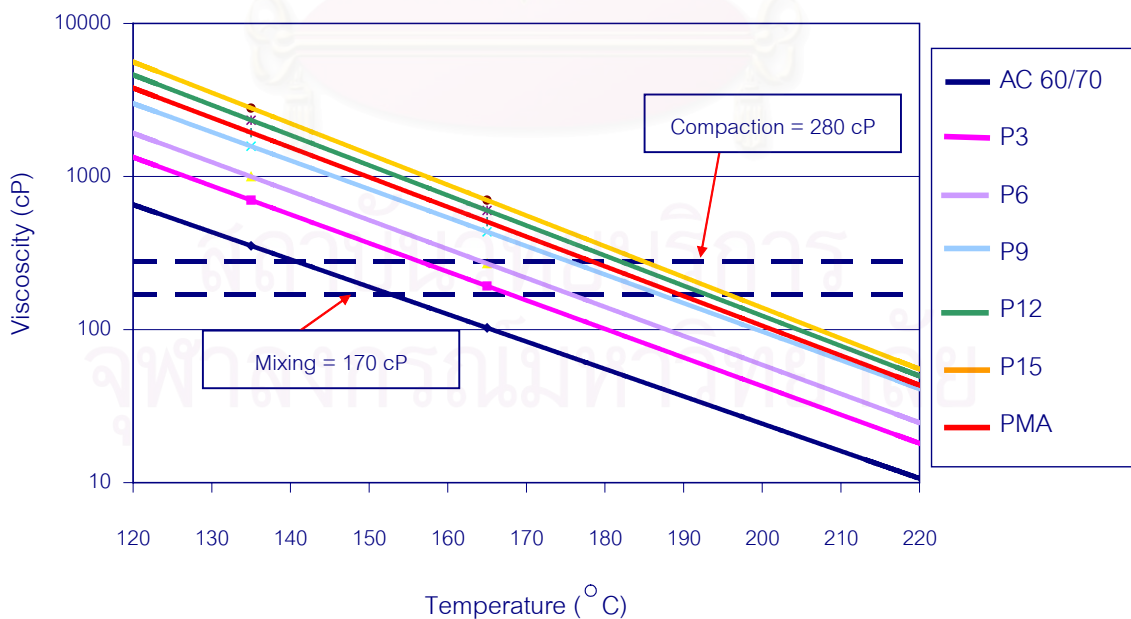
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ลักษณะใบพัดของเครื่องผสมแรงเฉือนสูง

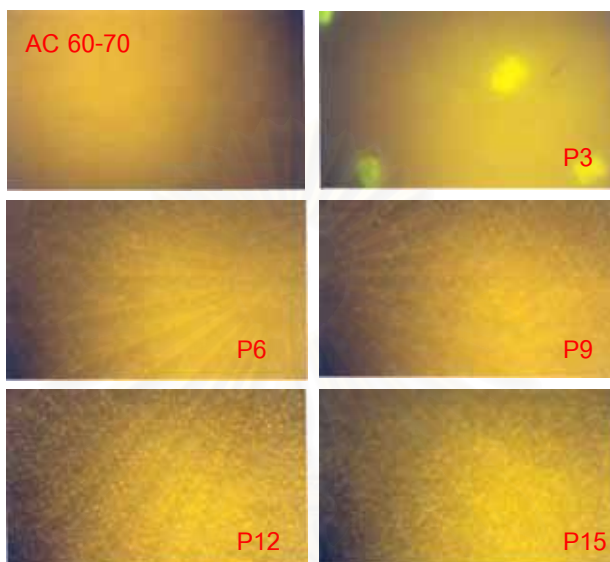
- ผสมเม็ดโพลีเมอร์ที่เตรียมไว้ลงไปในตัวผสมเอสฟัลต์ซีเมนต์ กวนส่วนผสมตลอดช่วงระยะเวลาการผสมและให้ความร้อนจนถึงระดับอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงที่ทำงานได้ นั่นคือ ระดับอุณหภูมิที่ทำให้เอสฟัลต์ซีเมนต์มีความหนืดที่เหมาะสมในการผสมวัสดุเอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวมเป็นส่วนผสมเอสฟัลต์คอนกรีต (**ความหนืดที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 170 cP และ 280 cP)

(**อุณหภูมิที่ทำให้เอสฟัลต์ซีเมนต์มีความหนืดอยู่ระหว่าง 170 cP และ 280 cP ได้จากการทดลองผสมก่อนที่ผสมจริง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของเอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของเอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ

- จากนั้นรักษาระดับของอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ทำงานได้ประมาณ 45 นาที เพื่อให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากภาพสัณฐานวิทยาที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 40 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.7 หากส่วนผสมเข้ากันดีอนุภาคของเนื้ออย่างจะมีลักษณะกระจายเป็นจุดเล็ก ๆ อยู่ทั่วในวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่าของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ และวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมโพลิเมอร์

- การผสมเม็ดโพลิเมอร์ในปริมาณสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่วนผสมจะมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันลดลง จากภาพสัณฐานวิทยาดังกล่าวจะเห็นว่าอนุภาคเนื้ออย่างใหญ่ขึ้น และภาพรวมของส่วนผสมมีลักษณะหยาบขึ้น ดังนั้น เมื่อผสมเม็ดโพลิเมอร์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจึงต้องใช้อุณหภูมิในการผสมสูงขึ้น เพื่อให้ส่วนผสมมีความหนืดที่เหมาะสมที่จะผสมจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้มากที่สุด
- ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม ไม่ควรให้ความร้อนแก่วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ในช่วงเริ่มต้นสูงเกิน 175 องศาเซลเซียส เนื่องจากจะทำให้แอสฟัลต์เกิดการ Aging และอาจทำให้คุณสมบัติของแอสฟัลต์เสื่อมสภาพได้

3.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสาน (Binders) ที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเกรด 60/70 วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมโพลิเมอร์ และวัสดุ PMA ที่มีจำหน่ายและใช้งานในประเทศไทย สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานในที่นี้ จะใช้วัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด

เกรด 60/70 ธรรมชาติ และวัสดุ PMA ที่มีจำหน่ายและใช้งานในประเทศไทย เป็นวัสดุควบคุม (Control binder) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมโพลีเมอร์

ในการทดสอบทั้งหมดจะแยกออกเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ยังไม่ผ่านการอบด้วย Thin Film Oven Test (TFOT) และภาคที่เหลือจากการอบด้วย TFOT เพื่อจำลองสภาพการเกิด Aging การทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 851-2542 และ มาตรฐาน ทล.-ก. 408/2536 ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ดังรายละเอียดที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน ตามมาตรฐาน มอก. 851-2542 และ มาตรฐาน ทล.-ก. 408/2536

ลำดับที่	คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ
1	Penetration at 25°C, 100 gm., 5 sec	DH-T 403
2	Softening point, Ring and Ball	ASTM D36
3	Penetration Index	NLT-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	NLT-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 at 135°C at 165°C	ASTM D4402
10	Storage stability at 165°C, 120 hrs Difference in softening point	NLT-328 *
11	Density at 25°C	ASTM D70
12	Flash point, Cleveland Open Cup	ASTM D92
13	Fire point, Cleveland Open Cup	ASTM D92
14	Solubility in trichloroethylene	DH-T 409
Test On Residue From Thin Film Oven Test		
15	Weight loss	ASTM D1754
16	Retained penetration at 25°C	DH-T 403
17	Variation in softening point	ASTM D36
18	Ductility at 13°C, 5 cm/min	DH-T 405
19	Ductility at 25°C, 5 cm/min	DH-T 405
20	Torsional recovery at 25°C	NLT-329 *

หมายเหตุ : * อ้างอิงจาก the National Laboratory of Transportation Madrid, Spain

** อ้างอิงจาก Elpidio Sanchez Marcos, Spain

3.4 การเตรียมและทดสอบคุณสมบัติของวัสดุมวลรวม

ทั้งวัสดุมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด จะได้รับการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 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 3.3 การตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมละเอียด

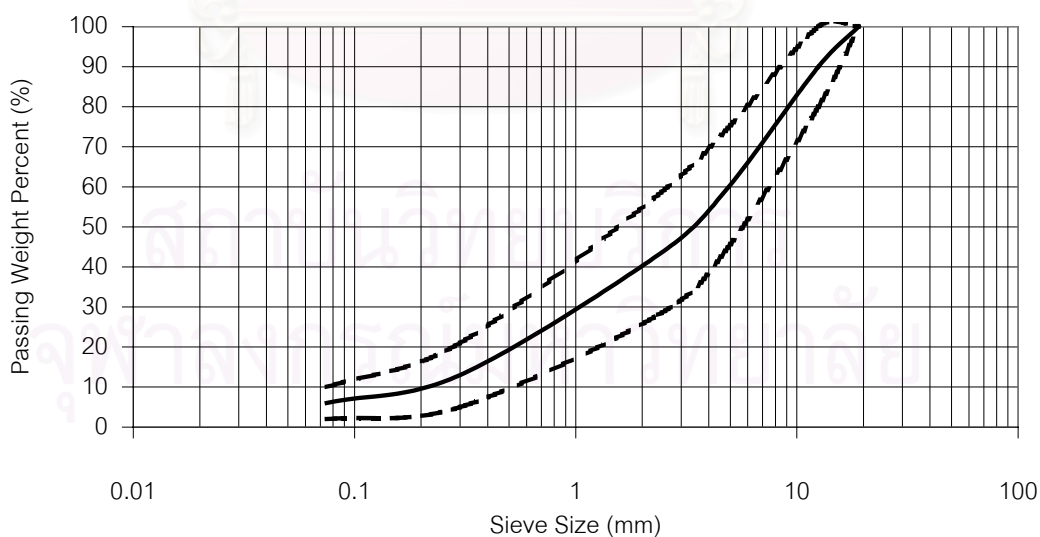
คุณสมบัติ	วิธีทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) และค่าการดูดซึม (Absorption)	ASTM C128
ค่าสมมูลของทราย (Sand equivalent)	AASHTO T176 หรือ ทล.-ท.203/2515
ค่าความคงทน (Soundness)	AASHTO T104 หรือ ทล.-ท.213/2531

3.5 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

ขนาดคละ (Gradation) ของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นไปตามขนาดคละสำหรับชั้นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532 มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต โดยวัสดุมวลรวมจะมีขนาด 12.5 มิลลิเมตร (1/2 นิ้ว) ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.8 ส่วนขนาดคละสำหรับชั้นผิวทางระบายน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นไปตามข้อกำหนดจากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 3.5 และ รูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.4 ขนาดคละของวัสดุผสมรวมสำหรับชั้นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง
ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532

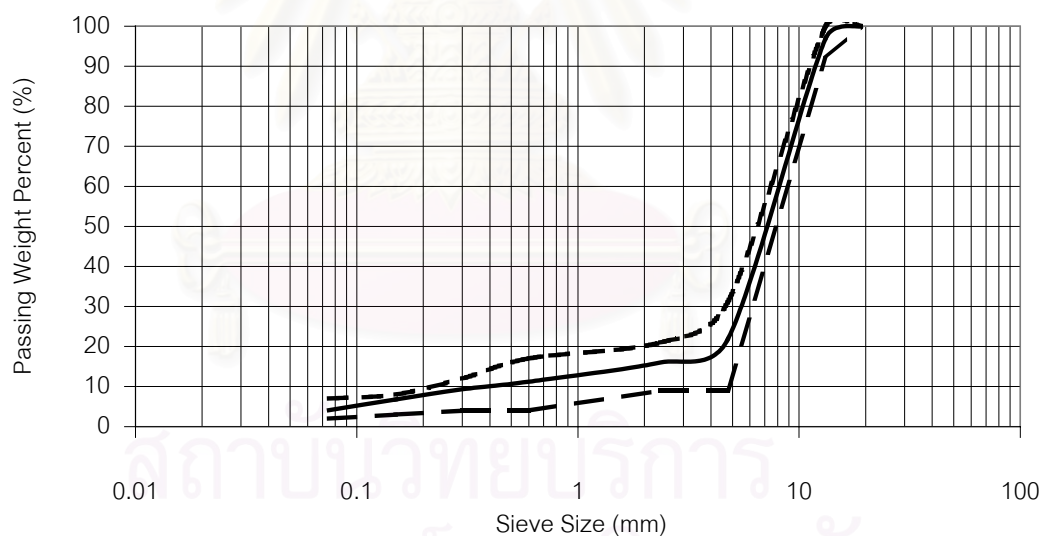
ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร นิ้ว	12.5 1/2
สำหรับชั้นทาง		Wearing course
ความหนา	มิลลิเมตร	40 - 70
ขนาดตะแกรง	มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
19	(3/4)	100
12.5	(1/2)	80 - 100
9.5	(3/8)	-
4.75	(เบอร์ 4)	44 - 74
2.36	(เบอร์ 8)	28 - 58
1.18	(เบอร์ 16)	-
0.6	(เบอร์ 30)	-
0.3	(เบอร์ 50)	5 - 21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



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุผสมรวมสำหรับชั้นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง
ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง ทล.-ม. 408/2532

ตารางที่ 3.5 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมสำหรับชั้นผิวทางระบายน้ำตามข้อกำหนดจากญี่ปุ่น

ขนาดตะแกรง (mm.)	ปริมาณผ่านตะแกรง (ร้อยละโดยมวล)	ขอบเขตของขนาดคละ
19.0	100	100
13.2	97.0	92-100
4.75	21.7	9-31
2.36	16.0	9-21
0.6	11.2	4-17
0.3	9.3	4-12
0.15	6.8	3-8
0.075	4.1	2-7



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงขนาดคละของวัสดุมวลรวมสำหรับ
ชั้นผิวทางระบายน้ำตามข้อกำหนดจากญี่ปุ่น

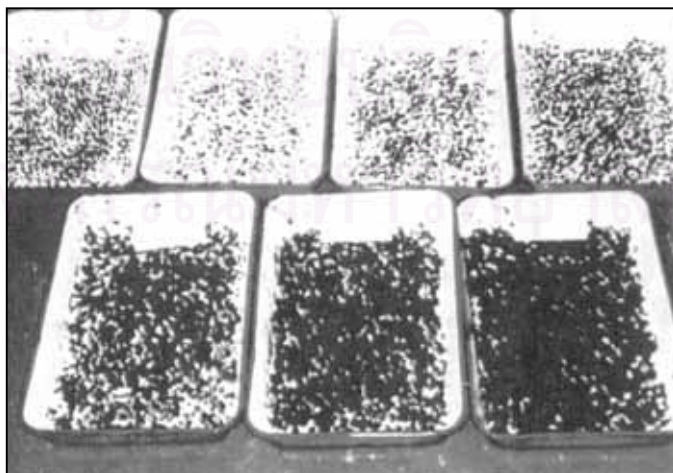
3.6 การเตรียมตัวอย่างวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต

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

3.6.1 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบความต้านทานการหลุดลอกตามการจราจร

ในการศึกษานี้ ใช้วิธีการ Running Off Test ในการทดสอบหาความต้านทานการหลุดลอกตามการจราจร เพื่อหาสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่มากที่สุดที่เหมาะสมที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด โดยทั่วไป ถ้าสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานมากขึ้น อัตราส่วนของการหลุดลอกตามการจราจร (Loss of Running Off) ก็มีแนวโน้มที่จะมากขึ้นด้วย

ในการทดสอบ Running Off Test เริ่มจากการเตรียมวัสดุมวลรวมตามขนาดคละที่เลือกใช้ ประมาณ 2 กิโลกรัม ผสมแบบร้อนกับวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดตามสัดส่วนต่าง ๆ นำส่วนผสมที่ผสมเสร็จแล้วใส่ลงในภาชนะโลหะที่ราบน้ำหน้าขนาด 42 X 27 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.10 นำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำภาชนะบรรจุส่วนผสมใส่ในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้น นำภาชนะออกจากเตาอบ คั่วภาชนะเพื่อให้ส่วนผสมหลุดออกมา แล้วนำภาชนะซึ่งมีแอสฟัลต์ซีเมนต์ติดอยู่ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ติดอยู่ในภาชนะ ต่อจากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟ เพื่อหาสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่มากที่สุดที่เหมาะสมที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด



รูปที่ 3.10 การทดสอบ Running Off

3.6.2 การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

ในการศึกษานี้ ใช้การบดอัดด้วยวิธีมาร์แชล เพื่อเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับการทดสอบ 2 อย่าง คือ 1) การทดสอบค่าความสามารถในการรับการขีดสีของวัสดุผสมรวม ด้วยวิธี Cantabro ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด และ 2) การทดสอบ Marshall ซึ่งเป็นการหาปริมาณที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสานประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตในการใช้งาน (Performance)

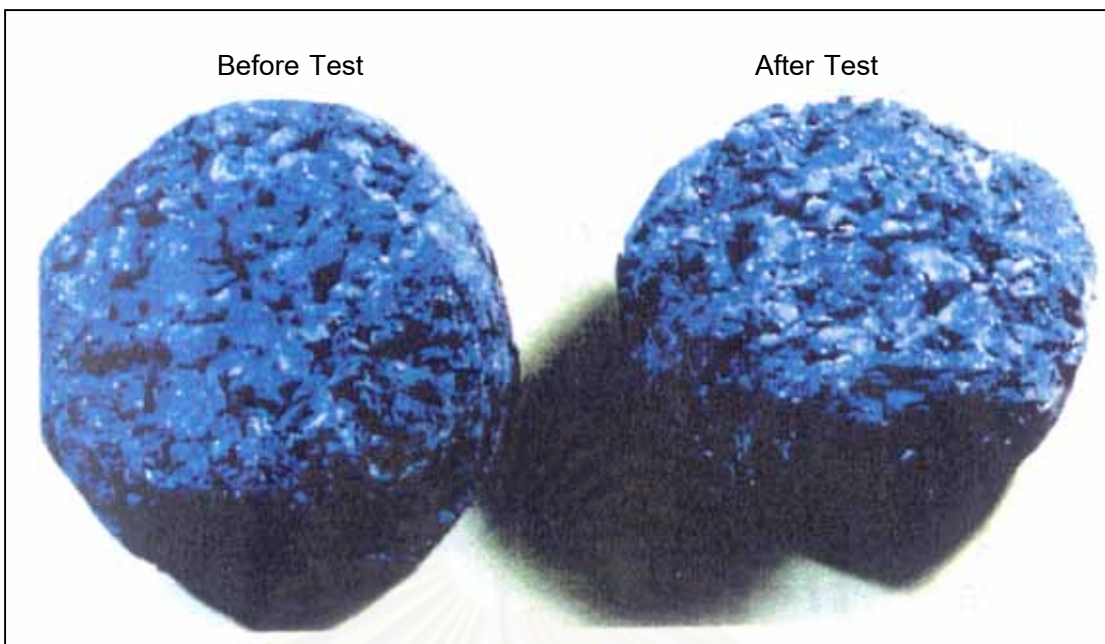
แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

ในการศึกษานี้ ได้จำลองชั้นผิวทางระบายน้ำ โดยใช้แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ และได้พิจารณาคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานที่มีผลต่อแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ ในการเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ จำนวนครั้งของการบดอัดเท่ากับ 50 ครั้ง ต่อด้าน ตามเกณฑ์เปรียบเทียบของ AASHTO เพื่อนำไปใช้ทำการทดสอบ 3 อย่าง คือ การทดสอบ Cantabro การทดสอบ Marshall และ การหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างอากาศ (Air Void) กับ ปริมาณช่องว่างอากาศต่อเนื่อง (Continuous Air Void)

การทดสอบ Cantabro

การทดสอบ Cantabro คิดขึ้นโดย Cantabria University ในประเทศสเปน เป็นการทดสอบเพื่อประเมินค่าของความสามารถในการรับการขีดสีของวัสดุผสมรวม ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดโดยการหา Cantabro Scattering Loss ซึ่งโดยทั่วไป ถ้าสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานมากขึ้น ค่า Cantabro Scattering Loss ก็มีแนวโน้มที่จะลดลง จากนั้นนำผลไปเขียนกราฟ เพื่อหาสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่น้อยที่สุดที่เหมาะสมที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด

ในการทดสอบ Cantabro จะนำก้อนตัวอย่างที่ได้จากการบดอัดด้วยวิธี Marshall ไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำก้อนตัวอย่างดังกล่าวไปทดสอบการขีดสีด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion โดยไม่ใส่ลูกเหล็ก 300 รอบ ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำก้อนตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบแล้ว ไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่ลดลง



รูปที่ 3.11 ลักษณะของก้อนตัวอย่างทดสอบ Cantabro

การทดสอบ Marshall และการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างอากาศกับปริมาณช่องว่างอากาศต่อเนื่อง

การทดสอบ Marshall เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content) ที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงได้มากที่สุด โดยมีค่าร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) อยู่ระหว่าง 18 – 25 % ในการทดสอบ Marshall นี้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณช่องว่างอากาศกับปริมาณช่องว่างอากาศต่อเนื่องไปพร้อมกันได้ ซึ่งปริมาณช่องว่างอากาศต่อเนื่อง ในที่นี้หาได้จาก

$$\text{Continuous Air Void} = ((V_1 - V_2) / V_1) \times 100$$

เมื่อ V_1 คือ ปริมาตรของก้อนตัวอย่างที่ได้จากการวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Method)

V_2 คือ ผลต่างระหว่างน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ชั่งในอากาศกับที่ชั่งในน้ำ

เมื่อได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสานแล้ว จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) จากการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory compactor ต่อไป

แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

ในการศึกษานี้ จะจำลองชั้นผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงซึ่งอยู่ใต้ชั้นผิวทางระบายน้ำ โดยใช้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้น จึงใช้เฉพาะวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสานสำหรับเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง โดยใช้จำนวนครั้งของการบดอัดเท่ากับ 75 ครั้งต่อด้าน ตามเกณฑ์เทียบเท่าที่ปริมาณการจราจรสูง (Heavy traffic criteria) ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นไปตาม มาตรฐานวิธีทดสอบ 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 ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่

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

การบดอัดและทดสอบคุณสมบัติตามวิธีมาร์แชลล์นั้น ใช้เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (Optimum binder content) และพิจารณาว่าวัสดุเชื่อมประสานดังกล่าวเมื่อนำไปเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว สามารถผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดสำหรับนำไปใช้งานจริงได้ในประเทศไทย ซึ่งในปัจจุบันยังคงใช้วิธีมาร์แชลล์สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต หลังจากได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสานแล้ว จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) จากการบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory compactor ต่อไป

3.6.3 การเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเครื่อง Gyratory compactor

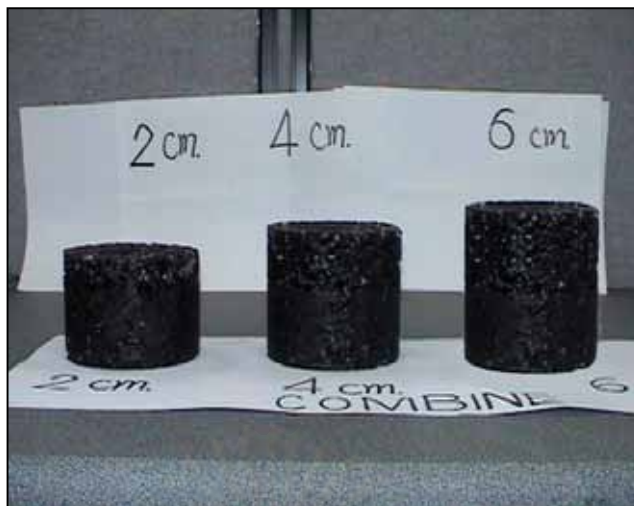
หลังจากที่ทำการทดสอบ Cantabro การทดสอบ Running Off และการทดสอบ Marshall แล้วจะเลือกค่าที่ครอบคลุมปริมาณที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสาน (Optimum binder content) ทุกชนิด 3 ค่า สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ และบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่อง Gyratory compactor เพื่อให้ได้ร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) เท่ากับ 20 % โดยใช้แบบหล่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือ 101.6 มิลลิเมตร หลังจากนั้นทำการทดสอบ

เพื่อหาค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่มีวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดในสัดส่วนต่างๆ ที่ได้พิจารณาไว้ แล้วพิจารณาค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ เพื่อเลือกปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดที่ทำให้มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวรมากที่สุด เพื่อใช้เป็น ข้อมูลเบื้องต้นในการเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำในการทดสอบการหลุดลอกการทดสอบเพื่อหาความต้านทานแรงเสียดทาน ความสามารถในการระบายน้ำ และความหนา ที่เหมาะสมของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำต่อไป

ทำการบดอัดส่วนผสมตามปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ได้พิจารณาไว้ด้วยเครื่อง Gyrotory compactor compactor เพื่อให้ได้ร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) เท่ากับ 20 % โดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือ 11.6 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบการหลุดลอก และความสามารถในการระบายน้ำ และใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว หรือ 152.4 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นก้อนตัวอย่างในการทดสอบความสามารถในการต้านทานแรงเสียดทาน

จากนั้นทำการบดอัดก้อนตัวอย่างเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ปูทับบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง โดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว หรือ 101.6 มิลลิเมตร เริ่มจากเตรียมส่วนผสมสำหรับทำแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง โดยบดอัดให้มีร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) เท่ากับ 4 % หลังจากนั้นบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำให้มีร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) เท่ากับ 20 % โดยให้ความสูง 2 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ บนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ตามสัดส่วนของปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน แต่ละชนิดที่ได้พิจารณาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เพื่อนำไปทดสอบหาความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร และความสามารถในการระบายน้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



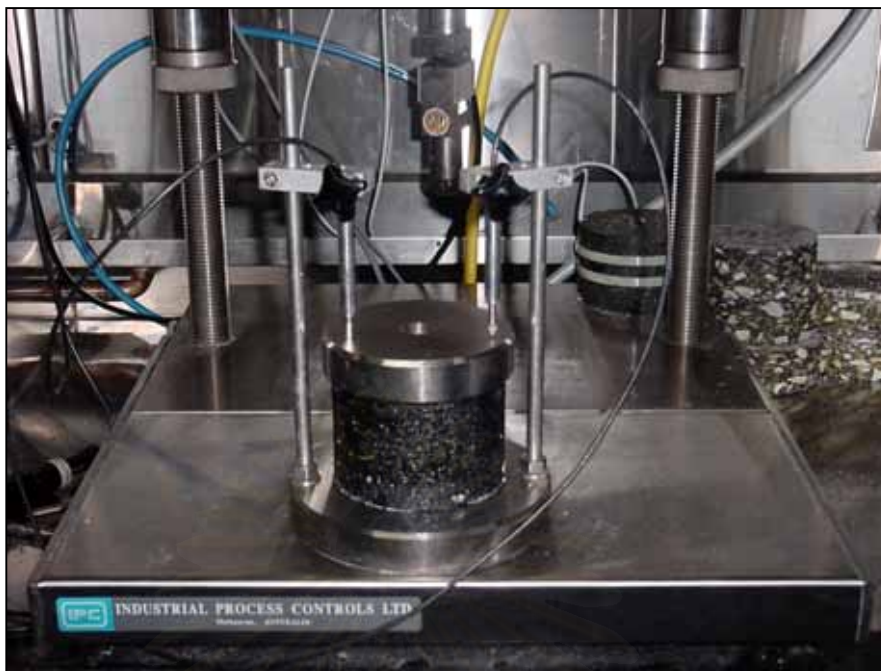
รูปที่ 3.12 ลักษณะก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ทดสอบ เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ปูทับบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

3.7 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต

หลังจากเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตตามหัวข้อ 3.6 แล้ว ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยจะทดสอบศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ดังนี้

3.7.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวร

การทดสอบนี้ เป็นการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อศึกษาความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Permanent deformation) โดยใช้การทดสอบแบบ Repeated uniaxial loading strain test (Dynamic creep test) ตามมาตรฐานการทดสอบของประเทศออสเตรเลีย AS 2891.12.1-1995 "Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt : Dynamic Creep Test" ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกน (Axial load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อก้อนตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 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 เพื่อวัดการยุบตัวในทิศทางเดียวกับน้ำหนักที่กระทำ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปของค่าความเครียดสะสม (Accumulated strain) ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการป้อนน้ำหนัก การทดสอบจะดำเนินไปจนกระทั่งค่าความเครียดสะสม มีค่าเท่ากับ 30,000 Microstrain หรือมีการยุบตัวคิดเป็น 3 % ของความหนาของก้อนตัวอย่าง

3.7.2 การทดสอบการหลุดลอก

ในการศึกษานี้ จะทำการทดสอบการหลุดลอก (Stripping test) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยวิธี Splitting test เพื่อหาความต้านทานการแตกร้าว (Cracking Resistance) โดยใช้สัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานของแต่ละส่วนผสมตามค่าที่ได้จากการทดสอบค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปถาวรมาผสมและบดอัดให้ได้ปริมาณช่องว่างอากาศของก้อนตัวอย่างอยู่ประมาณ 20 % โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 นำไปแช่ในน้ำ 80 องศาเซลเซียส 30 นาที กลุ่มที่ 2 นำไปแช่ในน้ำ 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง โดยนำก้อนตัวอย่างไปทดสอบแบบ indirect tensile ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อหาค่าสัดส่วนของหน่วยแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม โดยหาได้จาก

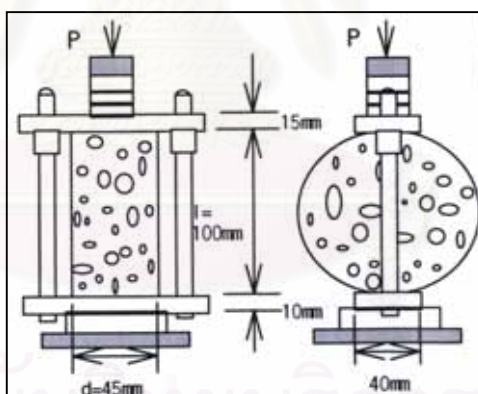
$$\sigma_t = 2P / \pi dl$$

เมื่อ σ_t คือ หน่วยแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง

P คือ แรงสูงสุดที่ก้อนตัวอย่างสามารถรับได้

d คือ ความหนาของก้อนตัวอย่าง

l คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.14 การทดสอบการหลุดลอก (Stripping test) ด้วยวิธี Splitting test

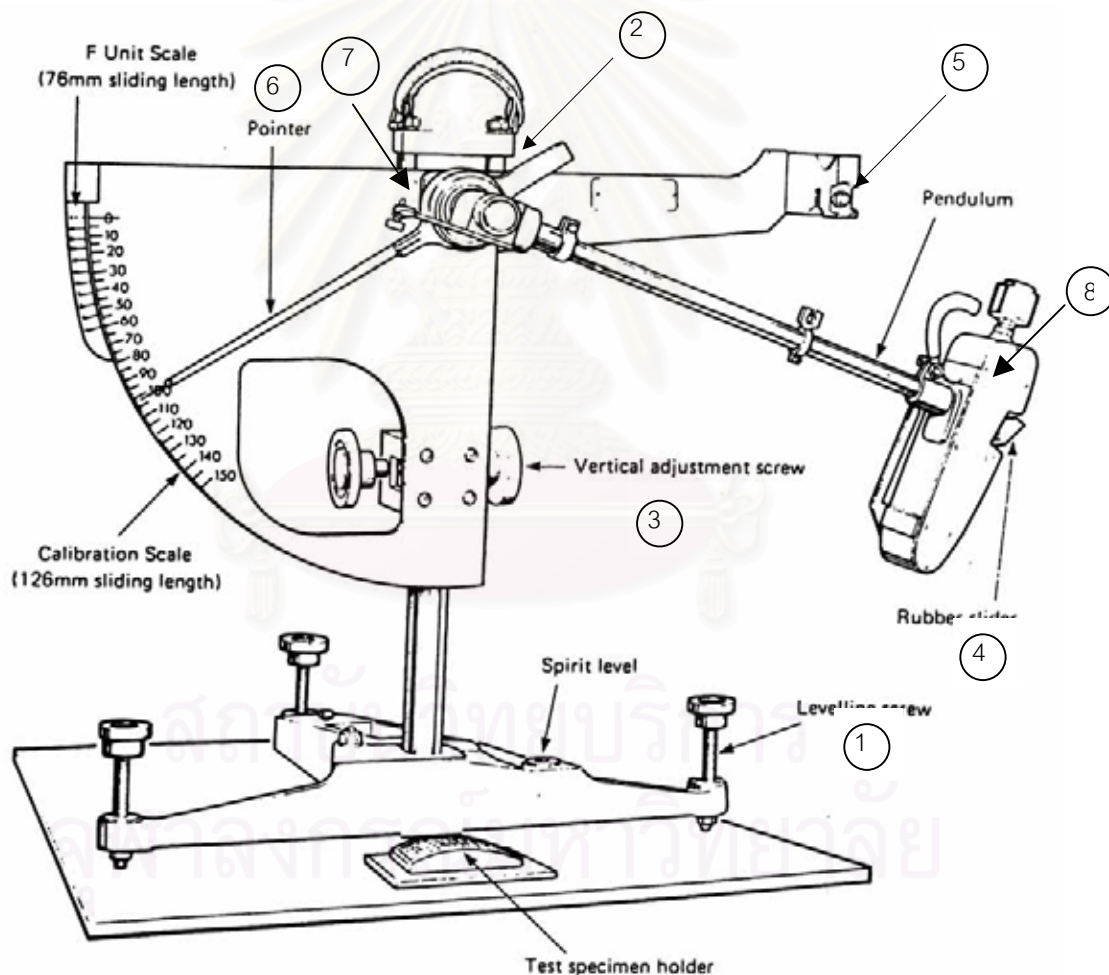
3.7.3 การทดสอบหาความต้านทานแรงเสียดทาน

ความต้านทานแรงเสียดทานของพื้นผิว (Skid Resistance) คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างล้อรถกับพื้นผิวถนน ซึ่งมีความสำคัญมากต่อความปลอดภัยในการขับขี่ ในหลายกรณีของการเกิดอุบัติเหตุ เป็นผลเนื่องมาจากแรงเสียดทานระหว่างล้อรถและพื้นผิวถนน เช่น อุบัติเหตุเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ฝนตก อุบัติเหตุที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของยางล้อรถ เป็นต้น จากความพยายามที่จะหาวิธีการที่เพิ่มแรงเสียดทานของผิวถนนทำให้ The Transport and Road Research Laboratory

(TRRL) แห่งสหราชอาณาจักร จึงได้ประดิษฐ์คิดค้นเครื่องทดสอบเพื่อวัดค่าแรงเสียดทานที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ เพื่อให้สามารถทดสอบได้ทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม นั่นคือ Pendulum Skid Tester เครื่องมือดังกล่าวเป็นการจำลองเพื่อหาค่าแรงเสียดทานของพื้นผิวถนนเมื่อมียานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงแล่นผ่าน โดยค่าที่ได้จะเป็นตัวเลขที่สามารถบ่งบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นผิวถนน

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.15 แล้วนำไปวางลงพื้นผิวถนนที่จะทำการทดสอบ โดยให้ตุ้มแกว่งในทิศทางเดียวกันกับการจราจร จากนั้นหมุนปุ่มปรับระดับ⁽¹⁾ เพื่อปรับระดับของอุปกรณ์ให้อยู่ในแนวระดับ



รูปที่ 3.15 Pendulum Skid Resistance Tester (BSI 1990)

2. หมุนปุ่มยึด⁽²⁾ ให้คลายออก จากนั้นหมุนปุ่มปรับความสูงของตุ้มทดสอบ⁽³⁾ ให้ตุ้มทดสอบ⁽⁴⁾ ลอยพ้นจากพื้นถนน หมุนปุ่มยึดให้แน่น

3. ยึดตุ้มน้ำหนักให้อยู่ในแนวระดับ จากนั้นกดปุ่มยึดตุ้มน้ำหนัก⁽⁵⁾ เพื่อปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักแกว่งอย่างอิสระ อ่านค่าเข็มชี้⁽⁶⁾ ว่าอ่านค่าได้ศูนย์หรือไม่ ถ้าอ่านค่าได้ไม่เท่ากับศูนย์ ให้ปรับแก้เครื่องมือ โดยหมุนแหวนปรับความถี่⁽⁷⁾ ทำซ้ำจนกว่าจะอ่านค่าได้ศูนย์

* ข้อควรระวัง หลังจากตุ้มน้ำหนักแกว่งกลับลงมาให้จับไว้ เพื่อไม่ให้เข็มชี้เลื่อนจากค่าเดิม

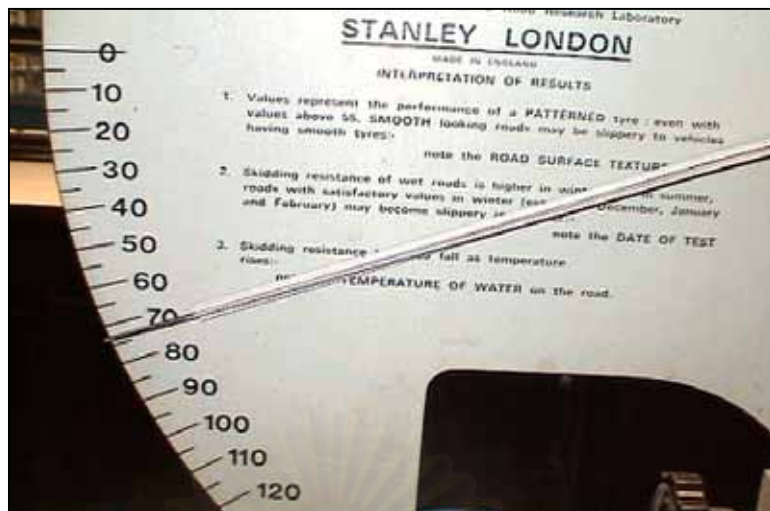
4. ปล่อยตุ้มน้ำหนักให้อยู่ในแนวตั้ง นำ spacer ไปใส่ไว้ใต้ lifting handle⁽⁸⁾ จากนั้นหมุนปุ่มยึดให้คลายออก แล้วค่อยๆ หมุนปุ่มปรับความสูงของตุ้มทดสอบลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งตุ้มทดสอบแตะกับผิวถนน หมุนปุ่มยึดให้แน่น จากนั้นนำ spacer ออก

5. ตรวจสอบว่าระยะสัมผัสของตุ้มน้ำหนักมีระยะ 125 -127 มิลลิเมตรหรือไม่ โดยการยก lifting handle แล้วจับตุ้มน้ำหนักไปด้านหนึ่ง ปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักสัมผัสผิวทดสอบเบาๆ ทำเครื่องหมายจุดสัมผัสไว้ จากนั้นยก lifting handle แล้วจับตุ้มน้ำหนักไปอีกด้านหนึ่ง ปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักสัมผัสผิวทดสอบเบาๆ ทำเครื่องหมายจุดสัมผัสแล้วยึดตุ้มน้ำหนักให้กลับมาอยู่ในแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตรวจสอบระยะของผิวสัมผัสของผิวทดสอบ

6. วัดระยะระหว่างจุดสองจุดที่ทำเครื่องหมายไว้
7. ถ้าระยะสัมผัสไม่อยู่ในช่วง 125-127 มิลลิเมตร ทำซ้ำข้อ 5-6 แต่ไม่ต้องใส่ spacer
8. ยึดตุ้มน้ำหนักให้อยู่ในแนวระดับ กดปุ่มยึดตุ้มน้ำหนัก เพื่อปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักแกว่งลงไปสัมผัสผิวทดสอบ อ่านค่าเข็มชี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 บันทึกค่า



รูปที่ 3.17 ลักษณะของเข็มชี้ของเครื่องทดสอบความต้านทานแรงเสียดทาน

9. ทำซ้ำข้อ 8 จำนวน 3 ครั้ง บันทึกค่า โดยค่าที่ได้ต้องแตกต่างกันไม่เกิน 3 จากนั้นหาค่าเฉลี่ย
10. ถ้าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันมากกว่า 3 ให้ทำซ้ำข้อ 8 จนได้ค่าที่คงที่ 3 ครั้ง บันทึกค่า
11. ยืดตุ้มน้ำหนักให้อยู่ในแนวระดับ จากนั้นเทน้ำลงพื้นผิวที่จะทำการทดสอบให้เปียก
12. กดปุ่มยืดตุ้มน้ำหนัก เพื่อปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักแกว่งลงไปสัมผัสผิวทดสอบ อ่านค่าเข็มชี้ บันทึกค่า
13. ทำซ้ำข้อ 11-12 จำนวน 3 ครั้ง บันทึกค่า โดยค่าที่ได้ต้องแตกต่างกันไม่เกิน 3 จากนั้นหาค่าเฉลี่ย
14. ถ้าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันมากกว่า 3 ให้ทำซ้ำข้อ 14-16 จนได้ค่าที่คงที่ 3 ครั้ง บันทึกค่า

3.7.4 การทดสอบหาความสามารถในการระบายน้ำ

ความสามารถในการระบายน้ำ (Permeability) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของชั้นผิวทางระบายน้ำ ซึ่งทำให้ผิวทางระบายน้ำช่วยลดการท่วมขังของน้ำบนผิวทาง ลดการกระเด็นของละอองน้ำด้านหลังยานพาหนะเมื่อยานพาหนะแล่นผ่าน และลดแสงสะท้อนจากผิวทางที่เปียกทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ทำให้มีทัศนวิสัยในการขับขี่ที่ดีขึ้น ทั้งยังช่วยให้แรงเสียดทานระหว่างผิวทางกับล้อรถไม่ลดลง จึงช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่

ในการทดสอบความสามารถในการระบายน้ำในการศึกษานี้ ประยุกต์มาจากการทดลองในภาคสนาม (In situ) ตามข้อแนะนำของกรมทางหลวงเบลเยียม เริ่มจากนำท่อพลาสติกใส

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 19 มิลลิเมตร ยาวไม่น้อยกว่า 12 นิ้ว มาทำเครื่องหมายระบุตำแหน่ง 2 ซีดให้ห่างกัน 8 นิ้ว ตั้งบนก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่เตรียมไว้ แล้วนำซิลิโคนมาทาโดยรอบระหว่างท่อกับก้อนตัวอย่างเพื่อกันน้ำ จากนั้นนำก้อนตัวอย่างซึ่งติดตั้งท่อทดสอบไปตั้งบนตะแกรง แล้วเทน้ำลงในท่อให้เต็ม รอจนระดับน้ำลดต่ำลงจนถึงระดับขีดบนที่ทำเครื่องหมายไว้ จึงเริ่มจับเวลาจนกระทั่งระดับน้ำลดต่ำลงถึงระดับขีดล่างที่ทำเครื่องหมายไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ค่าของเวลาที่ได้ในการทดสอบสะท้อนถึงความสามารถในการระบายน้ำของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์ระบายน้ำ



รูปที่ 3.18 การทดสอบหาความสามารถในการระบายน้ำ

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

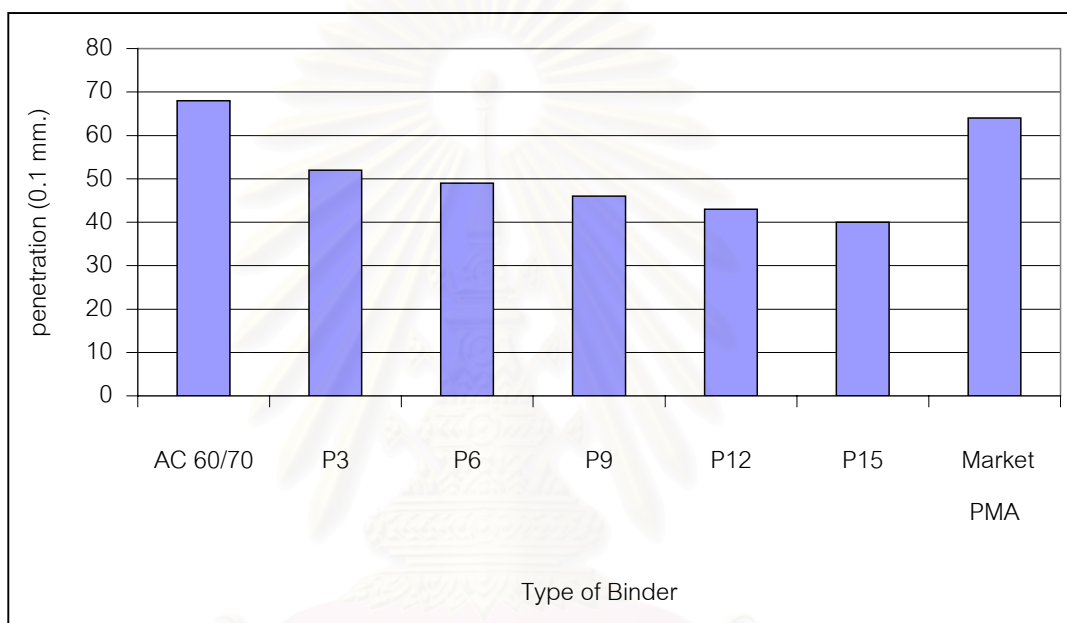
วัสดุเชื่อมประสาน (Binders) ทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ AC60/70 P3 P6 P9 P12 P15 และ Market PMA ที่ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.1 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ กับปริมาณสัดส่วนของโพลีเมอร์ที่ผสมลงไปในวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดังในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

No.	Properties	Unit	Min.	Max.	AC 60/70	P3	P6	P9	P12	P15	Market PMA
1	Penetration at 25°C, 100 gm., 5 sec	0.1 mm	60	70	68	52	49	46	43	40	64
2	Softening point, Ring and Ball	°C	70	-	48	53.5	56	83.5	93	95	88.5
3	Penetration Index	-	+3.0	-	-0.96	-0.25	+0.17	+4.59	+5.54	+5.58	+6.12
4	Ductility at 13°C, 5 cm/min	cm	55	-	> 150	40.2	70.7	85.3	97.7	120.3	117
5	Ductility at 25°C, 5 cm/min	cm	100	-	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150
6	Torsional recovery at 25°C	%	70	-	3.3	27.2	47.2	80.6	88.9	97.2	85.0
7	Float test at 60°C	sec	3,000	-	326.00	794.99	1572.15	>3000	>3000	>3000	>3000
8	Toughness/Tenacity test, 25°C										
	Toughness	Kg.cm	200	-	52.460	129.353	214.902	279.791	313.233	350.154	380.667
	Tenacity	Kg.cm	100	-	19.535	64.623	151.145	218.543	241.152	320.458	340.267
9	Brookfield viscosity, Shear rate 18.6 s ⁻¹ , spindle 21										
	at 135°C	cP	1,100	-	352.5	700.0	997.5	1575.0	2335.0	2800.0	1934.0
	at 165°C	cP	300	-	102.5	192.5	270.0	435.0	600.0	700.0	506.0
10	Storage stability at 165°C, 120 hrs Difference in softening point	°C	-	5	1.5	1.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0
11	Density at 25°C	gm/cc	1.00	1.05	1.029	1.021	1.018	1.015	1.011	1.006	1.020
12	Flash point, Cleveland Open Cup	°C	220	-	310	318	324	328	332	334	328
13	Fire point, Cleveland Open Cup	°C	220	-	368	370	372	375	378	380	377
14	Solubility in trichloroethylene	% wt.	99.0	-	99.93	99.80	99.89	99.94	99.80	99.88	99.90
Test On Residue From Thin Film Oven Test											
16	Weight loss	% wt.	-	0.5	0.05	0.15	0.12	0.1	0.07	0.05	0.13
17	Retained penetration at 25°C	%	70	-	72.59	74.20	74.66	75.30	76.23	78.61	75.69
18	Variation in softening point	°C	-4	+6	+4.5	-1.5	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0	-2.0
19	Ductility at 13°C, 5 cm/min	cm	40	-	15.1	37.5	62.1	73.5	79.4	87.2	84.4
20	Ductility at 25°C, 5 cm/min	cm	50	-	>150	>150	>150	>150	>150	>150	>150
21	Torsional recovery at 25°C	%	60	-	2.8	21.3	42.5	75.4	83.5	90.3	75.1

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า ถ้าไม่คำนึงถึงค่า Penetration วัสดุเชื่อมประสาน P9 P12 P15 และ Market PMA จะมีคุณสมบัติผ่านตามมาตรฐาน เนื่องจากในการศึกษานี้ต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์กับคุณสมบัติต่าง ๆ ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ดังนั้นจึงนำ AC60/70 P3 และ P6 มาศึกษาด้วย ถึงแม้ว่าแอสฟัลต์เหล่านี้จะไม่ผ่านตามมาตรฐานสำหรับโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ก็ตาม

4.1.1 การทดสอบ Penetration

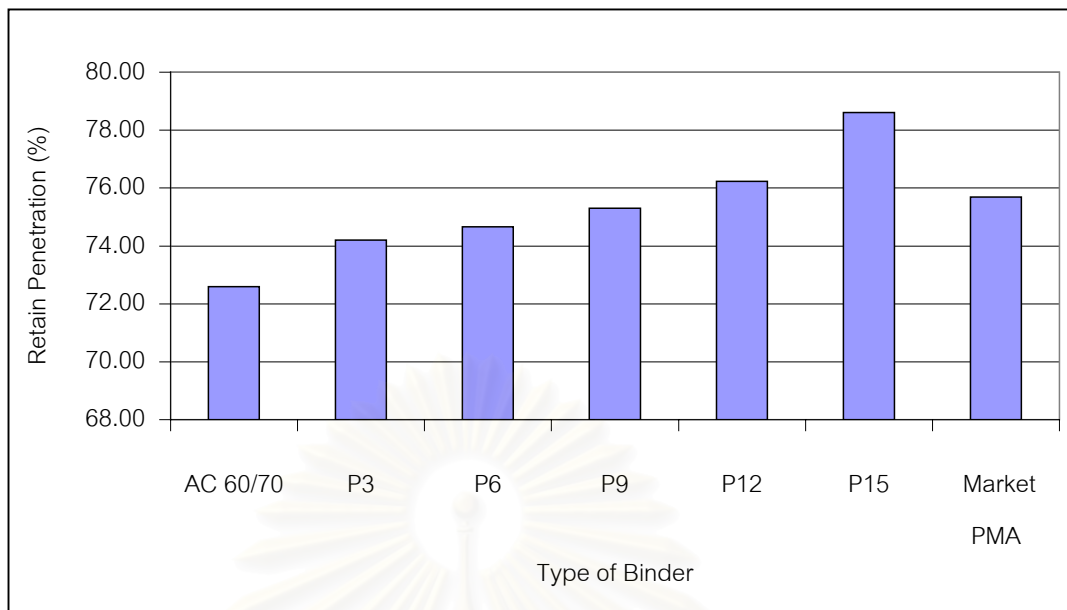


รูปที่ 4.1 ค่า Penetration ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผสมโพลีเมอร์ลงไปแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 ในปริมาณที่มากขึ้น ค่า Penetration จะมีแนวโน้มลดลง

ส่วน Market PMA ซึ่งเป็นโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย มีค่า Penetration เท่ากับ 64 เพื่อให้ได้ค่าที่ผ่านตามข้อกำหนด คือ อยู่ระหว่าง 60 – 70 ทั้งนี้เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการผลิต คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 80/100 อย่างไรก็ตาม ค่า Penetration ที่ได้จะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อผสมโพลีเมอร์ลงไปแอสฟัลต์ซีเมนต์แล้ว ค่า Penetration จะลดลง

ในการปรับ ค่า Penetration เพื่อให้ได้ตามข้อกำหนด นอกจากการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีความอ่อนนุ่มมากแล้ว ยังอาจใช้การเติมน้ำมันเตาเพื่อช่วยเพิ่มค่า Penetration ได้ แต่ทั้งนี้การเติมน้ำมันเตาลงไป จะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้มีจุดวาบไฟและจุดติดไฟ ที่ต่ำลง ซึ่งจะทำให้ความปลอดภัยในการใช้งานลดลง

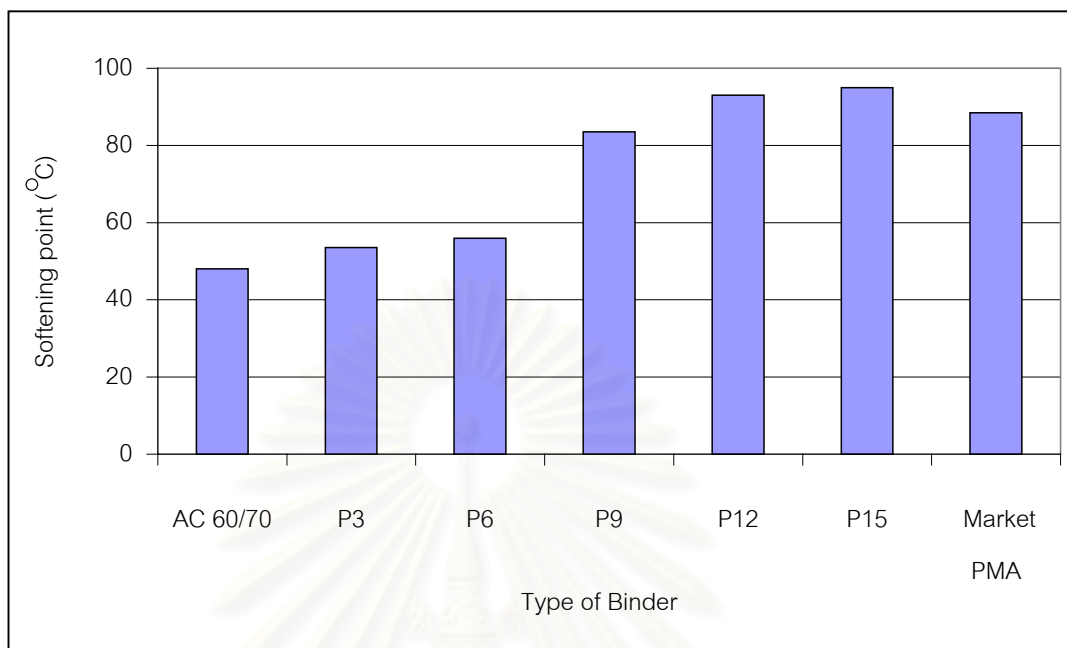


รูปที่ 4.2 ค่าร้อยละการคงเหลือของค่า Penetration ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบด้วย TFOT

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อวัสดุเชื่อมประสานมีปริมาณโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการคงเหลือของค่า Penetration ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบด้วย TFOT จะมีค่ามากขึ้น กล่าวคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่มาก จะช่วยลดการเกิดภาวะ Aging ของวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งภาวะ Aging นี้ จะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีสภาพแข็งเปราะขึ้นขาดความยืดหยุ่นและเกิดการแตกร้าวได้ในภายหลัง รวมทั้งการยึดจับกับมวลรวมที่แสดงถึงความคงทน (Durability) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก็จะลดลงด้วย

ส่วนค่าร้อยละของการคงเหลือของค่า Penetration ของ Market PMA มีค่าต่ำกว่า P12 เล็กน้อย เนื่องจาก Market PMA ที่นำมาใช้ในการศึกษานั้น มีปริมาณของโพลีเมอร์ ชนิด SBS ผสมอยู่ 4.7 % ขณะที่ P12 มีปริมาณของโพลีเมอร์ ซึ่งมี SBS 40 % ผสมอยู่ในเรซิน ผสมอยู่กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณ 12 % เมื่อเทียบปริมาณ SBS ที่ผสมอยู่ใน P12 ซึ่งมีปริมาณ เท่ากับ 4.8% จะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่าปริมาณ SBS ที่ผสมอยู่ใน Market PMA เล็กน้อย

4.1.2 การทดสอบจุดอ่อนตัว

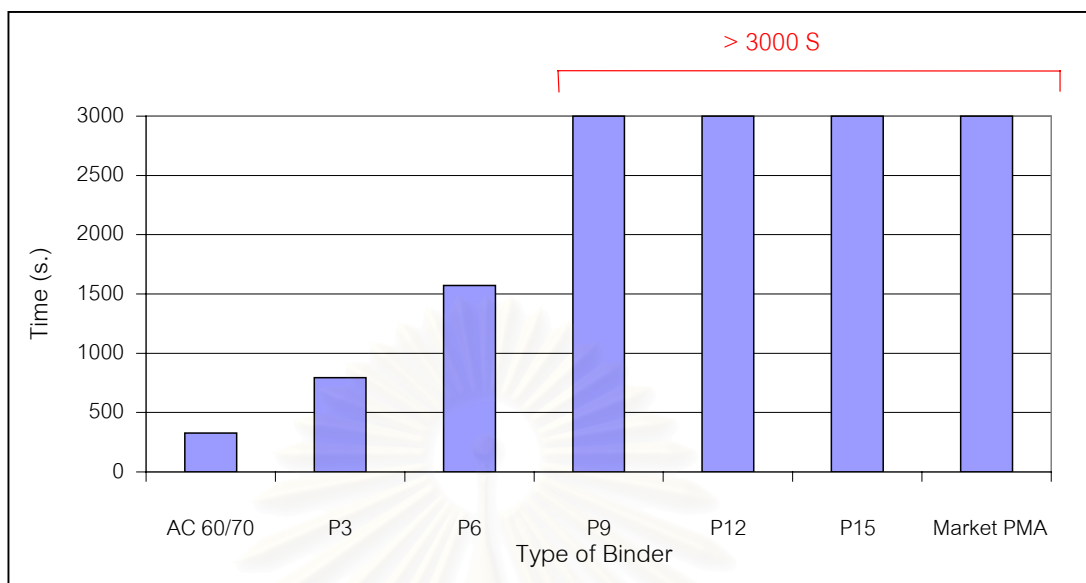


รูปที่ 4.3 ค่าจุดอ่อนตัว

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของโพลีเมอร์ โดยในช่วงตั้งแต่ AC 60/70 ซึ่งไม่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่ ถึง P6 ซึ่งมีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่ 6% ค่าจุดอ่อนตัวจะสูงขึ้นเล็กน้อย จากนั้นในช่วง P6 ถึง P12 ค่าจุดอ่อนตัวจะสูงขึ้นค่อนข้างมาก พอถึงช่วง P 12 ถึง P15 จุดอ่อนตัวจะสูงขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ช่วยให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีจุดอ่อนตัวที่สูงขึ้น โดยจุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีปริมาณโพลีเมอร์ไม่มากนักจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนปริมาณของโพลีเมอร์มากถึงระดับหนึ่งจุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์จะสูงขึ้นมาก จนเมื่อแอสฟัลต์ซีเมนต์มีปริมาณของโพลีเมอร์มากๆ จุดอ่อนตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์ก็จะสูงขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย ขณะที่จุดอ่อนตัวของ Market PMA นั้น ต่ำกว่า P12 เล็กน้อย ซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับค่าร้อยละของการคงเหลือของค่า Penetration ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบด้วย TFOT

ค่าจุดอ่อนตัวที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ช่วยให้วัสดุเชื่อมประสานมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ที่อุณหภูมิสูงที่ดีขึ้น ช่วยป้องกันการเกิดการไหลเยิ้มของส่วนผสมได้

4.1.3 การทดสอบ Float Test



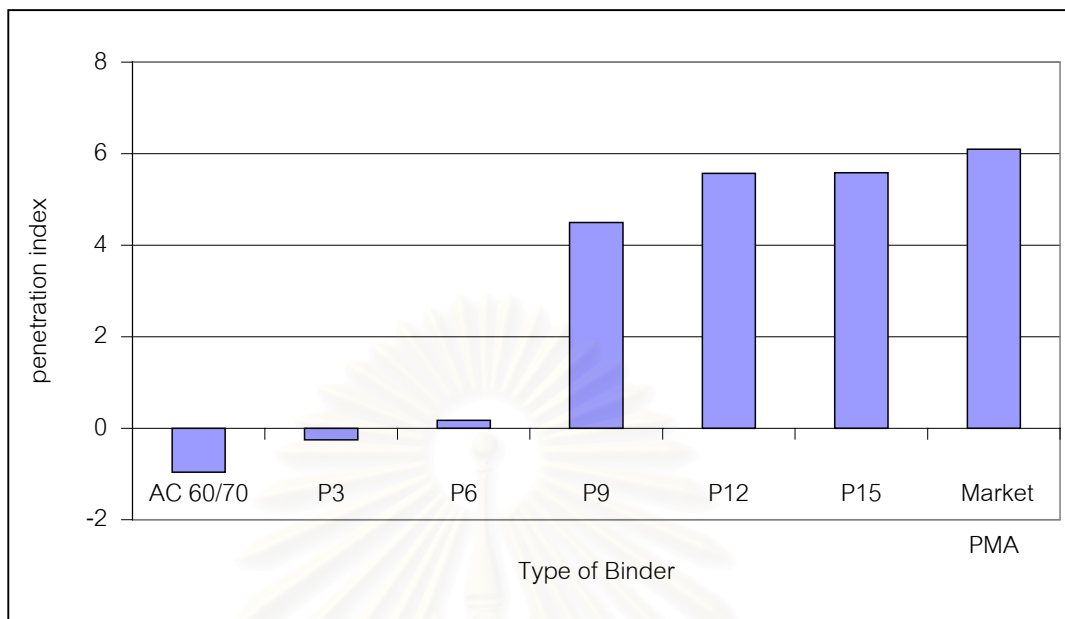
รูปที่ 4.4 ค่า Float Test

ค่าการทดสอบ Float test เป็นค่าที่แสดงความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ที่อุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับค่าจุดอ่อนตัว เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า มีค่าในลักษณะเดียวกันกับค่าจุดอ่อนตัว กล่าวคือ ปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสานจะช่วยให้วัสดุเชื่อมประสานมีค่า Float test ที่สูงขึ้น

เมื่อพิจารณา P9 P12 P15 และ Market PMA จะพบว่า มีค่ามากกว่า 3000 วินาที เนื่องจาก ในการทดสอบ Float test ใช้อุณหภูมิเพียง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสานเหล่านี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

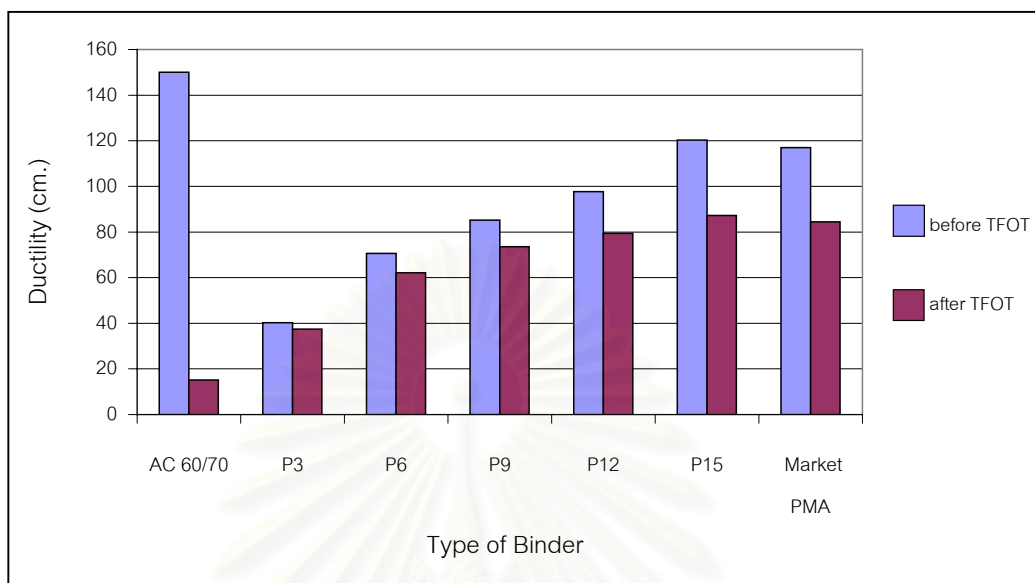
4.1.4 การทดสอบ Penetration Index (PI)



รูปที่ 4.5 ค่า Penetration Index (PI)

ค่า Penetration Index (PI) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Penetration กับค่าจุดอ่อนตัวของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งหากอยู่ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตลอดเวลา เช่น อุณหภูมิในผิวทางซึ่งตอนกลางวันอาจสูงถึง 60 องศาเซลเซียส แต่ตอนกลางคืนอาจมีอุณหภูมิต่ำลงถึง -5 องศาเซลเซียส เป็นต้น สภาพแวดล้อมเช่นนี้จะทำให้วัสดุผิวทางเกิดการเสียหายได้ ถ้าค่า PI ต่ำหรือติดลบแสดงว่าวัสดุชนิดนั้นมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูง แต่ถ้าค่า PI สูงหรือมีค่าเป็นบวก ก็แสดงว่าวัสดุนั้นมีสภาพค่อนข้างคงที่ไม่ว่าอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใดก็ตาม จึงเป็นวัสดุที่พึงประสงค์ในงานทาง ส่วนค่า PI ที่มีค่าเป็น 0 จะอยู่ระหว่างวัสดุ 2 ประเภทดังกล่าว โดยทั่วไปวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ธรรมดา จะมีค่า PI ติดลบดังแสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อผสมโพลีเมอร์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า PI สูงขึ้นเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า โพลีเมอร์สามารถช่วยลดความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้

4.1.5 การทดสอบการยึดติง



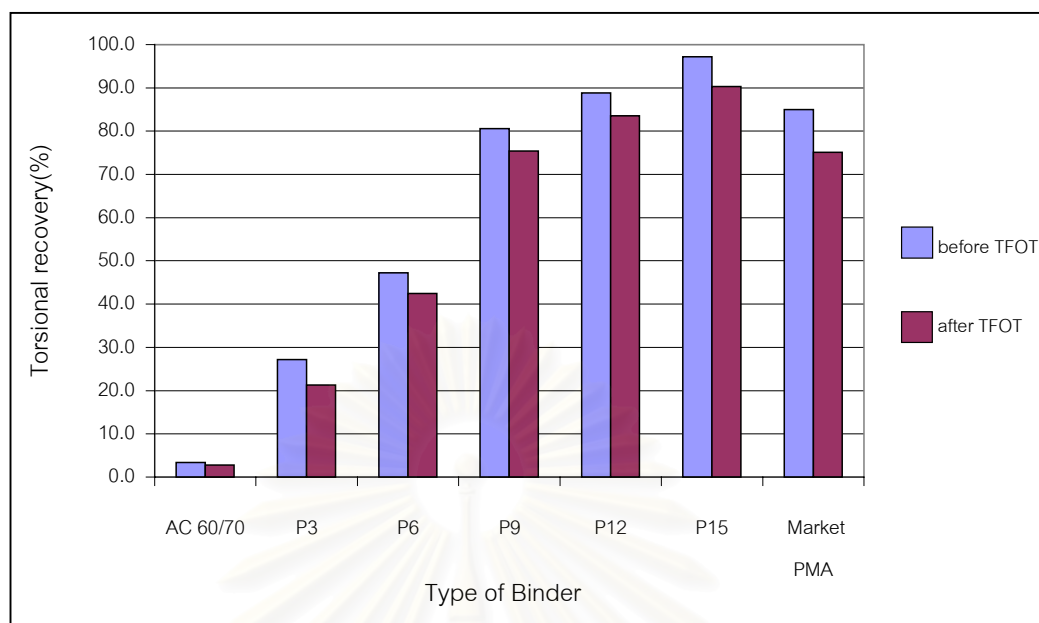
รูปที่ 4.6 ค่าการยึดติงที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

ในรูปที่ 4.6 เป็นการแสดงความสามารถยึดติง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส การทดสอบความสามารถยึดติงของวัสดุเชื่อมประสานก่อนการอบด้วย TFOT แสดงให้เห็นว่า AC60/70 มีความสามารถยึดติงสูงกว่าวัสดุเชื่อมประสานที่มีการผสมโพลีเมอร์ แต่เมื่อสังเกตลักษณะการขาดของชิ้นทดสอบ จะพบว่า AC 60/70 ขาดในลักษณะที่เป็นเส้นที่เล็กลงเรื่อย ๆ จนขาด ขณะที่วัสดุเชื่อมประสานที่ผสมโพลีเมอร์จะขาดทั้งที่เป็นเส้นหนาในลักษณะของการหัก เนื่องจากความเปราะ เมื่อพิจารณาเฉพาะวัสดุเชื่อมประสานที่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่ จะพบว่าเมื่อผสมโพลีเมอร์เพิ่มมากขึ้นความสามารถยึดติงก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อวัสดุเชื่อมประสานผ่านการอบด้วย TFOT ค่าการยึดติงของ AC6070 จะมีค่าลดลงอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับค่า Penetration Index ที่มีค่าติดลบ แสดงให้เห็นว่า AC60/70 มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูง ขณะที่วัสดุเชื่อมประสานที่มีการผสมโพลีเมอร์ จะมีความสามารถยึดติงลดลงไม่มากนัก

เมื่อพิจารณาถึงความสามารถยึดติงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะพบว่าชิ้นทดสอบทุกชิ้น ทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT มีความสามารถยึดติงมากกว่า 150 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แต่จะสังเกตได้ว่าในความยาวที่เท่ากันความหนาของเส้นวัสดุเชื่อมประสานที่ยืดออกเพิ่มมากขึ้นเมื่อวัสดุเชื่อมประสานนั้นมีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่มาก

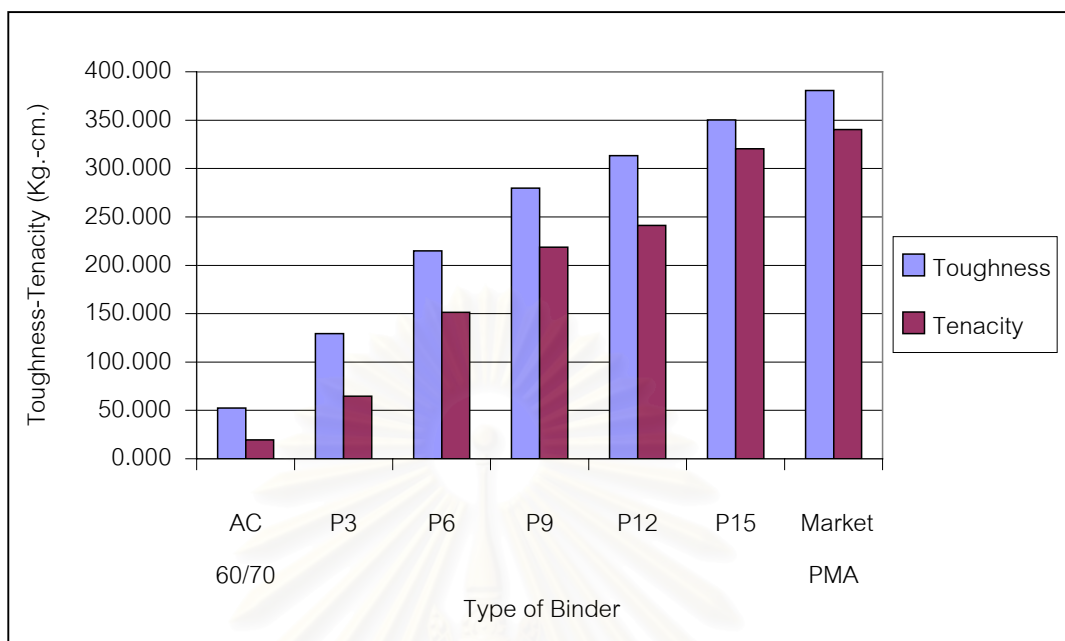
4.1.6 การทดสอบสมบัติการคืนตัวกลับ



รูปที่ 4.7 ค่าร้อยละการคืนตัวกลับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสทั้งก่อนและหลังการอบด้วย TFOT

รูปที่ 4.7 แสดงค่าร้อยละการคืนตัวกลับ (% Torsional Recovery) ของวัสดุเชื่อมประสานจากการวัดคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าค่าร้อยละการคืนตัวกลับของ AC60/70 ซึ่งไม่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่มีค่าน้อยมาก ในขณะที่วัสดุเชื่อมประสานที่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่มีค่าร้อยละการคืนตัวกลับเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสาน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า โพลีเมอร์สามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของวัสดุเชื่อมประสานได้

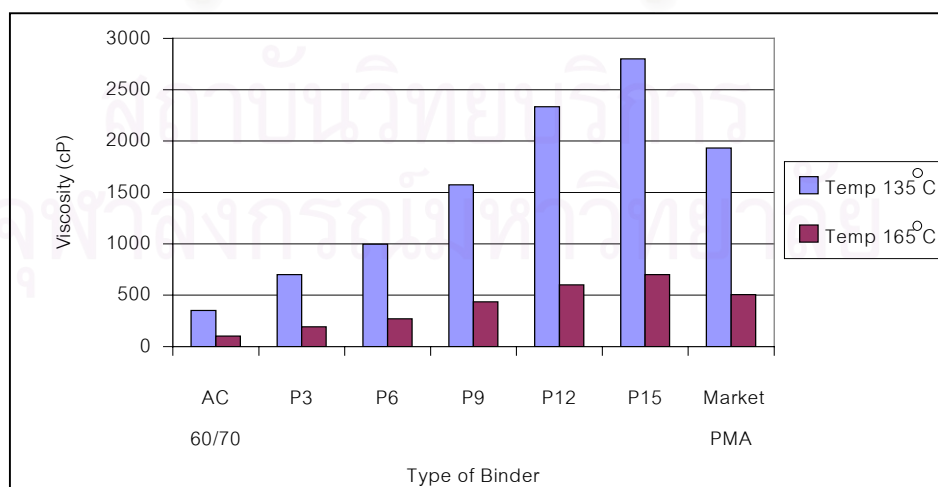
4.1.7 การทดสอบ Toughness และ Tenacity



รูปที่ 4.8 ค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากการวัดคุณสมบัติความเหนียวของวัสดุเชื่อมประสาน พบว่ามีแนวโน้มของค่าการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบค่าการคืนตัวกลับ กล่าวคือ มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสาน

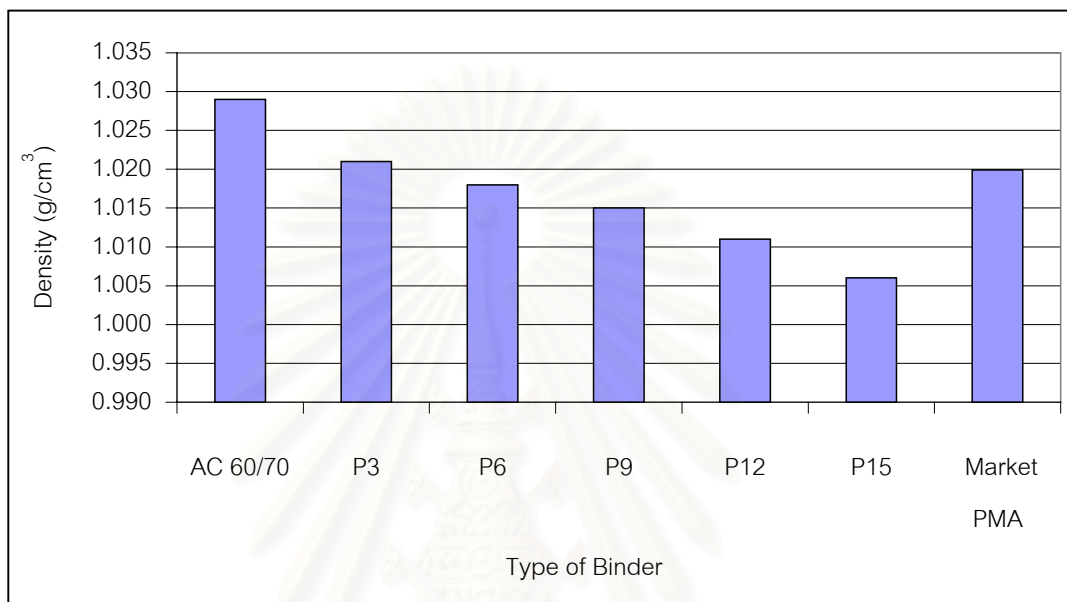
4.1.8 การทดสอบความหนืดแบบ Brookfield



รูปที่ 4.9 ค่าความหนืดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส

การวัดค่าความหนืดแบบ Brookfield เป็นการวัดความหนืดของวัสดุเชื่อมประสานที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผสมโพลีเมอร์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น วัสดุเชื่อมประสานจะมีความหนืดสูงขึ้นด้วย

4.1.9 การทดสอบหาความหนาแน่นของแอสฟัลต์ซีเมนต์

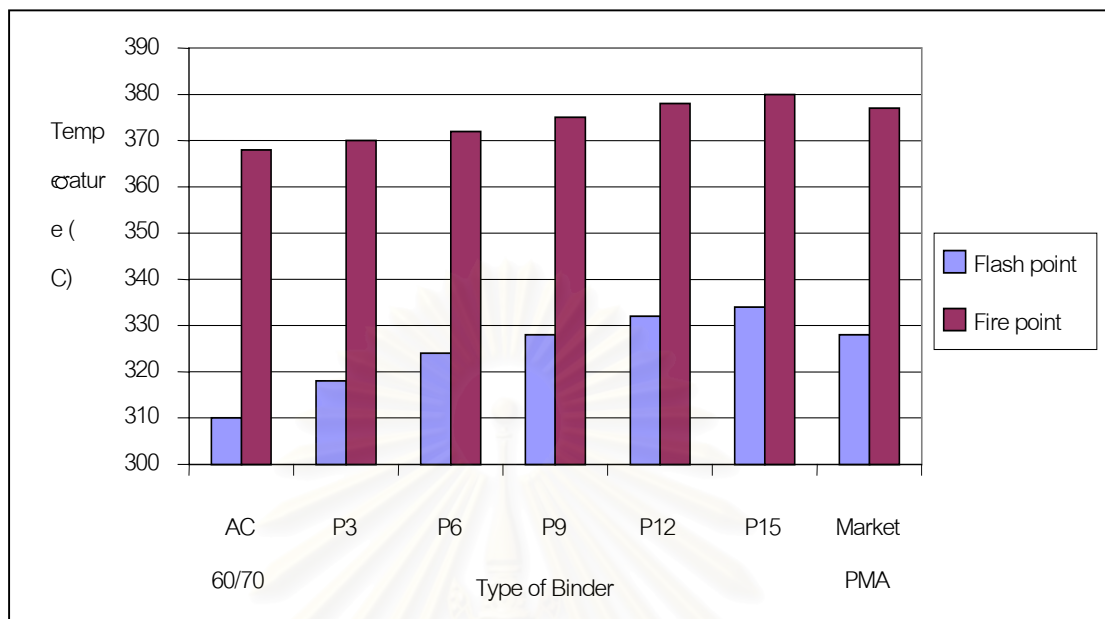


รูปที่ 4.10 ความหนาแน่นของแอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของวัสดุเชื่อมประสานมีค่าลดลงตามปริมาณของโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ เนื่องจากโพลีเมอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความถ่วงจำเพาะ 0.98 น้อยกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC60/70 ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 1.032 ดังตารางที่ ก11 (ภาคผนวก ก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.10 การทดสอบจุดติดไฟและจุดวาบไฟ



รูปที่ 4.11 จุดวาบไฟและจุดติดไฟของแอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า การผสมโพลีเมอร์ลงไปในวัสดุเชื่อมประสาน จะทำให้จุดวาบไฟ (Flash point) และจุดติดไฟ (Fire point) ของวัสดุเชื่อมประสานมีการเปลี่ยนแปลง โดยโพลีเมอร์ชนิด SBS ทำให้จุดวาบไฟ และจุดติดไฟของวัสดุเชื่อมประสานสูงขึ้น

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	ASTMC131 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 จะพบว่าค่าที่ได้ผ่านตามเกณฑ์ที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการก่อสร้างทางในประเทศไทยของกรมทางหลวงทุกประการ สามารถนำไปก่อสร้างชั้นผิวทาง (Wearing course) ได้

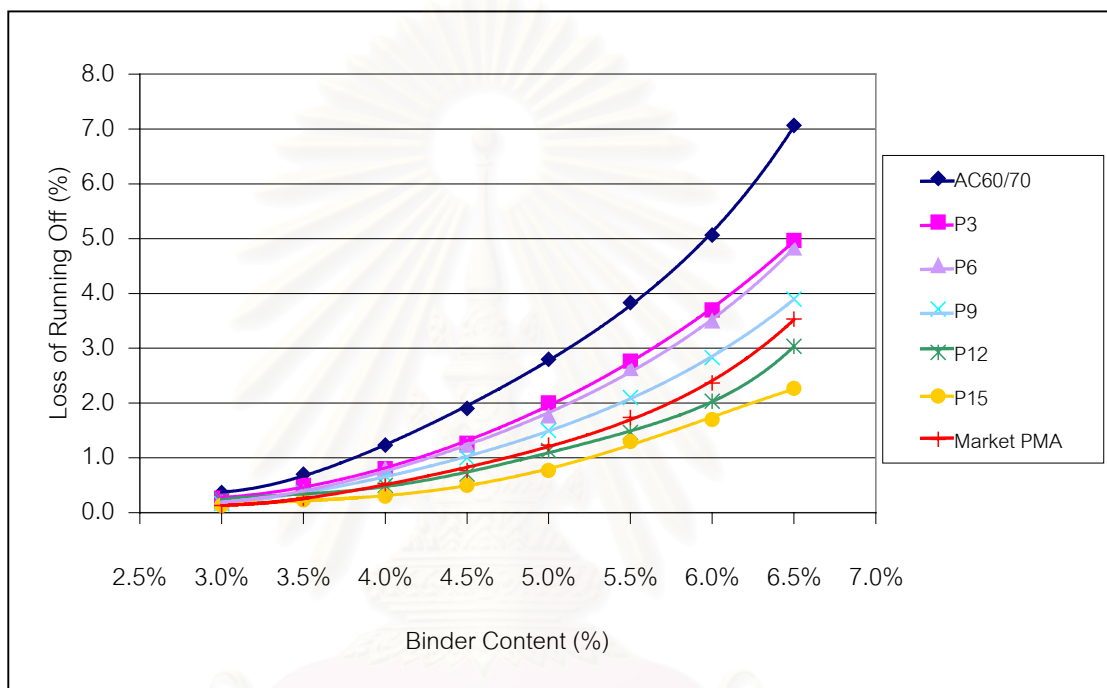
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสานชนิดต่างๆ ถึงแม้ว่าวัสดุเชื่อมประสานบางชนิด ได้แก่ AC60/70 P3 และ P6 จะมีคุณสมบัติบางอย่างไม่ได้ตามมาตรฐานของโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ ตามมาตรฐาน ทล.-ก. 408/2536 แต่ในการศึกษานี้จะนำมาใช้ศึกษาด้วย เนื่องจากต้องการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการผลิตโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์กับคุณสมบัติต่างๆ ของแอสฟัลต์ซีเมนต์

4.3.1 การออกแบบเพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม

4.3.1.1 การทดสอบด้วยวิธี Running Off

การทดสอบ Running Off เป็นการหาค่าแสดงถึงความต้านทานการหลุดลอกตามการจราจร เพื่อหาสัดส่วนของวัสดุเชื่อมประสานที่มากที่สุดที่เหมาะสมแต่ละชนิดที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ



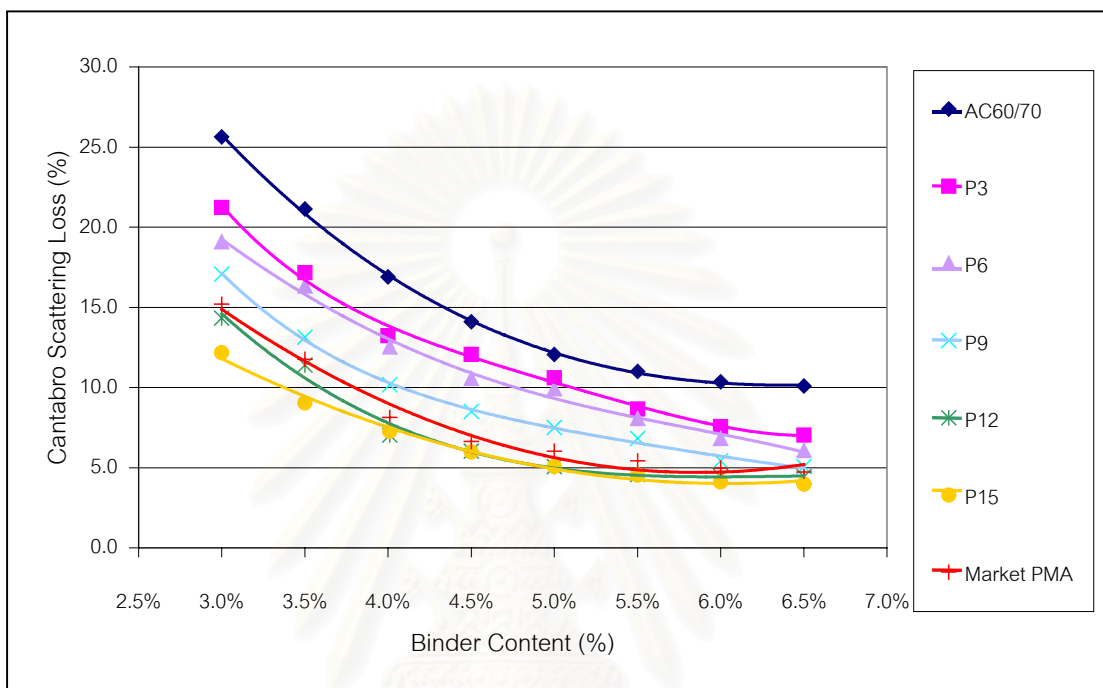
รูปที่ 4.12 ค่าร้อยละการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสานกับปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสานช่วยลดการหลุดลอกของวัสดุเชื่อมประสาน

ในการพิจารณาหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมมากที่สุดที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ จะดูจากความชันของกราฟ ถ้ากราฟมีความชันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดใด ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน ณ จุดนั้น ก็จะเป็นปริมาณที่มากที่สุดของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมแต่ละชนิดในการใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ จากการศึกษาพบว่าปริมาณของมากที่สุดของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมทุกชนิดในการศึกษานี้ อยู่ในช่วงระหว่าง 4.5 % ถึง 5.0 % โดยน้ำหนักมวลรวม

4.3.1.2 การทดสอบด้วยวิธี Cantabro

การทดสอบ Cantabro เป็นการหาค่าแสดงความสามารถในการรับการขัดสีของวัสดุผสมรวม ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาสัดส่วนที่น้อยที่สุดของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมแต่ละชนิดที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ



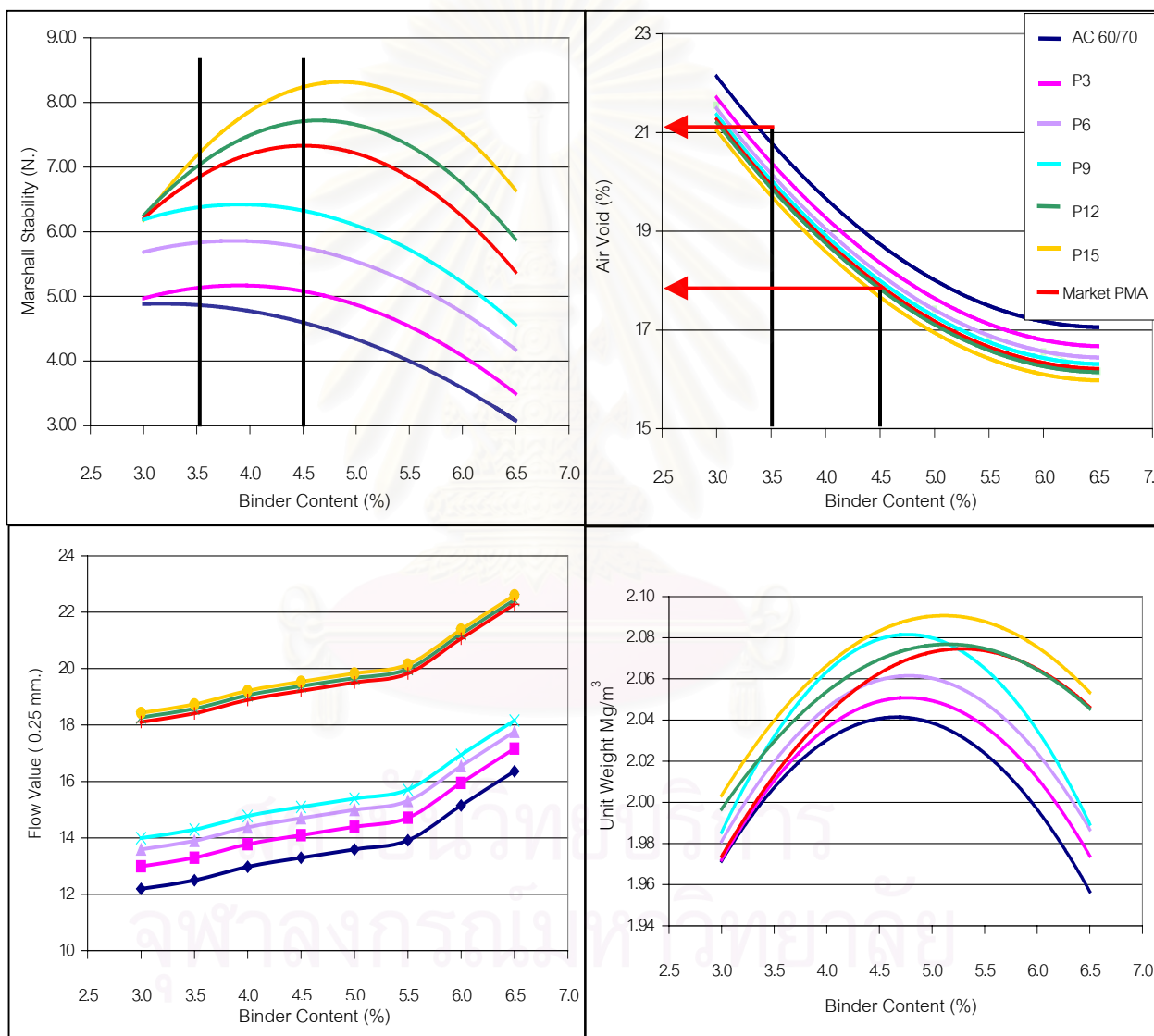
รูปที่ 4.13 ค่าร้อยละการสูญเสียของวัสดุผสมรวมเนื่องจากการขัดสี กับปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของโพลิเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสานจะช่วยเพิ่มความสามารถในการรับการขัดสีของวัสดุผสมรวม

การพิจารณาหาปริมาณที่น้อยที่สุดของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม ที่จะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ จะดูจากความชันของกราฟ ถ้ากราฟมีความชันที่ค่อนข้างคงที่ ณ จุดใด ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสาน ณ จุดนั้นก็คือ ปริมาณที่น้อยที่สุดของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมแต่ละชนิดที่ควรจะใช้ผสมทำแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ จากการศึกษาพบว่าปริมาณที่น้อยที่สุดของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมทุกชนิดในการศึกษานี้ อยู่ในช่วงระหว่าง 3.5 % ถึง 4.5 % โดยนำหนักมวลรวม

4.3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชล

การทดสอบ Marshall สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum binder content) ที่จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงได้มากที่สุด โดยที่ค่าร้อยละช่องว่างของอากาศ (% Air void) อยู่ระหว่าง 18 – 25 %



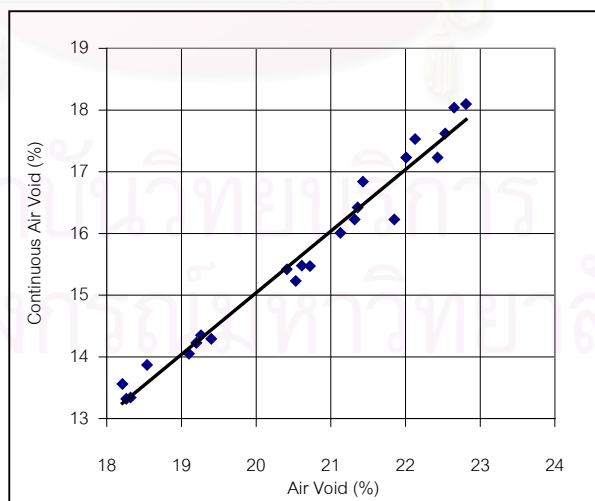
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบ Marshall ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสานช่วยทำให้หน่วยน้ำหนักของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำสูงขึ้น รวมทั้งช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำด้วย ดังจะเห็นได้จากค่า Marshall Stability ที่จะสูงขึ้นตามปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสาน นอกจากนี้ปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสานยังช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดหยุ่นของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตสามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากค่าของการไหล (Flow) ที่สูงขึ้นตามปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์

เมื่อพิจารณาปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานทุกชนิดที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงได้มากที่สุด จะพบว่าอยู่ในช่วง 3.5 – 4.5 % โดยน้ำหนักมวลรวม และเมื่อนำแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานอยู่ระหว่าง 3.5 – 4.5% โดยน้ำหนักมวลรวม มาพิจารณาถึงปริมาณของช่องว่างอากาศใน จะพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 18 – 21 % ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

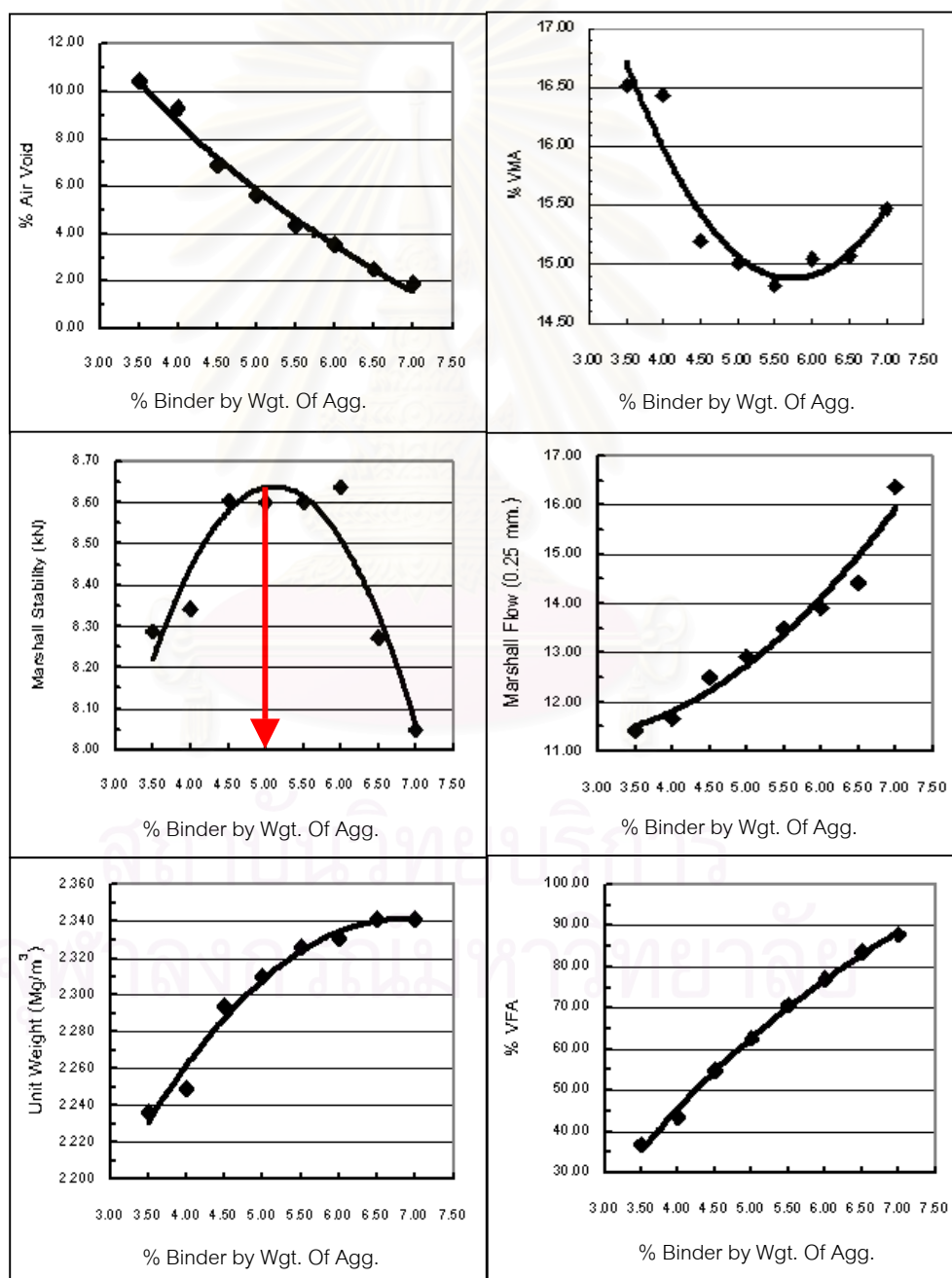
ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลการทดสอบ Running Off การทดสอบ Cantabro และการทดสอบ Marshall ร่วมกัน เพื่อหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่จะใช้ผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพ จึงเลือกใช้ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานในสัดส่วน 3.5% 4.0% และ 4.5% โดยน้ำหนักมวลรวม

นอกจากนี้ จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศและช่องว่างอากาศต่อเนื่อง ยังพบว่า ปริมาณช่องว่างอากาศต่อเนื่องเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณช่องว่างอากาศในแอสฟัลต์คอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศและช่องว่างอากาศต่อเนื่องของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ

สำหรับการทดสอบ Marshall เพื่อหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ในการศึกษานี้เลือกใช้เฉพาะแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.16 พบว่า ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงมีค่าเท่ากับ 5.0% โดยน้ำหนักมวลรวม ดังนั้นในการศึกษานี้ จึงเลือกใช้ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน เท่ากับ 5.0% โดยน้ำหนักมวลรวม สำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน



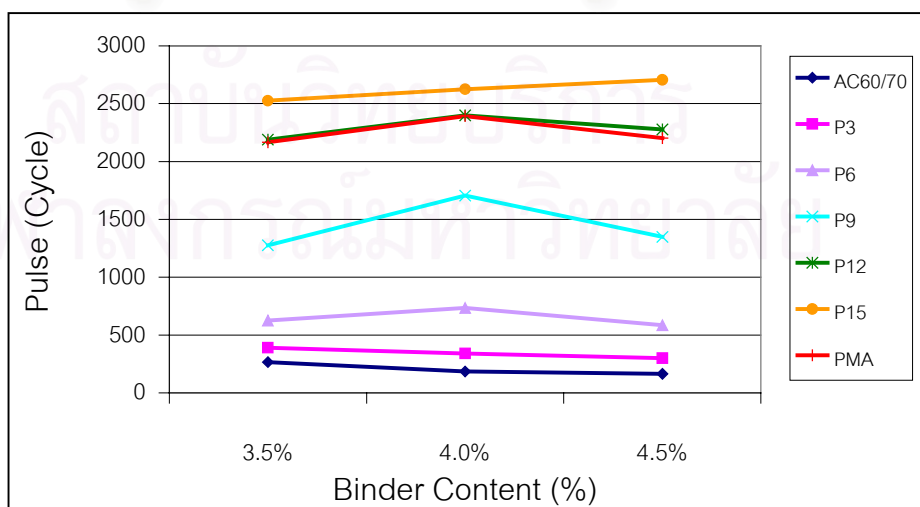
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบ Marshall ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

4.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

เนื่องจากค่าปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum binder content) ของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดที่ได้จากการทดสอบ Running Off การทดสอบ Cantabro และการทดสอบ Marshall มีค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 3.5 – 4.5 % โดยน้ำหนักมวลรวม ดังนั้น จึงใช้ค่าปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานครอบคลุม 3 ค่า คือ 3.5% 4.0% และ 4.5% โดยน้ำหนักมวลรวม นำมาทำการบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่อง Gyratory compactor เพื่อให้ได้ร้อยละปริมาณของช่องว่างอากาศ เท่ากับ 20 สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ ในส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงนั้น ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม เท่ากับ 5 % โดยน้ำหนักมวลรวม นำมาทำการบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่อง Gyratory compactor เพื่อให้ได้ร้อยละปริมาณของช่องว่างอากาศ เท่ากับ 7 ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณช่องว่างอากาศของผิวทางที่ก่อสร้างเสร็จใหม่โดยทั่วไป ทั้งนี้การบดอัดตัวอย่างด้วยเครื่อง Gyratory compactor จะช่วยให้ได้ก้อนตัวอย่างที่มีความหนาแน่นสม่ำเสมอ ทำให้สามารถเตรียมก้อนตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ทุกก้อน เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งาน (Performance) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต่อไป

4.3.2.1 การทดสอบความต้านทานการยุบตัวถาวร

การทดสอบความต้านทานการยุบตัวถาวร (Permanent deformation) จะพิจารณาจำนวนรอบในการรับน้ำหนักแบบกระทำซ้ำตามแนวแกนของก้อนตัวอย่างทดสอบ ที่ทำให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดสะสม (Accumulated strain) และมีการยุบตัวคิดเป็น 3% ของความสูงก้อนตัวอย่าง หรือที่ 3% Accumulated strain ด้วยการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นผลการทดสอบที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

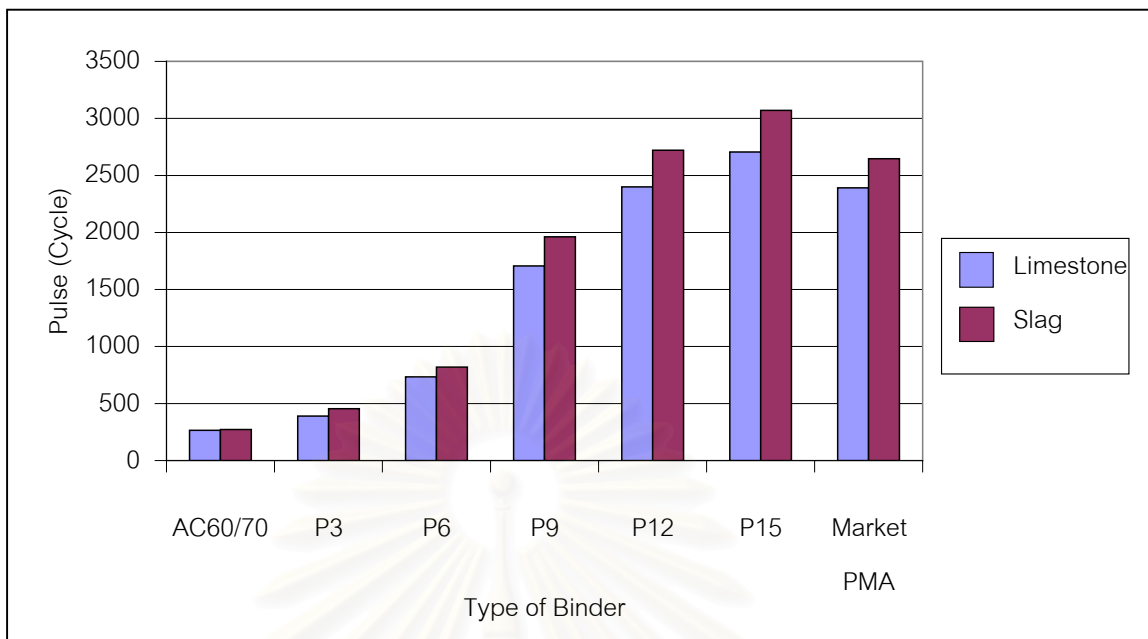
จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิดทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีค่าความต้านทานการยุบตัวถาวรที่ดีแตกต่างกัน โดยแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่มาก จะใช้ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานมากกว่าวัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่น้อยเพื่อจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีความต้านทานการยุบตัวที่ดี

อย่างไรก็ตาม พบว่า ที่ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่เท่ากัน แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่มากจะมีความต้านทานการยุบตัวถาวรดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่น้อย ดังจะสังเกตได้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ Market PMA เป็นวัสดุเชื่อมประสานจะมีความต้านทานการยุบตัวถาวรต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ P12 เป็นวัสดุเชื่อมประสานเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ เนื่องจากปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ใน Market PMA มีน้อยกว่า ปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ใน P12 เล็กน้อย ดังที่กล่าวมาข้างต้น

ดังนั้น ในการทดสอบประสิทธิภาพขั้นตอนต่อไป จะพิจารณาเฉพาะปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีความต้านทานการยุบตัวแบบถาวรสูงสุดสำหรับวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด รวมไปถึงการเปรียบเทียบผลของวัสดุผสมรวมที่ใช้หินปูน กับที่ใช้ตะกั่วเหล็กเป็นวัสดุผสมรวมในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ โดยพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะส่วนที่ปริมาณของวัสดุเชื่อมประสานที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวม มีความต้านทานการยุบตัวถาวรสูงสุด จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า

- ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ AC60/70 และ P3 เท่ากับ 3.5%
- ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ P6 P9 P12 และ PMA เท่ากับ 4.0%
- ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ P15 เท่ากับ 4.5%

จากการทดสอบความสามารถในการต้านทานการยุบตัวถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูน และที่ใช้ตะกั่วเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม จะสังเกตได้ว่า แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ตะกั่วเหล็กเป็นวัสดุผสมรวมมีความต้านทานการยุบตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.18 นอกจากนี้ ถ้าลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ AC60/70 P3 P6 P9 P12 กับ P15 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน จะได้เส้นโค้งที่มีลักษณะคล้ายตัว S



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูน และตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม

4.3.2.2 การทดสอบการหลุดลอก

การศึกษานี้ ทดสอบการหลุดลอก (Stripping test) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยวิธี Splitting test เพื่อหาความต้านทานการแตกร้าว (Cracking Resistance) โดยทั่วไป ค่า Splitting strength ratio ควรจะมีค่ามากกว่า 75% จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า ค่า Splitting strength ratio ของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด กับวัสดุผสมรวมทั้ง 2 ชนิดมีค่า มากกว่า 75% ยกเว้น ค่า Splitting strength ratio ของ AC60/70 กับตะกรันเหล็ก ที่ค่าต่ำกว่า 75% เล็กน้อย

นอกจากนี้ จะสังเกตเห็นว่า วัสดุเชื่อมประสานที่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่มากจะมีค่า Splitting strength ratio สูงกว่าวัสดุเชื่อมประสานที่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่น้อย เมื่อใช้วัสดุผสมรวม ชนิดเดียวกัน รวมทั้งเมื่อใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิดเดียวกัน จะเห็นว่าค่า Splitting strength ratio ของหินปูนสูงกว่าตะกรันเหล็ก

ตารางที่ 4.4 ค่า Splitting strength ratio จากการทดสอบการหลุดลอกด้วยวิธี Splitting test

Type of Binder	Type of Aggregate	
	Limestone	Slag
AC 60/70	76.53	74.57
P3	84.51	74.93
P6	85.50	75.22
P9	82.65	78.65
P12	86.21	79.19
P15	87.48	80.52
Market PMA	84.96	78.03

4.3.2.3 การทดสอบหาความต้านทานแรงเสียดทาน

ความต้านทานแรงเสียดทานของพื้นผิว (Skid Resistance) มีความสำคัญอย่างมากในเรื่องของความปลอดภัยในการขับขี่ กล่าวคือ ผิวทางที่มีความต้านทานแรงเสียดทานของพื้นผิวสูงจะมีความปลอดภัยในการขับขี่มากกว่าผิวทางที่มีความต้านทานแรงเสียดทานของพื้นผิวต่ำ

ผิวทางระบายน้ำ เป็นผิวทางที่ใช้วัสดุผสมรวมที่มีขนาดใหญ่กว่าผิวทางโดยทั่วไป ทั้งยังมีความสามารถในการระบายน้ำลงสู่ข้างใต้ชั้นผิวทางได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ผิวทางระบายน้ำมีความต้านทานแรงเสียดทานของพื้นผิวทั้งในสภาพแห้งและเปียก

จากตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ความต้านทานแรงเสียดทานของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีค่ามากกว่าความต้านทานแรงเสียดทานของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบแน่นทั้งในสภาพแห้งและเปียก อย่างไรก็ตามความต้านทานแรงเสียดทานของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวมมีค่ามากกว่าความต้านทานแรงเสียดทานของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวมทั้งในสภาพแห้งและสภาพเปียก แต่ความต้านทานแรงเสียดทานของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวมจะมีค่าใกล้เคียงกันระหว่างสภาพแห้งและสภาพเปียก ขณะที่ความต้านทานแรงเสียดทานของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวมจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออยู่ในสภาพเปียก ในส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงทั้งที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวมจะมีค่าความต้านทานแรงเสียดทานลดลงอย่างมากเมื่ออยู่ในสภาพเปียก นอกจากนี้จะเห็นว่าชนิดของวัสดุเชื่อมประสานไม่มีผลต่อความต้านทานแรงเสียดทานของผิวแอสฟัลต์คอนกรีต

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงเสียดทานของก้อนตัวอย่างทั้งในสภาพแห้ง และสภาพเปียก

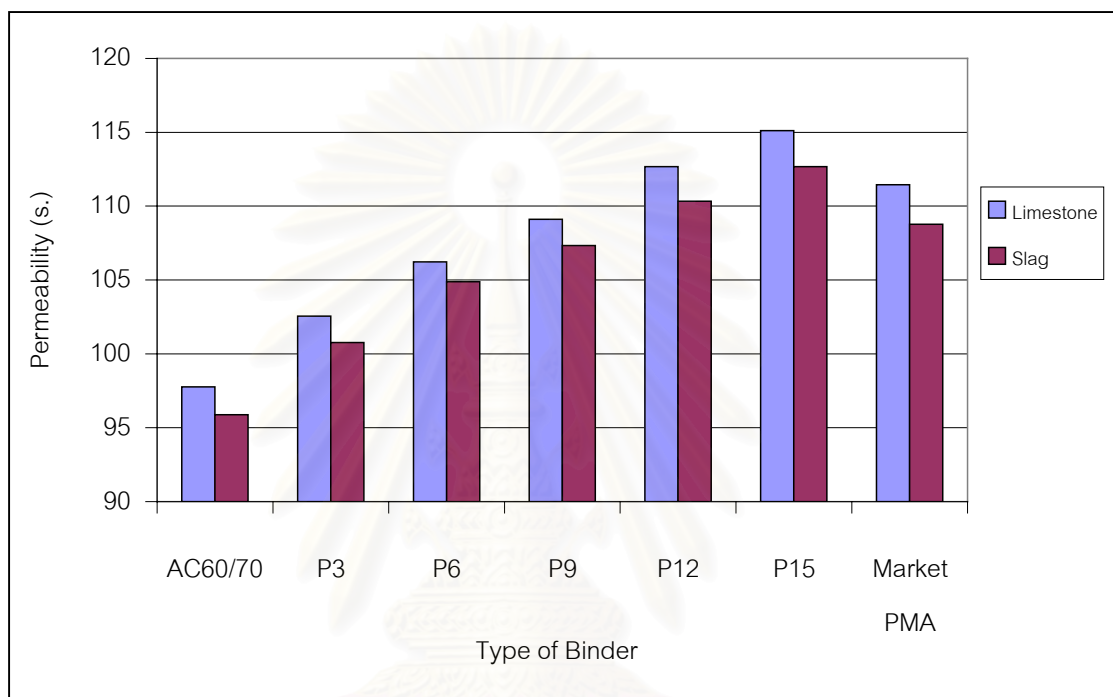
* Limestone			
Type of Asphalt Concrete	Type of Binder	Dry Condition	Wet Condition
Dense grade Asphalt Concrete	AC 60/70	75	66
Porous Asphalt Concrete	AC 60/70	96	95
	P3	95	93
	P6	94	94
	P9	95	93
	P12	94	93
	P15	94	92
	Market MA	93	92
* Slag			
Type of Asphalt Concrete	Type of Binder	Dry Condition	Wet Condition
Dense grade Asphalt Concrete	AC 60/70	80	68
Porous Asphalt Concrete	AC 60/70	114	109
	P3	114	109
	P6	112	108
	P9	115	112
	P12	113	107
	P15	113	108
	Market MA	114	109

4.3.2.4 การทดสอบหาความสามารถในการระบายน้ำ

แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวถนนกับล้อรถจะมีค่าต่ำลงเมื่อถนนมีน้ำท่วมขัง ดังนั้นผิวทางที่สามารถระบายน้ำลงสู่ด้านล่างได้เร็วจะช่วยลดปัญหาการท่วมขังของน้ำ ทำให้การขับที่มีความปลอดภัยมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดการกระเด็นของละอองน้ำด้านหลังยานพาหนะเมื่อยานพาหนะแล่นผ่าน ทั้งยังช่วยลดแสงสะท้อนจากผิวทางที่เปียกทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ทำให้มีทัศนวิสัยในการขับขี่ที่ดีขึ้นอีกด้วย

จากการศึกษาซึ่งประยุกต์มาจากการทดลองในภาคสนาม (In situ) ตามข้อแนะนำของกรมทางหลวงเบลเยียม พบว่าความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงทั้งที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม มีค่ามากกว่า 30 นาที ขณะที่ความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำทั้งที่ใช้หินปูนและ

ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม มีค่าอยู่ระหว่าง 96 - 115 วินาที ดังแสดงดังรูปที่ 4.19 ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 180 วินาที โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเชื่อมประสาน วัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่น้อยจะมีความสามารถในการระบายน้ำที่ดี นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวมจะมีความสามารถในการระบายน้ำได้เร็วกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุมวลรวม



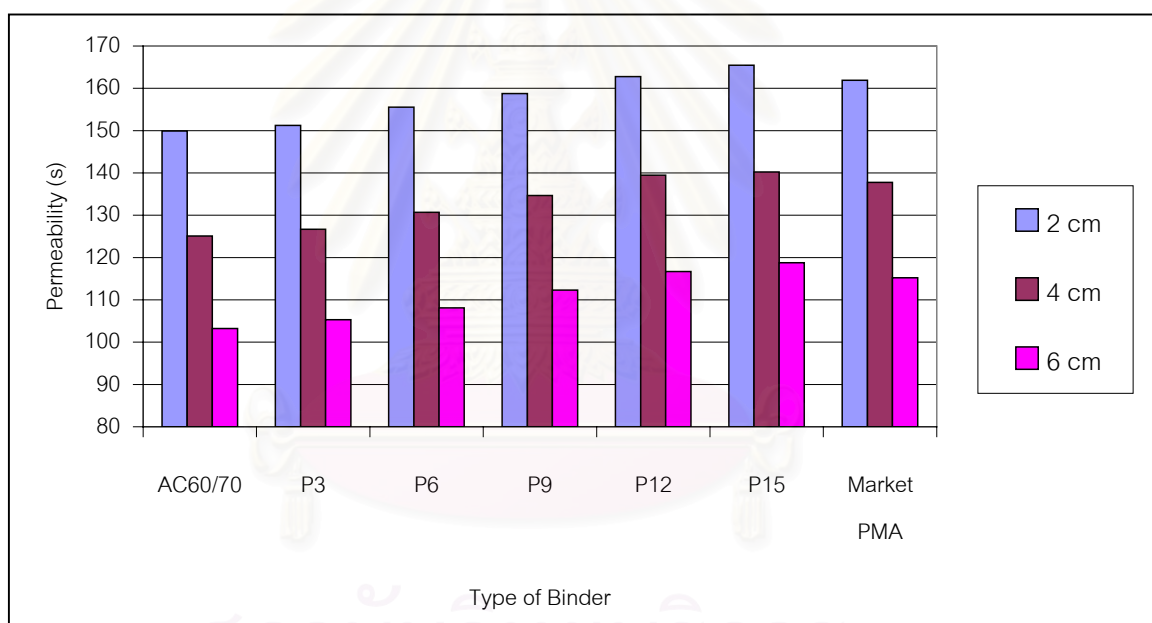
รูปที่ 4.19 ความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม ตามแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดต่างๆ

4.3.3 การทดสอบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำในการปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

ในการประยุกต์ใช้ผิวทางระบายน้ำนั้น จะปูผิวทางระบายน้ำทับบนผิวทางที่มีความหนาแน่นสูง เพื่อให้ถนนสามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น โดยผิวทางระบายน้ำจะทำหน้าที่เป็นชั้นที่ช่วยในการระบายน้ำลงสู่ด้านล่างของพื้นผิวถนน ส่วนผิวทางที่มีความหนาแน่นสูงจะทำหน้าที่รับแรงที่มาจากปริมาณการจราจร และเป็นชั้นกันน้ำไม่ให้ไหลลงสู่ชั้นถัดไป นอกจากนี้ยังช่วยในการระบายน้ำออกจากด้านข้างของถนนด้วย

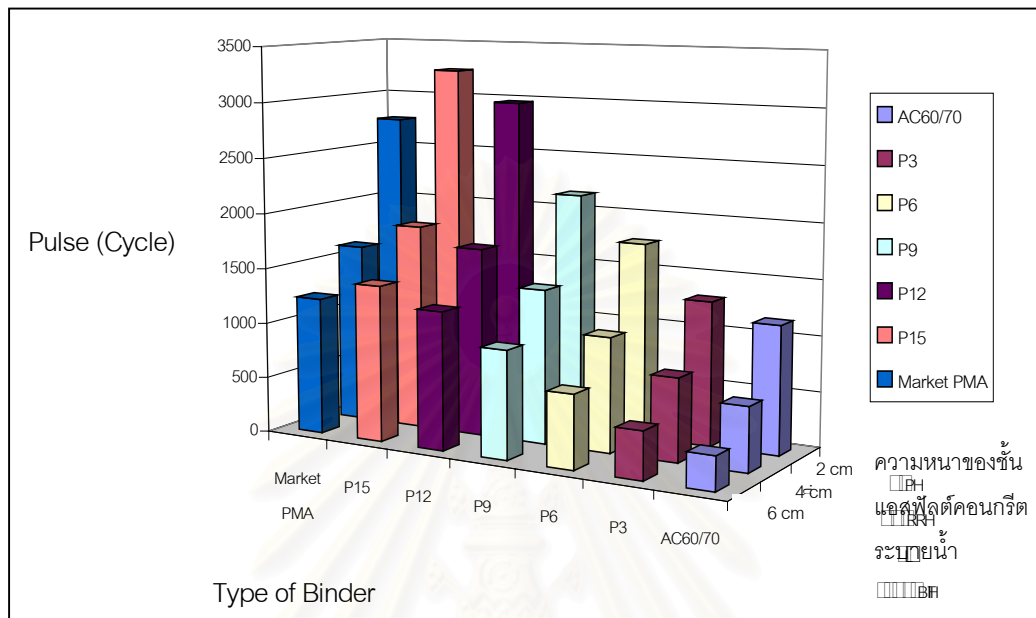
ในการทดสอบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำในการปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง จะศึกษาถึงผลที่ความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่มีต่อความสามารถในการต้านทานการยุบตัวถาวร และความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยในการศึกษานี้จะทดสอบเฉพาะแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวม และเปลี่ยนแปลงความหนาของแอสฟัลต์ระบายน้ำตามที่กำหนดไว้ คือ 2 เซนติเมตร 4 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่า ความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงมีผลต่อความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีชั้นของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำหนากว่าจะมีความสามารถในการระบายน้ำที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ทั้งหมดผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 180 วินาที



รูปที่ 4.3 ความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ 2cm 4cm และ 6cm ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่า ความหนาของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีผลต่อความต้านทานการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีชั้นของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำบางกว่าจะมีความต้านทานการยุบตัวแบบถาวรสูงกว่า



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ 2cm 4cm และ 6cm ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของผิวทางระบายน้ำที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผสมกับโพลีเมอร์ที่มี SBS ผสมอยู่ในเรซิน 40% ในสัดส่วนต่าง ๆ และโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย สามารถสรุปผลการศึกษาดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1.1 วัสดุเชื่อมประสาน

เมื่อวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมกับโพลีเมอร์ที่มี SBS ผสมอยู่ในเรซิน 40% เรซินในโพลีเมอร์จะละลายรวมเข้ากับเรซินในแอสฟัลต์ซีเมนต์ เพื่อช่วยให้ SBS ทำปฏิกิริยากับ Asphaltenes เกิดเป็นสายโซ่โพลีเมอร์ขึ้น ทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวและเหนียวมากขึ้น พบว่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

- โพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์แข็งขึ้น
- โพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีจุดอ่อนตัวสูงขึ้น
- โพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความเหนียวที่เพิ่มขึ้น ช่วยทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถเคลือบวัสดุมวลรวมได้ฟิล์มหนาขึ้น เป็นการเพิ่มความยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมวลรวมให้สูงขึ้น ทำให้ช่วยลดการหลุดลอกของวัสดุมวลรวม
- โพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความสามารถในการยึดติง และความเหนียวที่ดีขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ
- โพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น ซึ่งช่วยลดปัญหาการยุบตัวรูปถาวรของผิวทาง
- โพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ความไวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลดลง ซึ่งช่วยลดการเกิด Aging ของแอสฟัลต์ซีเมนต์

5.1.2 แอสฟัลต์คอนกรีต

- แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีความสามารถในการระบายน้ำลงสู่ใต้พื้นผิวได้ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ช่วยลดปัญหาการเอ่อนองของน้ำบนผิวทาง ส่งผลดีในเรื่องของการลดการกระเด็นของละอองน้ำด้านหลังยานพาหนะเมื่อยานพาหนะแล่นผ่าน และลดแสงสะท้อนจากผิวทางทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ช่วยเพิ่มทัศนวิสัยในการขับขี่ที่ดีขึ้น นอกจากนี้ แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีความต้านทานแรงเสียดทานที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงทั้งในสภาพแห้งและเปียก ซึ่งช่วยเพิ่มการสัมผัสระหว่างล้อของยานพาหนะกับผิวทางให้ดีขึ้นในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยเฉพาะในสภาพที่ผิวถนนเปียก ส่งผลให้มีความปลอดภัยในการขับขี่ที่มากขึ้น
- เนื่องจาก การผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำซึ่งใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่มาก มีค่าปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม (Optimum binder content) ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำซึ่งใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีโพลีเมอร์ผสมอยู่น้อย ดังนั้น การใช้วัสดุเชื่อมประสานที่มีโพลีเมอร์อยู่มากทำให้สามารถผสมวัสดุเชื่อมประสานในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งทำให้ผิวทางเกิดการออกซิเดชันช้าลง ทำวัสดุเชื่อมประสานเกิดการ Aging ช้าลงไปด้วย นอกจากนี้ วัสดุเชื่อมประสานที่มีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่มาก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการยุบตัวรูปถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ ส่งผลให้ช่วงเวลาในการใช้งานผิวทางยาวนานขึ้น
- ปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสาน ส่งผลทำให้วัสดุเชื่อมประสานนั้นมีความเหนียวที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีความต้านทานการยุบตัวรูปถาวรที่ดีขึ้น โดยความต้านทานการยุบตัวรูปถาวรที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ผสมอยู่ในวัสดุเชื่อมประสาน มีลักษณะคล้ายเส้นโค้งรูปตัว S นั่นคือ ปริมาณโพลีเมอร์ที่จะผสมในวัสดุเชื่อมประสานจะมีค่าอยู่ช่วงหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโพลีเมอร์ที่ทำให้ความต้านทานการยุบตัวรูปถาวรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจากการศึกษาี้ เลือกใช้โพลีเมอร์ที่มี SBS ผสมอยู่ในเรซิน 40% ซึ่งมีช่วงที่ทำให้ความต้านทานการยุบตัวรูปถาวรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อยู่ในช่วง 6 – 12% หรือเทียบเท่ากับ ปริมาณ SBS ระหว่าง 2.4 – 4.8%

- ชนิดของวัสดุผสมรวมมีผลต่อความต้านทานการยุบตัวรูปถาวร ซึ่งโดยทั่วไป วัสดุผสมรวมที่มีกำลังรับแรงมากกว่า จะช่วยทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำมีความต้านทานการยุบตัวรูปถาวร อย่างไรก็ตาม จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการต้านทานการหลุดลอก โดยทั่วไปวัสดุผสมรวมที่มีความหยابสูง จะมีความสามารถในการต้านทานการหลุดลอกต่ำ จากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับผิวทางระบายน้ำ ไม่แนะนำให้ใช้หินแกรนิตในการทำผิวทางระบายน้ำ เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานการหลุดลอกต่ำ ทั้ง ๆ ที่มีความรับแรงกระทำได้มาก
- ความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงมีผลต่อความต้านทานการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแปรผกผันซึ่งกันและกัน

กล่าวโดยสรุป จะพบว่า ผิวทางระบายน้ำสามารถช่วยลดปัญหาการกระเด็นของละอองน้ำขึ้นมาเมื่อมีรถยนต์พาดผ่าน และแสงสะท้อนจากพื้นถนนที่เปียก รวมทั้งมีความต้านทานแรงเสียดทานระหว่างผิวทางกับล้อรถที่ดี ซึ่งส่งผลช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการขับขี่

โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่ใช้โพลีเมอร์ชนิด SBS ผสมอยู่ในเรซิน 40% ที่เหมาะสมในการทำผิวทางระบายน้ำควรมีปริมาณโพลีเมอร์ผสมอยู่ 12% คิดเป็นปริมาณของ SBS เท่ากับ 4.8% ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณ SBS ที่ผสมอยู่ในโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ที่มีจำหน่ายในประเทศที่นำมาใช้ในการศึกษา

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะของการศึกษา

- ผิวทางระบายน้ำช่วยลดปัญหามลภาวะทางเสียงได้ จึงควรจะทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ด้วย
- การศึกษานี้เป็นเพียงการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น จึงควรที่จะนำไปประยุกต์ใช้จริง เพื่อศึกษาคุณสมบัติของผิวทางระบายน้ำในสภาพจริงต่อไป

5.2.2 ข้อเสนอแนะในการใช้งานผิวทางระบายน้ำ

บริเวณที่ไม่เหมาะสมในการใช้ผิวทางระบายน้ำ ได้แก่

- บริเวณที่มีขยะที่ละลายน้ำได้อยู่เป็นจำนวนมาก เพราะจะทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ เช่น เขตปศุสัตว์ เป็นต้น
- บริเวณที่มีบริเวณที่มีปริมาณการจราจรน้อย หรือมีการเคลื่อนตัวของจราจรช้า เพราะฝุ่นที่ตกค้างอยู่บนผิวทางจะไม่ถูกพัดพาไปกับการจราจร ทำให้ฝุ่นจะเข้าไปอุดในช่องว่าง
- ผิวทางระบายน้ำไม่เหมาะในการปูผิวทางบริเวณที่รับทางโค้ง ทางแยก เพราะผิวทางชนิดนี้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมวลรวมน้อย จึงรับแรงตามเส้นสัมผัส (tangential load) ได้น้อย ในการป้องกันไม่ให้ผิวทางหลุดออกอาจจะใช้วัสดุเติม (Filler) โรยผิวหน้าของผิวทางประมาณ 50 กรัม/ตารางเมตร ก่อนที่จะเปิดใช้งาน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมทางหลวง กองวิเคราะห์และวิจัย. วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 1. กรุงเทพฯ : 2530.
- กรมทางหลวง กองวิเคราะห์และวิจัย. วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 2. กรุงเทพฯ : 2519.
- ชยธินันท์ พรหมศร. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของยางแอสฟัลต์และวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารพอลิเมอร์. รายงานฉบับที่ วพ.166. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง. กรุงเทพฯ : 2541.
- ชยธินันท์ พรหมศร. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทางโดยวิธี INDIRECT TENSILE TEST เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. รายงานฉบับที่ วพ.167. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง. กรุงเทพฯ : 2541.
- ชยธินันท์ พรหมศร. Superpave Gyrotory Compactor : ทางเลือกใหม่ในการออกแบบส่วนผสมและควบคุมคุณภาพในระหว่างการก่อสร้างผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต้องการคุณภาพในการใช้งาน. ในบทความทางวิชาการการสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2543. ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง. กรุงเทพฯ : 2542.
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์, พิภักดิ์ คูหิรัญ และชยธินันท์ พรหมศร. ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงการออกแบบวัสดุผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง. รายงานการสัมมนาวิศวกรรมทาง ครั้งที่ 1, (16-17 กรกฎาคม). กรมทางหลวง. กรุงเทพฯ : 2544, หน้า 329-357.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, สำนักงาน. มอก. 851-2542 แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง. กรุงเทพฯ : 2544.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. วัสดุการทางชั้นสูง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ : 2537.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. แอสฟัลต์เทคโนโลยีสำหรับถนนลาดยาง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ : 2543.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนวิธีมาร์แชล. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ : 2544.
- วัชรินทร์ วิทยกุล. แอสฟัลต์ระบบซูเปอร์เพฟ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ : 2545.

ภาษาอังกฤษ

- Atkins, N.H. 1997. Highway Materials, Soils and Concretes. 3rd ed. Prentice-Hall. U.S.A. : 2545.
- Australian Standard. Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt : Dynamic Creep Test. AS 2891.12.1.1995.
- Balghunnain, F., Dhalaan, M.A., Dhubaib, I.A. and Noureldin, S.A. Field Trials with Polymer Modified Asphalt in Saudi Arabia : Polymer Modified Asphalt Binders. ASTM STP 1108. American Society for Testing and Materials. Philadelphia : 1992.
- Colwill, D.M., and other, Porous Asphalt Trails in the United Kingdom. Transportation Research Record 1427, 1993, pp. 13-21
- Department of Highways. UTM-5P Universal Testing Machine : General Manual Ministry of Transportation and Communications. Thailand : 2000.
- Dunn, K.D., Hicks, R.G., and Gower, J., Performance Factors and Quality Control/ Quality Assurance for Porous Pavement. Transportation Research Record 1575, 1990, pp. 10-17
- Heystraeten, G.V., and Moaux, C. Ten Years' Experience of Porous Asphalt in Belgium. Transportation Research Record 1265, 1990, pp. 33-40.
- Huang, Y. H. Pavement Analysis and Design. Prentice-Hall. U.S.A. : 1993.
- Kawanaka, and Nakanishi, Asphalt Modifier for Porous Asphalt Pavements : TAFPAC-SUPER. Japan.
- Kennedy, W.T., Kandhal, P.S., Roberts, F.L., Brown, E.R. and Lee, D.Y. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. 2nd ed. NAPA Research and Education Foundation. U.S.A. : 1996.
- Mohamed, H.E. and Yue, Z. Criteria for Evaluation of Rutting Potential Based on Repeated Uniaxial Compression Test. Transportation Research Record 1454. 1994. pp. 74-81.
- Shell Chemical Company. Kraton Rubber : The Asphalt Modifier that bring Strength and Long Life to Surface Treatment. Chicago, U.S.A. : 1992.

Turi, A.E. Thermal Characterization of Polymeric Materials. Academic Press, U.S.A. :
1981.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 1 คุณลักษณะของแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภท Penetration ตาม มอก. 851 - 2542

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบ
1	เพนิเทรชัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (น้ำหนักกด 100 กรัม เวลา 5 วินาที)	60 ถึง 70	มอก.1201
2	จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส	ไม่น้อยกว่า 232	มอก.1182 เล่ม 2
3	จุดอ่อนตัว องศาเซลเซียส	45 - 55	มอก.1216
4	ความยืดดึง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที)	ไม่น้อยกว่า 100	มอก.1202
5	การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ไม่น้อยกว่า 99	มอก.1203

กากที่เหลือจากการอบ

6	น้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อให้ความร้อน ร้อยละ	ไม่เกิน 0.8	มอก.1223
7	เพนิเทรชัน ร้อยละของเพนิเทรชันเดิม	ไม่น้อยกว่า 54	มอก.1223 และ มอก.1201
8	ความยืดดึง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (อัตราเร็วของเครื่องดึง 5 เซนติเมตรต่อนาที)	ไม่น้อยกว่า 50	มอก.1223 และ มอก.1202

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 2 คุณสมบัติของโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ ตาม ทล.-ก. 408/2536

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°C, 100 gm., 5 sec	0.1 mm	60	70	DH-T 403
2	Softening point, Ring and Ball	°C	70	-	ASTM D36
3	Penetration Index	-	+3.0	-	NLT-181 *
4	Ductility at 13°C, 5 cm/min	cm	55	-	DH-T 405
5	Torsional recovery at 25°C	%	70	-	NLT-329 *
6	Float test at 60°C	sec	3,000	-	ASTM D139
7	Toughness/Tenacity test, 25°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°C	cP	1,100	-	
	at 165°C	cP	300	-	
9	Storage stability at 165°C, 120 hrs				NTL-328 *
	Difference in softening point	°C	-	5	
10	Density at 25°C	gm/cc	1.00	1.05	ASTM D70
11	Flash point, Cleveland Open Cup	°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°C	%	70	-	DH-T 403
15	Variation in softening point	°C	4	6	ASTM D36
16	Ductility at 13°C, 5 cm/min	cm	40	-	DH-T 405
17	Torsional recovery at 25°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.	
AC 60/70	1	68	69	69	69	68	49	48	48	48	48	70.59
	2	67	68	67	67		47	48	49	48		
	3	67	68	69	68		47	49	47	48		
P3	1	52	53	53	53	52	39	39	38	39	39	74.20
	2	52	52	52	52		39	38	38	38		
	3	51	52	52	52		39	39	39	39		
P6	1	49	50	49	49	49	36	36	37	36	37	74.66
	2	48	48	49	48		36	37	36	36		
	3	50	50	49	50		37	37	38	37		
P9	1	46	45	45	45	46	34	34	35	34	35	75.30
	2	46	46	47	46		35	35	34	35		
	3	46	46	46	46		35	34	35	35		
P12	1	43	42	41	42	43	33	33	33	33	33	76.23
	2	44	44	43	44		32	33	32	32		
	3	43	43	44	43		33	32	34	33		
P15	1	39	40	40	40	40	31	31	31	31	31	78.61
	2	40	40	41	40		32	32	32	32		
	3	39	40	41	40		32	31	31	31		
Market PMA	1	64	65	65	65	64	49	50	48	49	48	75.69
	2	63	64	65	64		48	48	49	48		
	3	63	63	64	63		48	49	47	48		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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. (°C)	Softening Point (°C)	Avg. (°C)	
AC 60/70	1	48.0	48.0	52.5	52.5	4.5
	2	48.0		52.5		
P3	1	53.0	53.5	52.0	52.0	-1.5
	2	54.0		52.0		
P6	1	56.0	56.0	54.0	54.5	-1.5
	2	56.0		55.0		
P9	1	83.0	83.5	81.0	81.5	-2.0
	2	84.0		82.0		
P12	1	93.0	93.0	90.0	90.5	-2.5
	2	93.0		91.0		
P15	1	95.0	95.0	92.0	92.0	-3.0
	2	95.0		92.0		
Market PMA	1	88.0	88.5	86.5	86.5	-2.0
	2	89.0		86.5		

ตารางที่ ก 5 ผลการทดสอบค่า Penetration Index

Binder Type	Penetration	Softening Point	$V = \log 800 - \log Pt$	$U = \log 4(Tib - Tp)$	$PI = (20 - 300V) / (U + 30V)$
AC 60/70	68	48.0	1.07	13.85	-0.96
P3	52	53.5	1.19	17.16	-0.25
P6	49	56.0	1.21	18.66	0.17
P9	46	83.5	1.24	35.22	4.59
P12	43	93.0	1.27	40.94	5.54
P15	40	95.0	1.30	42.14	5.58
Market PMA	64	88.5	1.10	38.23	6.12

ตารางที่ ก 6 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.)
AC 60/70	1.0	> 150	> 150	> 150	> 150	14.3	15.1	> 150	> 150
	2.0	> 150		> 150		15.0		> 150	
	3.0	> 150		> 150		16.1		> 150	
P3	1.0	40.5	40.2	> 150	> 150	38.4	37.5	> 150	> 150
	2.0	38.6		> 150		36.2		> 150	
	3.0	41.6		> 150		37.9		> 150	
P6	1.0	71.2	70.7	> 150	> 150	63.2	62.1	> 150	> 150
	2.0	72.4		> 150		61.9		> 150	
	3.0	68.5		> 150		61.3		> 150	
P9	1.0	86.2	85.3	> 150	> 150	74.9	73.5	> 150	> 150
	2.0	85.4		> 150		73.5		> 150	
	3.0	84.4		> 150		72.1		> 150	
P12	1.0	98.4	97.7	> 150	> 150	81.1	79.4	> 150	> 150
	2.0	97.5		> 150		79.0		> 150	
	3.0	97.3		> 150		78.2		> 150	
P15	1.0	122.4	120.3	> 150	> 150	89.1	87.2	> 150	> 150
	2.0	118.3		> 150		86.5		> 150	
	3.0	120.1		> 150		86.1		> 150	
Market PMA	1.0	114.7	117.0	> 150	> 150	79.0	84.4	> 150	> 150
	2.0	116.0		> 150		86.3		> 150	
	3.0	120.2		> 150		87.8		> 150	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 7 ผลการทดสอบค่าร้อยละการคืนตัวกลับ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Before TFOT			After TFOT		
		มุ่ม (องศา)	% Torsional Recovery	Avg.	มุ่ม (องศา)	% Torsional Recovery	Avg.
AC 60/70	1	5.0	2.8	3.3	4.5	2.5	2.8
	2	7.0	3.9		5.5	3.1	
P3	1	49.0	27.2	27.2	38.0	21.1	21.3
	2	49.0	27.2		38.5	21.4	
P6	1	84.5	46.9	47.2	76.5	42.5	42.5
	2	85.5	47.5		76.5	42.5	
P9	1	144.5	80.3	80.6	135.5	75.3	75.4
	2	145.5	80.8		136.0	75.6	
P12	1	159.5	88.6	88.9	150.0	83.3	83.5
	2	160.5	89.2		150.5	83.6	
P15	1	175.0	97.2	97.2	162.0	90.0	90.3
	2	175.0	97.2		163.0	90.6	
Market PMA	1	152.0	84.4	85.0	135.0	75.0	75.1
	2	154.0	85.6		135.5	75.3	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 8 ผลการทดสอบค่า Float test ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	ค่า Float test (sec.)	Avg. (sec.)
Ac 60/70	1	325.00	326.00
	2	326.00	
	3	327.00	
P3	1	794.96	794.99
	2	795.34	
	3	794.68	
P6	1	1574.19	1572.15
	2	1572.22	
	3	1570.04	
P9	1	> 3000	> 3000
	2	> 3000	
	3	> 3000	
P12	1	> 3000	> 3000
	2	> 3000	
	3	> 3000	
P15	1	> 3000	> 3000
	2	> 3000	
	3	> 3000	
Market PMA	1	> 3000	> 3000
	2	> 3000	
	3	> 3000	

ตารางที่ ก 9 ผลการทดสอบค่า Toughness และ Tenacity ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	ค่า Toughness (Kg.cm)	Avg. (Kg.cm.)	ค่า Tenacity (Kg.cm)	Avg. (Kg.cm.)
AC 60/70	1	50.152	52.460	20.253	19.535
	2	52.945		18.725	
	3	54.282		19.628	
P3	1	135.647	129.353	67.552	64.623
	2	128.243		63.864	
	3	124.169		62.453	
P6	1	213.219	214.902	150.249	151.145
	2	215.471		150.819	
	3	216.016		152.367	
P9	1	278.523	279.791	217.069	218.543
	2	281.324		220.357	
	3	279.526		218.203	
P12	1	315.243	313.233	243.681	241.152
	2	313.742		241.713	
	3	310.714		238.062	
P15	1	350.207	350.154	320.406	320.458
	2	350.001		320.353	
	3	350.255		320.615	
Market PMA	1	381.667	380.667	338.743	340.267
	2	380.567		340.000	
	3	379.767		342.058	

ตาราง ก 10 ผลการทดสอบความหนืดแบบ Brookfield ที่อุณหภูมิ 135 และ 165 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Viscosity at 135 °C (cP)	Avg. (cP)	Viscosity at 165 °C (cP)	Avg. (cP)
AC 60/70	1	355.5	352.5	100.5	102.5
	2	353.0		103.0	
	3	349.0		104.0	
P3	1	706.5	700.0	194.0	192.5
	2	695.0		193.0	
	3	698.5		190.5	
P6	1	1006.5	997.5	268.5	270.0
	2	994.0		271.5	
	3	992.0		270.0	
P9	1	1580.0	1575.0	437.5	435.8
	2	1576.5		433.5	
	3	1568.5		436.5	
P12	1	2341.5	2335.0	600.0	600.0
	2	2336.0		602.5	
	3	2327.5		597.5	
P15	1	2806.0	2800.0	704.0	700.0
	2	2794.5		701.0	
	3	2799.5		695.0	
Market PMA	1	1934.5	1934.0	501.5	506.0
	2	1913.0		507.0	
	3	1954.5		509.5	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 11 ผลการทดสอบเสถียรภาพในการเก็บที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

Binder Type	Sample No.	Softening Point (°C)		Difference in Softening Point (°C)	Avg. (°C)
		ช่วงบน	ช่วงล่าง		
AC 60/70	1	47.0	48.5	1.5	1.5
	2	47.0	48.5	1.5	
P3	1	39.0	40.0	1.0	1.0
	2	39.5	40.5	1.0	
P6	1	37.0	38.5	1.5	1.5
	2	37.0	38.5	1.5	
P9	1	35.5	37.0	1.5	1.5
	2	35.5	37.0	1.5	
P12	1	33.0	34.0	1.0	1.0
	2	32.5	33.5	1.0	
P15	1	31.0	32.0	1.0	1.0
	2	31.0	32.0	1.0	
Market PMA	1	48.0	49.0	1.0	1.0
	2	48.0	49.0	1.0	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 12 ผลการทดสอบความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

Binder Type	Sample No.	Weight of Pyncometer (g.)	Weight of Pyncometer + Water (g.)	Weight of Pyncometer + Binder (g.)	Weight of Pyncometer + Binder + Water (g.)	Specific Gravity	Avg.	Density (g/cm ³)	Avg. (g/cm ³)
AC 60/70	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	
P3	1	29.1723	57.1828	49.1235	57.6694	1.025	1.024	1.022	1.021
	2	31.1033	57.6943	51.1152	58.2014	1.026		1.023	
	3	29.0842	57.1996	49.3201	57.6352	1.022		1.019	
P6	1	29.1723	57.1828	49.2514	57.6150	1.022	1.021	1.019	1.018
	2	31.1033	57.6943	50.9824	58.1032	1.021		1.018	
	3	29.0842	57.1996	49.1023	57.6113	1.021		1.018	
P9	1	29.1723	57.1828	49.2301	57.5181	1.017	1.018	1.014	1.015
	2	31.1033	57.6943	51.1354	58.0678	1.019		1.016	
	3	29.0842	57.1996	49.2034	57.5359	1.017		1.014	
P12	1	29.1723	57.1828	50.0289	57.5113	1.016	1.014	1.013	1.011
	2	31.1033	57.6943	51.2415	57.9527	1.013		1.010	
	3	29.0842	57.1996	49.6235	57.4632	1.013		1.010	
P15	1	29.1723	57.1828	49.6624	57.3656	1.009	1.009	1.006	1.006
	2	31.1033	57.6943	51.1362	57.8926	1.010		1.007	
	3	29.0842	57.1996	49.3512	57.3405	1.007		1.004	
Market 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	

* ค่าความหนาแน่นของน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.997 g/cm³

ตารางที่ ก 13 ผลการทดสอบจุดวาบไฟ และจุดติดไฟด้วย Cleveland Open Cup

Binder Type	Sample No.	Flash Point ($^{\circ}$ C)	Avg. ($^{\circ}$ C)	Fire Point ($^{\circ}$ C)	Avg. ($^{\circ}$ C)
AC 60/70	1	310	310	371	368
	2	311		364	
	3	310		370	
P3	1	319	318	371	370
	2	317		370	
	3	319		369	
P6	1	324	324	373	372
	2	324		372	
	3	324		371	
P9	1	328	328	375	375
	2	327		374	
	3	328		376	
P12	1	331	332	378	378
	2	332		378	
	3	332		377	
P15	1	334	334	380	380
	2	333		381	
	3	335		380	
Market PMA	1	331	328	377	377
	2	328		378	
	3	326		376	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 14 ผลการทดสอบการละลายในไตรคลอโรเอทิลีน

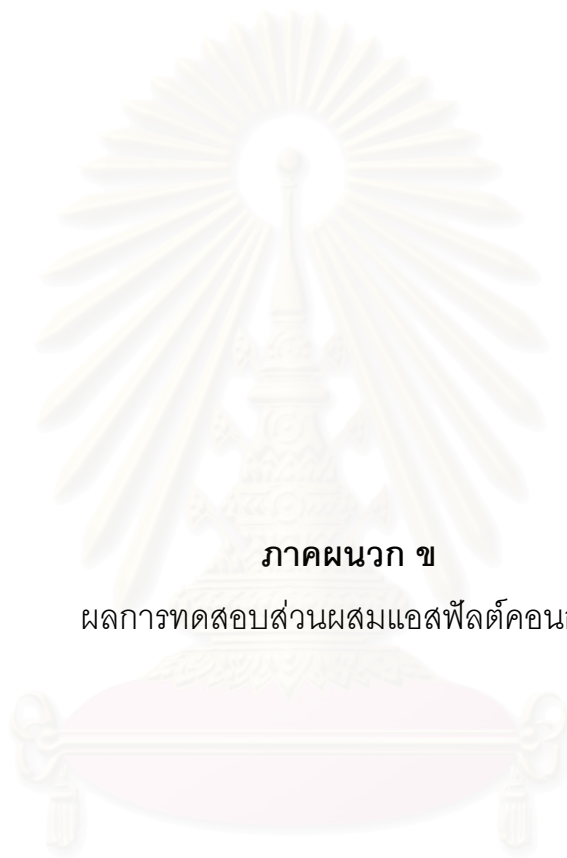
Binder Type	Sample No.	Weight of Erlenmeyer Flask (g.)	Weight of Erlenmeyer Flask + Binder (g.)	Weight of Binder (g.)	Weight of Gooch Crucible + Filter Pad (g.)	Weight of Gooch Crucible + Filter Pad + Insoluble Matter (g.)	Weight of Insoluble Matter (g.)	Weight of Binder Solution in Solvent (g.)	% of Binder Soluble in Solvent	Avg.
AC 60/70	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	
P3	1	94.7281	96.7321	2.0040	17.9050	17.9094	0.0044	1.9996	99.78	99.80
	2	99.5475	101.6509	2.1034	19.0501	19.0539	0.0038	2.0996	99.82	
P6	1	94.7281	96.7288	2.0007	17.9050	17.9074	0.0024	1.9983	99.88	99.89
	2	99.5475	101.8601	2.3126	19.0501	19.0526	0.0025	2.3101	99.89	
P9	1	94.7281	96.8315	2.1034	17.9050	17.9067	0.0017	2.1017	99.92	99.94
	2	99.5475	101.6153	2.0678	19.0501	19.0509	0.0008	2.0670	99.96	
P12	1	94.7281	96.7774	2.0493	17.9048	17.9087	0.0039	2.0454	99.81	99.80
	2	99.5475	101.5709	2.0234	19.0501	19.0543	0.0042	2.0192	99.79	
P15	1	94.7281	96.8142	2.0861	17.9051	17.9082	0.0031	2.0830	99.85	99.88
	2	99.5475	101.5518	2.0043	19.0501	19.0519	0.0018	2.0025	99.91	
Market 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	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก 15 ผลการทดสอบน้ำหนักที่สูญเสียจากความร้อนวิธี Thin Film Oven Test (TFOT)

Binder Type	Sample No.	Weight of Container (g.)	Before TFOT		After TFOT		% Loss	Avg.
			Weight of Container + Binder (g.)	Weight of Binder (g.)	Weight of Container + Binder (g.)	Weight of Binder (g.)		
AC 60/70	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	
P3	1	112.9576	162.9699	50.0123	162.9049	49.9473	0.13	0.15
	2	109.9246	159.9191	49.9945	159.8441	49.9195	0.15	
	3	113.2055	163.1808	49.9753	163.1008	49.8953	0.16	
P6	1	112.9576	163.5999	50.6423	163.5391	50.5815	0.12	0.12
	2	140.4904	190.8387	50.3483	190.7732	50.2828	0.13	
	3	138.0050	188.1298	50.1248	188.0697	50.0647	0.12	
P9	1	112.9576	162.9612	50.0036	162.9112	49.9536	0.10	0.10
	2	140.4904	190.5356	50.0452	190.4956	50.0052	0.08	
	3	138.0050	188.0006	49.9956	187.9456	49.9406	0.11	
P12	1	107.9912	158.1166	50.1254	158.0815	50.0903	0.07	0.07
	2	135.2636	185.2685	50.0049	185.2385	49.9749	0.06	
	3	109.0055	159.3531	50.3476	159.3128	50.3073	0.08	
P15	1	107.9912	157.8564	49.8652	157.8265	49.8353	0.06	0.05
	2	135.2636	185.5010	50.2374	185.4809	50.2173	0.04	
	3	109.0055	159.8467	50.8412	159.8264	50.8209	0.04	
Market 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	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 1 ผลการทดสอบ Marshall ของ AC 60/70

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.032
 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AC}) : 2.588
 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.652
 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.452

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 (α) : 0.96

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	% VMA	% VFA	Stability (N)			Flow	
						in air	Sat. Surface Dry in air	in water									Measured	Factor	Adjusted	Measured	ค่าที่ใส่ (0.25 mm.)
1	3.00	2.91	1.98	102.20	72.51	1235.50	1295.00	667.00	628.00	1.967	1.967	3.77	73.80	22.43	26.20	14.38	5.05	0.89	4.49	3.13	12.52
2	3.00	2.91	1.98	102.07	72.84	1236.00	1294.50	668.50	626.00	1.974	1.974	3.78	74.07	22.15	25.93	14.58	4.87	0.89	4.33	3.03	12.12
3	3.00	2.91	1.98	102.30	71.98	1237.00	1296.00	667.00	629.00	1.967	1.967	3.77	73.77	22.46	26.23	14.36	5.23	0.86	4.50	2.98	11.92
AVQ.	3.00	2.91	1.98	102.19	72.44	1236.17	1295.17	667.50	627.67	1.969	1.969	3.77	73.88	22.35	26.12	14.44	5.05	0.88	4.44	3.05	12.19
4	3.50	3.38	2.45	102.90	72.41	1245.00	1295.00	670.00	625.00	1.992	1.992	4.73	74.37	20.91	25.63	18.45	5.86	0.89	5.22	2.80	11.20
5	3.50	3.38	2.45	102.47	71.99	1242.00	1294.50	675.00	619.50	2.005	2.005	4.76	74.84	20.40	25.16	18.92	6.12	0.89	5.45	3.03	12.12
6	3.50	3.38	2.45	101.83	72.08	1246.00	1293.00	672.00	621.00	2.006	2.006	4.76	74.90	20.33	25.10	18.98	6.14	0.89	5.46	3.54	14.16
AVQ.	3.50	3.38	2.45	102.40	72.16	1244.33	1294.17	672.33	621.83	2.001	2.001	4.75	74.70	20.54	25.30	18.78	6.04	0.89	5.38	3.12	12.49
7	4.00	3.85	2.92	102.93	71.95	1248.50	1298.00	678.50	619.50	2.015	2.015	5.70	74.87	19.43	25.13	22.68	5.53	0.89	4.92	3.25	13.00
8	4.00	3.85	2.92	102.00	72.34	1250.00	1301.00	678.00	623.00	2.006	2.006	5.67	74.54	19.78	25.46	22.29	5.67	0.89	5.05	3.51	14.04
9	4.00	3.85	2.92	102.93	71.84	1249.50	1302.50	680.50	622.00	2.009	2.009	5.68	74.63	19.69	25.37	22.40	5.42	0.93	5.04	2.97	11.88
AVQ.	4.00	3.85	2.92	102.62	72.04	1249.33	1300.50	679.00	621.50	2.010	2.010	5.69	74.68	19.63	25.32	22.46	5.54	0.90	5.00	3.24	12.97
10	4.50	4.31	3.38	102.77	70.56	1256.00	1304.00	682.00	622.00	2.019	2.019	6.62	74.66	18.72	25.34	26.12	5.03	0.93	4.68	3.24	12.96
11	4.50	4.31	3.38	102.13	70.89	1258.00	1305.00	683.50	621.50	2.024	2.024	6.64	74.84	18.52	25.16	26.37	4.98	0.89	4.43	3.55	14.20
12	4.50	4.31	3.38	102.63	71.23	1257.50	1304.50	683.00	621.50	2.023	2.023	6.63	74.81	18.56	25.19	26.33	5.13	0.93	4.77	3.18	12.72
AVQ.	4.50	4.31	3.38	102.51	70.89	1257.17	1304.50	682.83	621.67	2.022	2.022	6.63	74.77	18.60	25.23	26.28	5.05	0.92	4.63	3.32	13.29
13	5.00	4.76	3.84	102.47	72.32	1262.00	1310.00	685.00	625.00	2.019	2.019	7.52	74.30	18.18	25.70	29.26	4.58	0.93	4.26	3.38	13.52
14	5.00	4.76	3.84	102.17	71.86	1265.00	1311.00	685.00	626.00	2.021	2.021	7.52	74.36	18.11	25.64	29.35	4.37	0.93	4.06	3.49	13.96
15	5.00	4.76	3.84	102.10	71.78	1265.00	1312.00	685.50	626.50	2.019	2.019	7.52	74.30	18.18	25.70	29.26	4.67	0.89	4.16	3.32	13.28
AVQ.	5.00	4.76	3.84	102.25	71.99	1264.00	1311.00	685.17	625.83	2.020	2.020	7.52	74.32	18.16	25.68	29.29	4.54	0.92	4.16	3.40	13.59
16	5.50	5.21	4.30	102.90	72.54	1267.50	1315.00	687.00	628.00	2.018	2.018	8.41	73.92	17.67	26.08	32.23	4.12	0.93	3.83	3.44	13.76
17	5.50	5.21	4.30	102.83	71.69	1268.00	1315.50	687.50	628.00	2.019	2.019	8.41	73.95	17.64	26.05	32.28	4.05	0.89	3.60	3.48	13.92
18	5.50	5.21	4.30	102.40	72.41	1270.00	1315.50	688.00	627.50	2.024	2.024	8.43	74.12	17.45	25.88	32.58	3.97	0.89	3.53	3.51	14.04
AVQ.	5.50	5.21	4.30	102.71	72.21	1268.50	1311.00	687.50	627.83	2.020	2.020	8.42	74.00	17.59	26.00	32.36	4.05	0.90	3.66	3.48	13.91
19	6.00	5.66	4.75	102.93	71.48	1273.50	1320.50	688.00	632.50	2.013	2.013	9.27	73.39	17.34	26.61	34.83	3.75	0.93	3.49	3.79	15.16
20	6.00	5.66	4.75	101.43	71.68	1276.00	1322.00	689.00	633.00	2.016	2.016	9.28	73.48	17.24	26.52	34.98	3.87	0.89	3.44	3.82	15.28
21	6.00	5.66	4.75	102.17	72.03	1275.00	1321.50	688.50	633.00	2.014	2.014	9.27	73.42	17.31	26.58	34.88	4.01	0.93	3.73	3.75	15.00
AVQ.	6.00	5.66	4.75	102.18	71.73	1274.83	1321.33	688.50	632.833	2.014	2.014	9.27	73.431	17.30	26.57	34.89	3.88	0.92	3.55	3.79	15.15
22	6.50	6.10	5.20	101.41	71.56	1277.40	1326.00	689.50	636.50	2.007	2.007	10.11	72.81	17.08	27.19	37.17	3.75	0.93	3.49	4.09	16.36
23	6.50	6.10	5.20	102.22	71.35	1281.93	1327.00	690.00	637.00	2.012	2.012	10.13	73.01	16.85	26.99	37.55	3.68	0.89	3.28	4.13	16.52
24	6.50	6.10	5.20	101.76	72.15	1282.36	1328.00	691.50	636.50	2.015	2.015	10.14	73.09	16.76	26.91	37.70	3.51	0.89	3.12	4.05	16.20
AVQ.	6.50	6.10	5.20	101.80	71.69	1280.56	1327.00	690.33	636.67	2.011	2.011	10.13	72.973	16.90	27.03	37.47	3.65	0.90	3.30	4.09	16.36

ตาราง ข 2 ผลการทดสอบ Marshall ของ P3

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.024
 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AC}) : 2.588
 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.652
 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.452

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 (α) : 0.90

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	% VMA	% VFA	Stability (N)			Flow	
						in air	Sat. Surface Dry in air	in water									Measured	Factor	Adjusted	Measured	ค่าที่ใส่ (0.25 mm.)
1	3.00	2.91	2.04	102.20	72.51	1237.50	1293.00	668.00	625.00	1.980	1.980	3.94	74.28	21.78	25.72	15.33	5.16	0.89	4.59	3.33	13.32
2	3.00	2.91	2.04	102.07	72.84	1237.00	1293.50	669.00	624.50	1.981	1.981	3.94	74.31	21.75	25.69	15.35	4.98	0.89	4.43	3.23	12.92
3	3.00	2.91	2.04	102.30	71.98	1238.00	1295.00	667.50	627.50	1.973	1.973	3.93	74.01	22.06	25.99	15.11	5.34	0.86	4.59	3.18	12.72
AVQ.	3.00	2.91	2.04	102.19	72.44	1237.50	1293.83	668.17	625.67	1.978	1.978	3.94	74.20	21.86	25.80	15.26	5.16	0.88	4.54	3.25	12.99
4	3.50	3.38	2.51	102.90	72.41	1246.00	1294.00	670.50	623.50	1.998	1.998	4.90	74.60	20.49	25.40	19.30	5.97	0.89	5.31	3.00	12.00
5	3.50	3.38	2.51	102.47	71.99	1243.00	1293.50	675.50	618.00	2.011	2.011	4.93	75.09	19.98	24.91	19.81	6.23	0.89	5.54	3.23	12.92
6	3.50	3.38	2.51	101.83	72.08	1247.00	1292.00	672.50	619.50	2.013	2.013	4.94	75.15	19.92	24.85	19.87	6.25	0.89	5.56	3.74	14.96
AVQ.	3.50	3.38	2.51	102.40	72.16	1245.33	1293.17	672.83	620.33	2.008	2.008	4.92	74.95	20.13	25.05	19.66	6.15	0.89	5.47	3.32	13.29
7	4.00	3.85	2.98	102.93	71.95	1249.50	1297.00	679.00	618.00	2.022	2.022	5.89	75.12	19.00	24.88	23.65	6.25	0.89	5.56	3.45	13.80
8	4.00	3.85	2.98	102.00	72.34	1251.00	1300.00	678.50	621.50	2.013	2.013	5.86	74.78	19.36	25.22	23.24	6.39	0.89	5.69	3.71	14.84
9	4.00	3.85	2.98	102.93	71.84	1250.50	1301.50	681.00	620.50	2.015	2.015	5.87	74.87	19.26	25.13	23.35	6.14	0.93	5.71	3.17	12.68
AVQ.	4.00	3.85	2.98	102.62	72.04	1250.33	1299.50	679.50	620.00	2.017	2.017	5.87	74.92	19.21	25.08	23.41	6.26	0.90	5.65	3.44	13.77
10	4.50	4.31	3.44	102.77	70.56	1257.00	1303.00	682.50	620.50	2.026	2.026	6.82	74.90	18.28	25.10	27.16	5.55	0.93	5.16	3.44	13.76
11	4.50	4.31	3.44	102.13	70.89	1259.00	1304.00	684.00	620.00	2.031	2.031	6.83	75.08	18.09	24.92	27.42	5.50	0.89	4.90	3.75	15.00
12	4.50	4.31	3.44	102.63	71.23	1258.50	1303.50	683.50	620.00	2.030	2.030	6.83	75.05	18.12	24.95	27.37	5.65	0.93	5.25	3.38	13.52
AVQ.	4.50	4.31	3.44	102.51	70.89	1258.17	1303.50	683.33	620.17	2.029	2.029	6.83	75.01	18.16	24.99	27.32	5.57	0.92	5.10	3.52	14.09
13	5.00	4.76	3.90	102.47	72.32	1263.00	1309.00	685.50	623.50	2.026	2.026	7.72	74.54	17.73	25.46	30.34	5.10	0.93	4.74	3.58	14.32
14	5.00	4.76	3.90	102.17	71.86	1266.00	1310.00	685.50	624.50	2.027	2.027	7.72	74.60	17.67	25.40	30.43	4.89	0.93	4.55	3.69	14.76
15	5.																				

ตาราง ข 3 ผลการทดสอบ Marshall ของ P6

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.021
 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AC}) : 2.588
 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.652
 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.452

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) : 0.90

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	% VMA	% VFA	Stability (N)			Flow	
						in air	Sat. Surface Dry in air	in water									Measured	Factor	Adjusted	Measured	ค่าที่ได (0.25 mm.)
1	3.00	2.91	2.04	102.20	72.51	1238.00	1292.00	668.50	623.50	1.986	1.986	3.96	74.48	21.55	25.52	15.54	5.96	0.89	5.30	3.48	13.92
2	3.00	2.91	2.04	102.07	72.84	1237.50	1292.50	669.50	623.00	1.986	1.986	3.97	74.51	21.52	25.49	15.56	5.78	0.89	5.14	3.38	13.52
3	3.00	2.91	2.04	102.30	71.98	1238.50	1294.00	668.00	626.00	1.978	1.978	3.95	74.22	21.83	25.78	15.32	6.14	0.86	5.28	3.33	13.32
Avg	3.00	2.91	2.04	102.19	72.44	1238.00	1292.83	668.67	624.17	1.983	1.983	3.96	74.41	21.63	25.59	15.48	5.96	0.88	5.24	3.40	13.59
4	3.50	3.38	2.51	102.90	72.41	1246.50	1293.00	671.00	622.00	2.004	2.004	4.93	74.81	20.26	25.19	19.58	6.67	0.89	5.94	3.15	12.60
5	3.50	3.38	2.51	102.47	71.99	1243.50	1292.50	676.00	616.50	2.017	2.017	4.96	75.30	19.74	24.70	20.09	6.93	0.89	6.17	3.38	13.52
6	3.50	3.38	2.51	101.83	72.08	1247.50	1291.00	673.00	618.00	2.019	2.019	4.97	75.36	19.67	24.64	20.16	6.95	0.89	6.19	3.89	15.56
Avg	3.50	3.38	2.51	102.40	72.16	1245.83	1292.17	673.33	618.83	2.013	2.013	4.95	75.16	19.89	24.84	19.94	6.85	0.89	6.10	3.47	13.89
7	4.00	3.85	2.98	102.93	71.95	1250.00	1296.00	679.50	616.50	2.028	2.028	5.92	75.33	18.75	24.67	23.99	7.20	0.89	6.41	3.60	14.40
8	4.00	3.85	2.98	102.00	72.34	1251.50	1299.00	679.00	620.00	2.019	2.019	5.89	74.99	19.11	25.01	23.57	7.34	0.89	6.53	3.86	15.44
9	4.00	3.85	2.98	102.93	71.84	1251.00	1300.50	681.50	619.00	2.021	2.021	5.90	75.09	19.01	24.91	23.68	7.09	0.93	6.59	3.32	13.28
Avg	4.00	3.85	2.98	102.62	72.04	1250.83	1298.50	680.00	618.50	2.022	2.022	5.90	75.14	18.96	24.86	23.75	7.21	0.90	6.51	3.59	14.37
10	4.50	4.31	3.44	102.77	70.56	1257.50	1302.00	683.00	619.00	2.032	2.032	6.85	75.11	18.03	24.89	27.54	6.25	0.93	5.81	3.59	14.36
11	4.50	4.31	3.44	102.13	70.89	1259.50	1303.00	684.50	618.50	2.036	2.036	6.87	75.29	17.83	24.71	27.81	6.20	0.89	5.52	3.90	15.60
12	4.50	4.31	3.44	102.63	71.23	1259.00	1302.50	684.00	618.50	2.036	2.036	6.87	75.26	17.87	24.74	27.77	6.35	0.93	5.91	3.53	14.12
Avg	4.50	4.31	3.44	102.51	70.89	1258.67	1302.50	683.83	618.67	2.034	2.034	6.86	75.22	17.91	24.78	27.71	6.27	0.92	5.75	3.67	14.69
13	5.00	4.76	3.90	102.47	72.32	1263.50	1308.00	686.00	622.00	2.031	2.031	7.77	74.75	17.48	25.25	30.77	5.80	0.93	5.39	3.73	14.92
14	5.00	4.76	3.90	102.17	71.86	1266.50	1309.00	686.00	623.00	2.033	2.033	7.77	74.81	17.42	25.19	30.86	5.59	0.93	5.20	3.84	15.36
15	5.00	4.76	3.90	102.10	71.78	1266.50	1310.00	686.50	623.00	2.031	2.031	7.77	74.75	17.48	25.25	30.76	5.89	0.89	5.24	3.67	14.68
Avg	5.00	4.76	3.90	102.25	71.99	1265.50	1309.00	686.17	622.83	2.032	2.032	7.77	74.77	17.46	25.23	30.80	5.76	0.92	5.28	3.75	14.99
16	5.50	5.21	4.36	102.90	72.54	1269.00	1313.00	688.00	625.00	2.030	2.030	8.67	74.36	16.97	25.64	33.82	5.34	0.93	4.97	3.79	15.16
17	5.50	5.21	4.36	102.83	71.69	1269.50	1313.50	688.50	625.00	2.031	2.031	8.67	74.39	16.93	25.61	33.87	5.27	0.89	4.69	3.83	15.32
18	5.50	5.21	4.36	102.40	72.41	1271.50	1313.50	689.00	624.50	2.036	2.036	8.69	74.57	16.74	25.43	34.19	5.19	0.89	4.62	3.86	15.44
Avg	5.50	5.21	4.36	102.71	72.21	1270.00	1313.33	688.50	624.83	2.033	2.033	8.68	74.44	16.88	25.56	33.96	5.27	0.90	4.76	3.83	15.31
19	6.00	5.66	4.81	102.93	71.48	1275.00	1318.50	689.00	629.50	2.025	2.025	9.54	73.83	16.63	26.17	36.47	4.97	0.93	4.62	4.14	16.56
20	6.00	5.66	4.81	101.43	71.68	1277.50	1320.00	690.00	630.00	2.028	2.028	9.56	73.92	16.53	26.08	36.63	5.09	0.89	4.53	4.17	16.68
21	6.00	5.66	4.81	102.17	72.03	1276.50	1319.50	689.50	630.00	2.026	2.026	9.55	73.86	16.59	26.14	36.52	5.23	0.93	4.86	4.10	16.40
Avg	6.00	5.66	4.81	102.18	71.73	1276.33	1319.33	689.50	629.833	2.026	2.026	9.55	73.868	16.58	26.13	36.54	5.10	0.92	4.67	4.14	16.55
22	6.50	6.10	5.26	101.41	71.56	1278.90	1324.00	690.50	633.50	2.019	2.019	10.40	73.24	16.36	26.76	38.86	5.07	0.93	4.72	4.44	17.76
23	6.50	6.10	5.26	102.22	71.35	1283.43	1325.00	691.00	634.00	2.024	2.024	10.43	73.44	16.13	26.56	39.26	5.00	0.89	4.45	4.48	17.92
24	6.50	6.10	5.26	101.76	72.15	1283.86	1326.00	692.50	633.50	2.027	2.027	10.44	73.53	16.04	26.47	39.42	4.83	0.89	4.30	4.40	17.60
Avg	6.50	6.10	5.26	101.80	71.69	1282.06	1325.00	691.33	633.67	2.023	2.023	10.42	73.404	16.18	26.60	39.18	4.97	0.90	4.49	4.44	17.76

ตาราง ข 4 ผลการทดสอบ Marshall ของ P9

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.018
 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AC}) : 2.588
 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.652
 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.452

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) : 0.90

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	% VMA	% VFA	Stability (N)			Flow	
						in air	Sat. Surface Dry in air	in water									Measured	Factor	Adjusted	Measured	ค่าที่ได (0.25 mm.)
1	3.00	2.91	2.04	102.20	72.51	1238.00	1291.50	669.00	622.50	1.989	1.989	3.98	74.60	21.41	25.40	15.68	6.46	0.89	5.75	3.58	14.32
2	3.00	2.91	2.04	102.07	72.84	1237.50	1292.00	670.00	622.00	1.990	1.990	3.98	74.63	21.38	25.37	15.71	6.28	0.89	5.59	3.48	13.92
3	3.00	2.91	2.04	102.30	71.98	1238.50	1293.50	668.50	625.00	1.982	1.982	3.97	74.34	21.70	25.66	15.46	6.64	0.86	5.71	3.43	13.72
Avg	3.00	2.91	2.04	102.19	72.44	1238.00	1292.33	669.17	623.17	1.987	1.987	3.98	74.52	21.50	25.48	15.62	6.46	0.88	5.68	3.50	13.99
4	3.50	3.38	2.51	102.90	72.41	1246.50	1292.50	671.50	621.00	2.007	2.007	4.95	74.93	20.11	25.07	19.76	7.17	0.89	6.38	3.25	13.00
5	3.50	3.38	2.51	102.47	71.99	1243.50	1292.00	676.50	615.50	2.020	2.020	4.99	75.42	19.59	24.58	20.28	7.43	0.89	6.61	3.48	13.92
6	3.50	3.38	2.51	101.83	72.08	1247.50	1290.50	673.50	617.00	2.022	2.022	4.99	75.48	19.53	24.52	20.35	7.45	0.89	6.63	3.99	15.96
Avg	3.50	3.38	2.51	102.40	72.16	1245.83	1291.67	673.83	617.83	2.016	2.016	4.98	75.28	19.74	24.72	20.13	7.35	0.89	6.54	3.57	14.29
7	4.00	3.85	2.98	102.93	71.95	1250.00	1295.00	680.00	615.50	2.031	2.031	5.95	75.45	18.60	24.55	24.22	8.25	0.89	7.34	3.70	14.80
8	4.00	3.85	2.98	102.00	72.34	1251.50	1298.50	679.50	619.00	2.022	2.022	5.92	75.12	18.96	24.88	23.79	8.39	0.89	7.47	3.96	15.84
9	4.00	3.85	2.98	102.93	71.84	1251.00	1300.00	682.00	618.00	2.024	2.024	5.93	75.21	18.87	24.79	23.91	8.14	0.93	7.57	3.42	13.68
Avg	4.00	3.85	2.98	102.62	72.04	1250.83	1298.00	680.50	617.50	2.026	2.026	5.93	75.26	18.81	24.74	23.97	8.26	0.90	7.46	3.69	14.77
10	4.50	4.31	3.44	102.77	70.56	1257.50	1301.50	683.50	618.00	2.035	2.035	6.89	75.24	17.88	24.76	27.81	6.75	0.93	6.28	3.69	14.76
11	4.50	4.31	3.44	102.13	70.89	1259.50	1302.50	685.00	617.50	2.040	2.040	6.90	75.42	17.68	24.58	28.08	6.70	0.89	5.96	4.00	16.00
12	4.50	4.31	3.44	102.63	71.23	1259.00	1302.00	684.50	617.50	2.039	2.039	6.90	75.39	17.71	24.61	28.03	6.85	0.93	6.37	3.63	14.52
Avg	4.50	4.31	3.44	102.51	70.89	1258.67	1302.00	684.33	617.67	2.038	2.038	6.90	75.35	17.76	24.65	27.97	6.77	0.92	6.20	3.77	15.09
13	5.00	4.76	3.90	102.47	72.32	1263.50	1307.50	686.50	621.00	2.035	2.035	7.80	74.87	17.32	25.13	31.06	6.30	0.93	5.86	3.83	15.32
14	5.00	4.76	3.90	102.17	71.86	1266.50	1308.50	686.50	622.00	2.036	2.036	7.81	74.93	17.26	25.07	31.15	6.09	0.93	5.66	3.94	15.76
15	5.00	4.76	3.90																		

ตาราง ข 5 ผลการทดสอบ Marshall ของ P12

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.014
 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AB}) : 2.588
 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.652
 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.452

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) : 0.90

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	% VMA	% VFA	Stability (N)			Flow	
						in air	Sat. Surface Dry in air	in water									Measured	Factor	Adjusted	Measured	ค่าที่ได้อื่น (0.25 mm.)
1	3.00	2.91	2.04	102.20	72.51	1239.50	1290.50	670.00	620.50	1.997	1.997	4.03	74.91	21.06	25.09	16.08	6.90	0.89	6.14	4.69	18.76
2	3.00	2.91	2.04	102.07	72.84	1238.50	1291.00	671.00	620.00	1.998	1.998	4.04	74.94	21.03	25.06	16.10	6.72	0.89	5.98	4.59	18.36
3	3.00	2.91	2.04	102.30	71.98	1239.50	1292.50	669.50	623.00	1.990	1.990	4.02	74.63	21.34	25.37	15.85	7.08	0.86	6.09	4.54	18.16
Avq.	3.00	2.91	2.04	102.19	72.44	1239.50	1291.33	670.17	621.17	1.995	1.995	4.03	74.83	21.14	25.17	16.01	6.90	0.88	6.07	4.61	18.43
4	3.50	3.38	2.51	102.90	72.41	1247.50	1291.50	672.00	620.00	2.011	2.011	4.98	75.09	19.93	24.91	20.00	7.53	0.89	6.70	4.32	17.28
5	3.50	3.38	2.51	102.47	71.99	1244.00	1291.50	677.00	614.50	2.024	2.024	5.02	75.58	19.41	24.42	20.53	7.79	0.89	6.93	4.55	18.20
6	3.50	3.38	2.51	101.83	72.08	1248.00	1290.00	674.00	616.00	2.026	2.026	5.02	75.63	19.35	24.37	20.60	7.81	0.89	6.95	5.06	20.24
Avq.	3.50	3.38	2.51	102.40	72.16	1246.33	1291.17	674.33	616.83	2.021	2.021	5.01	75.43	19.56	24.57	20.38	7.71	0.89	6.86	4.64	18.57
7	4.00	3.85	2.98	102.93	71.95	1250.50	1295.00	680.50	614.50	2.035	2.035	5.98	75.60	18.41	24.40	24.52	9.19	0.89	8.18	4.77	19.08
8	4.00	3.85	2.98	102.00	72.34	1252.00	1298.00	680.00	618.00	2.026	2.026	5.96	75.27	18.78	24.73	24.08	9.33	0.89	8.30	5.03	20.12
9	4.00	3.85	2.98	102.93	71.84	1251.50	1299.50	682.50	617.00	2.028	2.028	5.96	75.36	18.68	24.64	24.20	9.08	0.93	8.44	4.49	17.96
Avq.	4.00	3.85	2.98	102.62	72.04	1251.33	1297.50	681.00	616.50	2.030	2.030	5.97	75.41	18.62	24.59	24.27	9.20	0.90	8.31	4.76	19.05
10	4.50	4.31	3.44	102.77	70.56	1258.00	1301.00	684.50	617.00	2.039	2.039	6.93	75.39	17.69	24.61	28.14	8.52	0.93	7.92	4.76	19.04
11	4.50	4.31	3.44	102.13	70.89	1260.00	1302.00	685.50	616.50	2.044	2.044	6.94	75.57	17.49	24.43	28.42	8.47	0.89	7.54	5.07	20.28
12	4.50	4.31	3.44	102.63	71.23	1259.50	1301.50	685.00	616.50	2.043	2.043	6.94	75.54	17.52	24.46	28.37	8.62	0.93	8.02	4.70	18.80
Avq.	4.50	4.31	3.44	102.63	70.89	1259.17	1301.50	684.83	616.67	2.042	2.042	6.94	75.50	17.56	24.50	28.31	8.54	0.92	7.83	4.84	19.37
13	5.00	4.76	3.90	102.47	72.32	1264.00	1307.00	687.00	620.00	2.039	2.039	7.85	75.02	17.13	24.98	31.43	8.07	0.93	7.51	4.90	19.60
14	5.00	4.76	3.90	102.17	71.86	1267.00	1308.00	687.00	621.00	2.040	2.040	7.86	75.08	17.06	24.92	31.53	7.86	0.93	7.31	5.01	20.04
15	5.00	4.76	3.90	102.10	71.78	1267.00	1309.00	687.50	621.50	2.039	2.039	7.85	75.02	17.13	24.98	31.42	8.16	0.89	7.26	4.84	19.36
Avq.	5.00	4.76	3.90	102.25	71.99	1266.00	1308.00	687.17	620.83	2.039	2.039	7.85	75.04	17.11	24.96	31.46	8.03	0.92	7.36	4.92	19.67
16	5.50	5.21	4.36	102.90	72.54	1269.50	1312.00	689.00	623.00	2.038	2.038	8.76	74.63	16.61	25.37	34.54	7.61	0.93	7.08	4.96	19.84
17	5.50	5.21	4.36	102.83	71.69	1270.00	1312.50	689.50	623.00	2.039	2.039	8.77	74.66	16.58	25.34	34.59	7.54	0.89	6.71	5.00	20.00
18	5.50	5.21	4.36	102.40	72.41	1272.00	1312.50	690.00	622.50	2.043	2.043	8.79	74.84	16.38	25.16	34.92	7.46	0.89	6.64	5.03	20.12
Avq.	5.50	5.21	4.36	102.71	72.21	1270.50	1312.33	689.50	622.83	2.040	2.040	8.77	74.71	16.52	25.29	34.68	7.54	0.90	6.81	5.00	19.99
19	6.00	5.66	4.81	102.93	71.48	1275.50	1317.50	690.00	627.50	2.033	2.033	9.64	74.09	16.26	25.91	37.23	7.24	0.93	6.73	5.31	21.24
20	6.00	5.66	4.81	101.43	71.68	1278.00	1319.00	691.00	628.00	2.035	2.035	9.64	74.18	16.16	25.82	37.40	7.36	0.89	6.55	5.34	21.36
21	6.00	5.66	4.81	102.17	72.03	1277.00	1318.50	690.50	628.00	2.033	2.033	9.65	74.12	16.23	25.88	37.28	7.50	0.93	6.98	5.27	21.08
Avq.	6.00	5.66	4.81	102.18	71.73	1276.83	1318.33	690.50	627.833	2.034	2.034	9.65	74.132	16.22	25.87	37.30	7.37	0.92	6.75	5.31	21.23
22	6.50	6.10	5.26	101.41	71.56	1279.40	1323.00	691.50	631.50	2.026	2.026	10.51	73.50	15.99	26.50	39.65	6.91	0.93	6.43	5.61	22.44
23	6.50	6.10	5.26	102.22	71.35	1283.93	1324.00	692.00	632.00	2.032	2.032	10.53	73.70	15.76	26.30	40.06	6.84	0.89	6.09	5.65	22.6
24	6.50	6.10	5.26	101.76	72.15	1284.36	1325.00	693.50	631.50	2.034	2.034	10.55	73.79	15.67	26.21	40.24	6.67	0.89	5.94	5.57	22.28
Avq.	6.50	6.10	5.26	101.80	71.69	1282.56	1324.00	692.33	631.67	2.030	2.030	10.53	73.665	15.81	26.33	39.98	6.81	0.90	6.15	5.61	22.44

ตาราง ข 6 ผลการทดสอบ Marshall ของ P15

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method

Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.009
 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AB}) : 2.588
 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.652
 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.452

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) : 0.90

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	% VMA	% VFA	Stability (N)			Flow	
						in air	Sat. Surface Dry in air	in water									Measured	Factor	Adjusted	Measured	ค่าที่ได้อื่น (0.25 mm.)
1	3.00	2.91	2.04	102.20	72.51	1239.50	1290.50	670.00	620.50	1.997	1.997	4.03	74.91	21.06	25.09	16.08	6.90	0.89	6.14	4.69	18.76
2	3.00	2.91	2.04	102.07	72.84	1238.50	1291.00	671.00	620.00	1.998	1.998	4.04	74.94	21.03	25.06	16.10	6.72	0.89	5.98	4.59	18.36
3	3.00	2.91	2.04	102.30	71.98	1239.50	1292.50	669.50	623.00	1.990	1.990	4.02	74.63	21.34	25.37	15.85	7.08	0.86	6.09	4.54	18.16
Avq.	3.00	2.91	2.04	102.19	72.44	1239.50	1291.33	670.17	621.17	1.995	1.995	4.03	74.83	21.14	25.17	16.01	6.90	0.88	6.07	4.61	18.43
4	3.50	3.38	2.51	102.90	72.41	1247.50	1291.50	672.00	619.00	2.015	2.015	5.02	75.24	19.75	24.76	20.26	7.61	0.89	6.77	4.36	17.44
5	3.50	3.38	2.51	102.47	71.99	1244.00	1291.00	677.50	613.50	2.029	2.029	5.05	75.73	19.22	24.27	20.81	7.87	0.89	7.00	4.59	18.36
6	3.50	3.38	2.51	101.83	72.08	1248.00	1289.50	674.50	615.00	2.030	2.030	5.05	75.79	19.16	24.21	20.87	7.89	0.89	7.02	5.10	20.40
Avq.	3.50	3.38	2.51	102.40	72.16	1246.83	1290.67	674.83	615.83	2.025	2.025	5.04	75.58	19.38	24.42	20.65	7.79	0.89	6.93	4.68	18.73
7	4.00	3.85	2.98	102.93	71.95	1251.00	1294.50	681.00	613.50	2.039	2.039	6.02	75.76	18.22	24.24	24.85	9.27	0.89	8.25	4.81	19.24
8	4.00	3.85	2.98	102.00	72.34	1252.50	1297.50	680.50	617.00	2.030	2.030	6.00	75.42	18.58	24.58	24.40	9.41	0.89	8.37	5.07	20.28
9	4.00	3.85	2.98	102.93	71.84	1251.50	1299.00	683.00	616.00	2.032	2.032	6.00	75.51	18.48	24.49	24.52	9.16	0.93	8.52	4.53	18.12
Avq.	4.00	3.85	2.98	102.62	72.04	1251.83	1297.00	681.50	615.50	2.034	2.034	6.01	75.56	18.43	24.44	24.59	9.28	0.90	8.38	4.80	19.21
10	4.50	4.31	3.44	102.77	70.56	1258.50	1300.50	684.50	616.00	2.043	2.043	6.98	75.54	17.48	24.46	28.52	9.33	0.93	8.68	4.80	19.20
11	4.50	4.31	3.44	102.13	70.89	1260.00	1301.50	686.00	615.50	2.048	2.048	6.99	75.72	17.29	24.28	28.80	9.28	0.89	8.26	5.11	20.44
12	4.50	4.31	3.44	102.63	71.23	1259.50	1301.00	685.50	615.50	2.047	2.047	6.99	75.69	17.32	24.31	28.75	9.43	0.93	8.77	4.74	18.96
Avq.	4.50	4.31	3.44	102.51	70.89	1259.67	1301.00	685.33	615.67	2.046	2.046	6.99	75.65	17.36	24.35	28.69	9.35	0.92	8.57	4.88	19.53
13	5.00	4.76	3.90	102.47	72.32	1264.50	1306.50	687.50	619.00	2.043	2.043	7.91	75.17	16.92	24.83	31.84	8.88	0.93	8.26	4.94	19.76
14	5.00	4.76	3.90	102.17	71.86	1267.50	1307.50	687.50	620.00	2.044	2.044	7.91	75.23	16.86	24.77	31.94	8.67	0.93	8.06	5.05	20.20
15	5.00																				

ตาราง ข 7 ผลการทดสอบ Marshall ของ Market PMA

Test for Hot Mix Asphaltic Concrete by Marshall Test Method																					
Specific Gravity AC (G_{AC}) : 1.023 Avg Bulk Sp. Gr. Total Agg. (G_{AB}) : 2.588 Avg Effective Sp. Gr. Total Agg. (G_{SE}) : 2.652 Max. Sp. Gr. Of Mix @ 5.50% AC (G_{MM}) : 2.452										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) : 0.90											
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	% VMA	% VFA	Stability (N)			Flow	
						in air	Sat. Surface Dry in air	in water									Measured	Factor	Adjusted	Measured	ค่าที่ใส่ (0.25 mm.)
1	3.00	2.91	2.04	102.20	72.51	1238.50	1291.00	669.00	622.00	1.991	1.991	3.97	74.69	21.34	25.31	15.68	6.68	0.89	5.95	4.61	18.44
2	3.00	2.91	2.04	102.07	72.84	1238.00	1291.50	670.00	621.50	1.992	1.992	3.97	74.72	21.31	25.28	15.71	6.50	0.89	5.79	4.51	18.04
3	3.00	2.91	2.04	102.30	71.98	1239.00	1293.00	668.50	624.50	1.984	1.984	3.95	74.43	21.62	25.57	15.46	6.86	0.86	5.90	4.46	17.84
Avg.	3.00	2.91	2.04	102.19	72.44	1238.50	1291.83	669.17	622.67	1.989	1.989	3.96	74.61	21.42	25.39	15.62	6.68	0.88	5.88	4.53	18.11
4	3.50	3.38	2.51	102.90	72.41	1247.00	1292.00	671.50	620.50	2.010	2.010	4.93	75.02	20.04	24.98	19.76	7.39	0.89	6.58	4.28	17.12
5	3.50	3.38	2.51	102.47	71.99	1244.00	1291.50	676.50	615.00	2.023	2.023	4.97	75.51	19.52	24.49	20.29	7.65	0.89	6.81	4.51	18.04
6	3.50	3.38	2.51	101.83	72.08	1248.00	1290.00	673.50	616.50	2.024	2.024	4.97	75.57	19.46	24.43	20.35	7.67	0.89	6.83	5.02	20.08
Avg.	3.50	3.38	2.51	102.40	72.16	1246.33	1291.17	673.83	617.33	2.019	2.019	4.96	75.37	19.67	24.63	20.13	7.57	0.89	6.74	4.60	18.41
7	4.00	3.85	2.98	102.93	71.95	1250.50	1295.00	680.00	615.00	2.033	2.033	5.92	75.54	18.53	24.46	24.23	9.05	0.89	8.05	4.73	18.92
8	4.00	3.85	2.98	102.00	72.34	1252.00	1298.00	679.50	618.50	2.024	2.024	5.90	75.21	18.90	24.79	23.79	9.19	0.89	8.18	4.99	19.96
9	4.00	3.85	2.98	102.93	71.84	1251.50	1299.50	682.00	617.50	2.027	2.027	5.91	75.30	18.80	24.70	23.91	8.94	0.93	8.31	4.45	17.80
Avg.	4.00	3.85	2.98	102.62	72.04	1251.33	1297.50	680.50	617.00	2.028	2.028	5.91	75.35	18.74	24.65	23.97	9.06	0.90	8.18	4.72	18.89
10	4.50	4.31	3.44	102.77	70.56	1258.00	1301.00	683.50	617.50	2.037	2.037	6.86	75.33	17.81	24.67	27.81	7.98	0.93	7.42	4.72	18.88
11	4.50	4.31	3.44	102.13	70.89	1260.00	1302.00	685.00	617.00	2.042	2.042	6.88	75.51	17.62	24.49	28.08	7.93	0.89	7.06	5.03	20.12
12	4.50	4.31	3.44	102.63	71.23	1259.50	1301.50	684.50	617.00	2.041	2.041	6.87	75.48	17.65	24.52	28.03	8.08	0.93	7.51	4.66	18.64
Avg.	4.50	4.31	3.44	102.51	70.89	1259.17	1301.50	684.33	617.17	2.040	2.040	6.87	75.44	17.69	24.56	27.97	8.00	0.92	7.33	4.80	19.21
13	5.00	4.76	3.90	102.47	72.32	1264.00	1307.00	686.50	620.50	2.037	2.037	7.78	74.96	17.26	25.04	31.05	7.53	0.93	7.00	4.86	19.44
14	5.00	4.76	3.90	102.17	71.86	1267.00	1308.00	686.50	621.50	2.039	2.039	7.78	75.02	17.20	24.98	31.15	7.32	0.93	6.81	4.97	19.88
15	5.00	4.76	3.90	102.10	71.78	1267.00	1309.00	687.00	622.00	2.037	2.037	7.78	74.96	17.27	25.04	31.05	7.62	0.89	6.78	4.80	19.20
Avg.	5.00	4.76	3.90	102.25	71.99	1266.00	1308.00	686.67	621.33	2.038	2.038	7.78	74.98	17.24	25.02	31.08	7.49	0.92	6.86	4.88	19.51
16	5.50	5.21	4.36	102.90	72.54	1269.50	1312.00	688.50	623.50	2.036	2.036	8.68	74.57	16.75	25.43	34.13	7.07	0.93	6.58	4.92	19.68
17	5.50	5.21	4.36	102.83	71.69	1270.00	1312.50	689.00	623.50	2.037	2.037	8.68	74.60	16.72	25.40	34.18	7.00	0.89	6.23	4.96	19.84
18	5.50	5.21	4.36	102.40	72.41	1272.00	1312.50	689.50	623.00	2.042	2.042	8.70	74.78	16.52	25.22	34.50	6.92	0.89	6.16	4.99	19.96
Avg.	5.50	5.21	4.36	102.71	72.21	1270.50	1312.33	689.00	623.33	2.038	2.038	8.69	74.65	16.66	25.35	34.27	7.00	0.90	6.32	4.96	19.83
19	6.00	5.66	4.81	102.93	71.48	1275.50	1317.50	689.50	628.00	2.031	2.031	9.55	74.03	16.41	25.97	36.79	6.70	0.93	6.23	5.27	21.08
20	6.00	5.66	4.81	101.43	71.88	1278.00	1319.00	690.50	628.50	2.033	2.033	9.56	74.12	16.32	25.88	36.95	6.82	0.89	6.07	5.30	21.2
21	6.00	5.66	4.81	102.17	72.03	1277.00	1318.50	690.00	628.50	2.032	2.032	9.56	74.06	16.38	25.94	36.84	6.96	0.93	6.47	5.23	20.92
Avg.	6.00	5.66	4.81	102.18	71.73	1276.83	1318.33	690.00	628.333	2.032	2.032	9.56	74.073	16.37	25.93	36.86	6.83	0.92	6.26	5.27	21.07
22	6.50	6.10	5.26	101.41	71.56	1279.40	1323.00	691.00	632.00	2.024	2.024	10.41	73.44	16.15	26.56	39.18	6.37	0.93	5.92	5.57	22.28
23	6.50	6.10	5.26	102.22	71.95	1283.93	1324.00	691.50	632.50	2.030	2.030	10.43	73.65	15.92	26.35	39.59	6.30	0.89	5.61	5.61	22.44
24	6.50	6.10	5.26	101.76	72.15	1284.36	1325.00	693.00	632.00	2.032	2.032	10.45	73.73	15.82	26.27	39.76	6.13	0.89	5.46	5.53	22.12
Avg.	6.50	6.10	5.26	101.80	71.69	1282.56	1324.00	691.83	632.17	2.029	2.029	10.43	73.607	15.96	26.39	39.51	6.27	0.90	5.66	5.57	22.28



ตาราง ข 8 ผลการทดสอบ Cantabro ของ AC 60/70

Binder Content	Specimen No.	Weight of Specimen		Cantabro Scattering Loss (%)	Avg. (%)
		Before Test	After Test		
3.0%	1	1235.5	905.6	26.7	25.6
	2	1236.0	922.1	25.4	
	3	1237.0	930.2	24.8	
3.5%	1	1245.0	981.1	21.2	21.1
	2	1242.0	975.0	21.5	
	3	1246.0	988.1	20.7	
4.0%	1	1248.5	1045.0	16.3	16.9
	2	1250.0	1038.8	16.9	
	3	1249.5	1030.8	17.5	
4.5%	1	1256.0	1077.6	14.2	14.1
	2	1258.0	1074.3	14.6	
	3	1257.5	1087.7	13.5	
5.0%	1	1262.0	1111.8	11.9	12.1
	2	1265.0	1109.4	12.3	
	3	1265.0	1113.2	12	
5.5%	1	1267.5	1134.4	10.5	11.0
	2	1268.0	1129.8	10.9	
	3	1270.0	1122.7	11.6	
6.0%	1	1273.5	1143.6	10.2	10.4
	2	1276.0	1140.7	10.6	
	3	1275.0	1143.7	10.3	
6.5%	1	1277.4	1142.0	10.6	10.1
	2	1281.9	1156.3	9.8	
	3	1282.4	1155.4	9.9	

ตาราง ข 9 ผลการทดสอบ Cantabro ของ P3

Binder Content	Specimen No.	Weight of Specimen		Cantabro Scattering Loss (%)	Avg. (%)
		Before Test	After Test		
3.0%	1	1237.5	970.2	21.6	21.2
	2	1237.0	972.3	21.4	
	3	1238.0	981.7	20.7	
3.5%	1	1246.0	1029.2	17.4	17.2
	2	1243.0	1024.2	17.6	
	3	1247.0	1041.2	16.5	
4.0%	1	1249.5	1078.3	13.7	13.2
	2	1251.0	1080.9	13.6	
	3	1250.5	1095.4	12.4	
4.5%	1	1257.0	1107.4	11.9	12.1
	2	1259.0	1104.1	12.3	
	3	1258.5	1107.5	12.0	
5.0%	1	1263.0	1131.6	10.4	10.6
	2	1266.0	1129.3	10.8	
	3	1266.0	1131.8	10.6	
5.5%	1	1268.5	1160.7	8.5	8.7
	2	1269.0	1158.6	8.7	
	3	1271.0	1159.2	8.8	
6.0%	1	1274.5	1175.1	7.8	7.6
	2	1277.0	1179.9	7.6	
	3	1276.0	1182.9	7.3	
6.5%	1	1278.4	1190.2	6.9	7.0
	2	1282.9	1195.7	6.8	
	3	1283.4	1188.4	7.4	

ตาราง ข 10 ผลการทดสอบ Cantabro ของ P6

Binder Content	Specimen No.	Weight of Specimen		Cantabro Scattering Loss (%)	Avg. (%)
		Before Test	After Test		
3.0%	1	1238.3	998.1	19.4	19.1
	2	1237.5	999.9	19.2	
	3	1238.4	1006.8	18.7	
3.5%	1	1246.2	1038.1	16.7	16.3
	2	1243.8	1039.8	16.4	
	3	1247.9	1049.5	15.9	
4.0%	1	1250.6	1090.5	12.8	12.5
	2	1251.4	1102.5	11.9	
	3	1251.3	1089.9	12.9	
4.5%	1	1257.7	1125.6	10.5	10.6
	2	1259.4	1125.9	10.6	
	3	1259.3	1125.8	10.6	
5.0%	1	1263.4	1140.9	9.7	9.9
	2	1264.2	1139.0	9.9	
	3	1266.8	1137.6	10.2	
5.5%	1	1269.4	1167.8	8.0	8.1
	2	1269.7	1169.4	7.9	
	3	1271.4	1165.9	8.3	
6.0%	1	1275.0	1187.0	6.9	6.8
	2	1277.6	1186.9	7.1	
	3	1276.3	1193.3	6.5	
6.5%	1	1278.9	1204.7	5.8	6.1
	2	1283.4	1205.1	6.1	
	3	1283.9	1203.0	6.3	

ตาราง ข 11 ผลการทดสอบ Cantabro ของ P9

Binder Content	Specimen No.	Weight of Specimen		Cantabro Scattering Loss (%)	Avg. (%)
		Before Test	After Test		
3.0%	1	1238.6	1020.6	17.6	17.1
	2	1237.5	1034.6	16.4	
	3	1235.4	1022.9	17.2	
3.5%	1	1245.3	1077.2	13.5	13.1
	2	1244.6	1080.3	13.2	
	3	1248.2	1089.7	12.7	
4.0%	1	1250.3	1122.8	10.2	10.2
	2	1251.6	1122.7	10.3	
	3	1251.3	1126.2	10.0	
4.5%	1	1257.7	1148.3	8.7	8.5
	2	1259.4	1151.1	8.6	
	3	1259.3	1156.0	8.2	
5.0%	1	1260.4	1165.9	7.5	7.5
	2	1264.3	1172.0	7.3	
	3	1265.3	1167.9	7.7	
5.5%	1	1270.6	1182.9	6.9	6.8
	2	1269.4	1181.8	6.9	
	3	1270.3	1185.2	6.7	
6.0%	1	1272.3	1203.6	5.4	5.4
	2	1276.0	1203.3	5.7	
	3	1275.6	1209.3	5.2	
6.5%	1	1278.2	1216.8	4.8	5.1
	2	1282.0	1219.2	4.9	
	3	1283.6	1213.0	5.5	

ตาราง ข 12 ผลการทดสอบ Cantabro ของ P12

Binder Content	Specimen No.	Weight of Specimen		Cantabro Scattering Loss (%)	Avg. (%)
		Before Test	After Test		
3.0%	1	1235.7	1055.3	14.6	14.3
	2	1236.8	1059.9	14.3	
	3	1235.4	1061.2	14.1	
3.5%	1	1243.6	1099.3	11.6	11.4
	2	1244.5	1102.6	11.4	
	3	1247.2	1107.5	11.2	
4.0%	1	1249.7	1162.2	7.0	7.0
	2	1251.6	1166.5	6.8	
	3	1251.8	1160.4	7.3	
4.5%	1	1257.6	1184.7	5.8	6.0
	2	1258.4	1180.4	6.2	
	3	1259.3	1182.5	6.1	
5.0%	1	1261.3	1195.7	5.2	5.1
	2	1263.5	1196.5	5.3	
	3	1262.7	1203.4	4.7	
5.5%	1	1269.4	1212.3	4.5	4.6
	2	1269.1	1206.9	4.9	
	3	1270.3	1215.7	4.3	
6.0%	1	1273.5	1216.2	4.5	4.5
	2	1274.9	1220.1	4.3	
	3	1275.8	1217.1	4.6	
6.5%	1	1279.5	1224.5	4.3	4.4
	2	1280.1	1222.5	4.5	
	3	1284.2	1226.4	4.5	

ตาราง ข 13 ผลการทดสอบ Cantabro ของ P15

Binder Content	Specimen No.	Weight of Specimen		Cantabro Scattering Loss (%)	Avg. (%)
		Before Test	After Test		
3.0%	1	1235.7	1081.2	12.5	12.2
	2	1235.6	1089.8	11.8	
	3	1236.8	1085.9	12.2	
3.5%	1	1243.6	1125.5	9.5	9.0
	2	1244.2	1136.0	8.7	
	3	1246.3	1135.4	8.9	
4.0%	1	1249.6	1159.6	7.2	7.3
	2	1251.3	1162.5	7.1	
	3	1251.4	1157.5	7.5	
4.5%	1	1257.4	1184.5	5.8	6.0
	2	1258.3	1184.1	5.9	
	3	1258.4	1180.4	6.2	
5.0%	1	1261.3	1194.5	5.3	5.1
	2	1262.3	1199.2	5.0	
	3	1265.1	1203.1	4.9	
5.5%	1	1269.4	1211.0	4.6	4.5
	2	1268.7	1211.6	4.5	
	3	1270.4	1213.2	4.5	
6.0%	1	1274.6	1222.3	4.1	4.1
	2	1273.5	1220.0	4.2	
	3	1275.9	1224.9	4.0	
6.5%	1	1279.4	1230.8	3.8	4.0
	2	1280.6	1230.7	3.9	
	3	1285.7	1231.7	4.2	

ตาราง ข 14 ผลการทดสอบ Cantabro ของ Market PMA

Binder Content	Specimen No.	Weight of Specimen		Cantabro Scattering Loss (%)	Avg. (%)
		Before Test	After Test		
3.0%	1	1235.7	1046.6	15.3	15.2
	2	1235.6	1042.8	15.6	
	3	1236.8	1055.0	14.7	
3.5%	1	1243.6	1098.1	11.7	11.8
	2	1244.2	1091.2	12.3	
	3	1246.3	1105.5	11.3	
4.0%	1	1249.6	1145.9	8.3	8.1
	2	1251.3	1156.2	7.6	
	3	1251.4	1145.0	8.5	
4.5%	1	1257.4	1173.2	6.7	6.6
	2	1258.3	1175.3	6.6	
	3	1258.4	1175.3	6.6	
5.0%	1	1261.3	1188.1	5.8	6.0
	2	1262.3	1187.8	5.9	
	3	1265.1	1184.1	6.4	
5.5%	1	1269.4	1199.6	5.5	5.4
	2	1268.7	1197.7	5.6	
	3	1270.4	1204.3	5.2	
6.0%	1	1274.6	1213.4	4.8	5.0
	2	1273.5	1211.1	4.9	
	3	1275.9	1209.6	5.2	
6.5%	1	1279.4	1221.8	4.5	4.7
	2	1280.6	1220.4	4.7	
	3	1285.7	1221.4	5.0	

ตาราง ข 15 ผลการทดสอบ Running Off ของ AC 60/70

Binder Content	Specimen No.	Weight of Container (g)	Weight of Container + Specimen (g)	Weight of Specimen (g)	Weight of Container + Adhering Asphalt (g)	Weight of Adhering Asphalt (g)	Loss of Running Off (%)	Avg. (%)
3.0%	1	197.2	2203.1	2005.9	203.2	6.0	0.3	0.4
	2	186.3	2197.6	2011.3	194.3	8.0	0.4	
	3	197.7	2204.3	2006.6	205.7	8.0	0.4	
3.5%	1	187.5	2201.6	2014.1	201.6	14.1	0.7	0.7
	2	186.7	2197.4	2010.7	200.8	14.1	0.7	
	3	194.1	2205.6	2011.5	208.2	14.1	0.7	
4.0%	1	197.2	2207.1	2009.9	221.3	24.1	1.2	1.2
	2	186.3	2197.4	2011.1	212.4	26.1	1.3	
	3	197.7	2201.4	2003.7	221.7	24.0	1.2	
4.5%	1	187.5	2192.3	2004.8	227.6	40.1	2.0	1.9
	2	186.7	2196.7	2010.0	222.9	36.2	1.8	
	3	194.1	2204.3	2010.2	232.3	38.2	1.9	
5.0%	1	197.2	2201.7	2004.5	253.3	56.1	2.8	2.8
	2	186.3	2203.6	2017.3	244.8	58.5	2.9	
	3	197.7	2205.8	2008.1	251.9	54.2	2.7	
5.5%	1	187.5	2194.3	2006.8	263.8	76.3	3.8	3.8
	2	186.7	2189.3	2002.6	262.8	76.1	3.8	
	3	194.1	2204.6	2010.5	272.5	78.4	3.9	
6.0%	1	197.2	2205.7	2008.5	297.6	100.4	5.0	5.1
	2	186.3	2197.4	2011.1	290.9	104.6	5.2	
	3	197.7	2204.7	2007.0	298.1	100.4	5.0	
6.5%	1	187.5	2194.5	2007.0	328.0	140.5	7.0	7.1
	2	186.7	2196.3	2009.6	331.4	144.7	7.2	
	3	194.1	2207.4	2013.3	335.0	140.9	7.0	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 16 ผลการทดสอบ Running Off ของ P3

Binder Content	Specimen No.	Weight of Container (g)	Weight of Container + Specimen (g)	Weight of Specimen (g)	Weight of Container + Adhering Asphalt (g)	Weight of Adhering Asphalt (g)	Loss of Running Off (%)	Avg. (%)
3.0%	1	197.2	2202.1	2004.9	201.2	4.0	0.2	0.3
	2	186.3	2187.6	2001.3	192.3	6.0	0.3	
	3	197.7	2201.3	2003.6	203.7	6.0	0.3	
3.5%	1	187.5	2189.4	2001.9	197.5	10.0	0.5	0.5
	2	186.7	2189.4	2002.7	196.7	10.0	0.5	
	3	194.1	2198.6	2004.5	204.1	10.0	0.5	
4.0%	1	197.2	2204.6	2007.4	211.3	14.1	0.7	0.8
	2	186.3	2194.3	2008.0	202.4	16.1	0.8	
	3	197.7	2200.6	2002.9	215.7	18.0	0.9	
4.5%	1	187.5	2197.4	2009.9	213.6	26.1	1.3	1.3
	2	186.7	2197.4	2010.7	210.8	24.1	1.2	
	3	194.1	2201.8	2007.7	220.2	26.1	1.3	
5.0%	1	197.2	2200.4	2003.2	243.3	46.1	2.3	2.0
	2	186.3	2194.7	2008.4	222.5	36.2	1.8	
	3	197.7	2203.4	2005.7	235.8	38.1	1.9	
5.5%	1	187.5	2193.2	2005.7	239.6	52.1	2.6	2.8
	2	186.7	2192.4	2005.7	246.9	60.2	3.0	
	3	194.1	2202.1	2008.0	248.3	54.2	2.7	
6.0%	1	197.2	2201.6	2004.4	273.4	76.2	3.8	3.7
	2	186.3	2194.6	2008.3	258.6	72.3	3.6	
	3	197.7	2205.1	2007.4	272.0	74.3	3.7	
6.5%	1	187.5	2189.7	2002.2	293.6	106.1	5.3	5.0
	2	186.7	2198.1	2011.4	281.2	94.5	4.7	
	3	194.1	2203.4	2009.3	292.6	98.5	4.9	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 17 ผลการทดสอบ Running Off ของ P6

Binder Content	Specimen No.	Weight of Container (g)	Weight of Container + Specimen (g)	Weight of Specimen (g)	Weight of Container + Adhering Asphalt (g)	Weight of Adhering Asphalt (g)	Loss of Running Off (%)	Avg. (%)
3.0%	1	197.2	2204.4	2007.2	201.2	4.0	0.2	0.2
	2	186.3	2198.9	2012.6	190.3	4.0	0.2	
	3	197.7	2205.6	2007.9	201.7	4.0	0.2	
3.5%	1	187.5	2202.9	2015.4	195.6	8.1	0.4	0.4
	2	186.7	2198.7	2012.0	194.7	8.0	0.4	
	3	194.1	2206.9	2012.8	200.1	6.0	0.3	
4.0%	1	197.2	2208.4	2011.2	213.3	16.1	0.8	0.8
	2	186.3	2198.7	2012.4	200.4	14.1	0.7	
	3	197.7	2202.7	2005.0	215.7	18.0	0.9	
4.5%	1	187.5	2193.6	2006.1	209.6	22.1	1.1	1.2
	2	186.7	2198	2011.3	210.8	24.1	1.2	
	3	194.1	2205.6	2011.5	222.3	28.2	1.4	
5.0%	1	197.2	2203	2005.8	231.3	34.1	1.7	1.8
	2	186.3	2204.9	2018.6	226.7	40.4	2.0	
	3	197.7	2207.1	2009.4	229.9	32.2	1.6	
5.5%	1	187.5	2195.6	2008.1	235.7	48.2	2.4	2.6
	2	186.7	2190.6	2003.9	242.8	56.1	2.8	
	3	194.1	2205.9	2011.8	248.4	54.3	2.7	
6.0%	1	197.2	2207	2009.8	265.5	68.3	3.4	3.5
	2	186.3	2198.7	2012.4	260.8	74.5	3.7	
	3	197.7	2206	2008.3	266.0	68.3	3.4	
6.5%	1	187.5	2195.8	2008.3	285.9	98.4	4.9	4.8
	2	186.7	2197.6	2010.9	287.2	100.5	5.0	
	3	194.1	2208.7	2014.6	286.8	92.7	4.6	

สถาบันวิจัยบวกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 18 ผลการทดสอบ Running Off ของ P9

Binder Content	Specimen No.	Weight of Container (g)	Weight of Container + Specimen (g)	Weight of Specimen (g)	Weight of Container + Adhering Asphalt (g)	Weight of Adhering Asphalt (g)	Loss of Running Off (%)	Avg. (%)
3.0%	1	197.2	2206.1	2008.9	199.2	2.0	0.1	0.2
	2	186.3	2200.6	2014.3	190.3	4.0	0.2	
	3	197.7	2207.3	2009.6	201.7	4.0	0.2	
3.5%	1	187.5	2204.6	2017.1	195.6	8.1	0.4	0.4
	2	186.7	2200.4	2013.7	192.7	6.0	0.3	
	3	194.1	2208.6	2014.5	202.2	8.1	0.4	
4.0%	1	197.2	2210.1	2012.9	211.3	14.1	0.7	0.7
	2	186.3	2200.4	2014.1	200.4	14.1	0.7	
	3	197.7	2204.4	2006.7	209.7	12.0	0.6	
4.5%	1	187.5	2195.3	2007.8	211.6	24.1	1.2	1.0
	2	186.7	2199.7	2013.0	204.8	18.1	0.9	
	3	194.1	2207.3	2013.2	212.2	18.1	0.9	
5.0%	1	197.2	2204.7	2007.5	231.3	34.1	1.7	1.5
	2	186.3	2206.6	2020.3	214.6	28.3	1.4	
	3	197.7	2208.8	2011.1	225.9	28.2	1.4	
5.5%	1	187.5	2197.3	2009.8	229.7	42.2	2.1	2.1
	2	186.7	2192.3	2005.6	234.8	48.1	2.4	
	3	194.1	2207.6	2013.5	230.3	36.2	1.8	
6.0%	1	197.2	2208.7	2011.5	251.5	54.3	2.7	2.8
	2	186.3	2200.4	2014.1	248.7	62.4	3.1	
	3	197.7	2207.7	2010.0	252.0	54.3	2.7	
6.5%	1	187.5	2197.5	2010.0	271.9	84.4	4.2	3.9
	2	186.7	2199.3	2012.6	263.2	76.5	3.8	
	3	194.1	2210.4	2016.3	268.7	74.6	3.7	

สถาบันวิจัยบวกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 19 ผลการทดสอบ Running Off ของ P12

Binder Content	Specimen No.	Weight of Container (g)	Weight of Container + Specimen (g)	Weight of Specimen (g)	Weight of Container + Adhering Asphalt (g)	Weight of Adhering Asphalt (g)	Loss of Running Off (%)	Avg. (%)
3.0%	1	197.2	2201.8	2004.6	201.2	4.0	0.2	0.2
	2	186.3	2196.3	2010.0	190.3	4.0	0.2	
	3	197.7	2203	2005.3	203.7	6.0	0.3	
3.5%	1	187.5	2200.3	2012.8	193.5	6.0	0.3	0.3
	2	186.7	2196.1	2009.4	192.7	6.0	0.3	
	3	194.1	2204.3	2010.2	202.1	8.0	0.4	
4.0%	1	197.2	2205.8	2008.6	207.2	10.0	0.5	0.5
	2	186.3	2196.1	2009.8	196.3	10.0	0.5	
	3	197.7	2200.1	2002.4	207.7	10.0	0.5	
4.5%	1	187.5	2191	2003.5	201.5	14.0	0.7	0.7
	2	186.7	2195.4	2008.7	198.8	12.1	0.6	
	3	194.1	2203	2008.9	210.2	16.1	0.8	
5.0%	1	197.2	2200.4	2003.2	219.2	22.0	1.1	1.1
	2	186.3	2202.3	2016.0	208.5	22.2	1.1	
	3	197.7	2204.5	2006.8	221.8	24.1	1.2	
5.5%	1	187.5	2193	2005.5	219.6	32.1	1.6	1.5
	2	186.7	2188	2001.3	212.7	26.0	1.3	
	3	194.1	2203.3	2009.2	224.2	30.1	1.5	
6.0%	1	197.2	2204.4	2007.2	231.3	34.1	1.7	2.0
	2	186.3	2196.1	2009.8	232.5	46.2	2.3	
	3	197.7	2203.4	2005.7	239.8	42.1	2.1	
6.5%	1	187.5	2193.2	2005.7	255.7	68.2	3.4	3.0
	2	186.7	2195	2008.3	240.9	54.2	2.7	
	3	194.1	2206.1	2012.0	254.5	60.4	3.0	

สถาบันวิจัยบวกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 20 ผลการทดสอบ Running Off ของ P15

Binder Content	Specimen No.	Weight of Container (g)	Weight of Container + Specimen (g)	Weight of Specimen (g)	Weight of Container + Adhering Asphalt (g)	Weight of Adhering Asphalt (g)	Loss of Running Off (%)	Avg. (%)
3.0%	1	197.2	2201.0	2003.8	199.2	2.0	0.1	0.1
	2	186.3	2195.5	2009.2	188.3	2.0	0.1	
	3	197.7	2202.2	2004.5	201.7	4.0	0.2	
3.5%	1	187.5	2199.5	2012.0	191.5	4.0	0.2	0.2
	2	186.7	2195.3	2008.6	190.7	4.0	0.2	
	3	194.1	2203.5	2009.4	200.1	6.0	0.3	
4.0%	1	197.2	2205.0	2007.8	201.2	4.0	0.2	0.3
	2	186.3	2195.3	2009.0	194.3	8.0	0.4	
	3	197.7	2199.3	2001.6	203.7	6.0	0.3	
4.5%	1	187.5	2190.2	2002.7	197.5	10.0	0.5	0.5
	2	186.7	2194.6	2007.9	196.7	10.0	0.5	
	3	194.1	2202.2	2008.1	204.1	10.0	0.5	
5.0%	1	197.2	2199.6	2002.4	213.2	16.0	0.8	0.8
	2	186.3	2201.5	2015.2	202.4	16.1	0.8	
	3	197.7	2203.7	2006.0	211.7	14.0	0.7	
5.5%	1	187.5	2192.2	2004.7	211.6	24.1	1.2	1.3
	2	186.7	2187.2	2000.5	212.7	26.0	1.3	
	3	194.1	2202.5	2008.4	222.2	28.1	1.4	
6.0%	1	197.2	2203.6	2006.4	229.3	32.1	1.6	1.7
	2	186.3	2195.3	2009.0	222.5	36.2	1.8	
	3	197.7	2202.6	2004.9	231.8	34.1	1.7	
6.5%	1	187.5	2192.4	2004.9	229.6	42.1	2.1	2.3
	2	186.7	2194.2	2007.5	234.9	48.2	2.4	
	3	194.1	2205.3	2011.2	240.4	46.3	2.3	

สถาบันวิจัยบวกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 21 ผลการทดสอบ Running Off ของ Marshall PMA

Binder Content	Specimen No.	Weight of Container (g)	Weight of Container + Specimen (g)	Weight of Specimen (g)	Weight of Container + Adhering Asphalt (g)	Weight of Adhering Asphalt (g)	Loss of Running Off (%)	Avg. (%)
3.0%	1	197.2	2205.8	2008.6	199.2	2.0	0.1	0.1
	2	186.3	2200.3	2014.0	188.3	2.0	0.1	
	3	197.7	2207	2009.3	201.7	4.0	0.2	
3.5%	1	187.5	2204.3	2016.8	193.6	6.1	0.3	0.3
	2	186.7	2200.1	2013.4	190.7	4.0	0.2	
	3	194.1	2208.3	2014.2	200.1	6.0	0.3	
4.0%	1	197.2	2209.8	2012.6	205.3	8.1	0.4	0.5
	2	186.3	2200.1	2013.8	196.4	10.1	0.5	
	3	197.7	2204.1	2006.4	211.7	14.0	0.7	
4.5%	1	187.5	2195	2007.5	203.6	16.1	0.8	0.8
	2	186.7	2199.4	2012.7	200.8	14.1	0.7	
	3	194.1	2207	2012.9	210.2	16.1	0.8	
5.0%	1	197.2	2204.4	2007.2	221.3	24.1	1.2	1.2
	2	186.3	2206.3	2020.0	210.5	24.2	1.2	
	3	197.7	2208.5	2010.8	223.8	26.1	1.3	
5.5%	1	187.5	2197	2009.5	221.7	34.2	1.7	1.7
	2	186.7	2192	2005.3	218.8	32.1	1.6	
	3	194.1	2207.3	2013.2	232.4	38.3	1.9	
6.0%	1	197.2	2208.4	2011.2	245.5	48.3	2.4	2.4
	2	186.3	2200.1	2013.8	236.6	50.3	2.5	
	3	197.7	2207.4	2009.7	241.9	44.2	2.2	
6.5%	1	187.5	2197.2	2009.7	257.8	70.3	3.5	3.5
	2	186.7	2199	2012.3	255.1	68.4	3.4	
	3	194.1	2210.1	2016.0	268.7	74.6	3.7	

สถาบันวิจัยบวกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 22 ผลการทดสอบ Dynamic Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายที่ใช้หินปูน
เป็นวัสดุมวลรวม เพื่อหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของวัสดุเชื่อมประสานแต่ละชนิด

Binder Content	Specimen No.	AC 60/70	P3	P6	P9	P12	P15	Market PMA
3.5%	1	266	392	621	1239	2187	2580	2179
	2	269	380	627	1307	2157	2476	2128
	3	265	400	630	1280	2226	2524	2195
	average	267	391	626	1275	2190	2527	2167
4.0%	1	170	348	720	1640	2487	2647	2458
	2	189	322	778	1700	2682	2678	2367
	3	198	350	707	1780	2030	2547	2350
	average	186	340	735	1707	2400	2624	2392
4.5%	1	167	270	594	1320	2258	2614	2157
	2	160	320	583	1506	2297	2761	2253
	3	165	311	576	1220	2276	2743	2198
	average	164	300	584	1349	2277	2706	2203

ตาราง ข 23 ผลการทดสอบ Dynamic Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบาย
ที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม

Type of Aggregate	Specimen No.	AC 60/70	P3	P6	P9	P12	P15	Market PMA
Limestone	1	266	392	720	1640	2487	2614	2458
	2	269	380	778	1700	2682	2761	2367
	3	265	400	707	1780	2030	2743	2350
	average	267	391	735	1707	2400	2706	2392
Slag	1	264	467	827	1953	2788	3117	2642
	2	284	446	794	1987	2667	3014	2684
	3	271	453	841	1944	2708	3080	2612
	average	273	455	821	1961	2721	3070	2646

ตาราง ข 24 ค่า Splitting strength ratio จากการทดสอบการหลุดลอกด้วยวิธี Splitting test
ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้หินปูนเป็นวัสดุผสมรวม

Type of Binder	Specimen No.	30 min				24 hr.				strength ratio
		diameter (cm.)	high (cm.)	stability (kN)	splitting strength (kg/cm ²)	diameter (cm.)	high (cm.)	stability (kN)	splitting strength (kg/cm ²)	
AC60/70	1	9.98	7.31	4.32	3.84	9.99	7.32	3.55	3.15	76.53
	2	9.97	7.42	4.51	3.95	9.98	7.35	3.45	3.05	
	3	10.01	7.51	4.78	4.12	9.99	7.42	3.34	2.92	
	Average				3.97	Average				
P3	1	9.98	7.62	4.51	3.85	9.98	7.54	3.87	3.34	84.51
	2	9.99	7.41	4.44	3.89	9.98	7.46	3.59	3.13	
	3	9.98	7.62	4.78	4.08	9.99	7.34	3.98	3.52	
	Average				3.94	Average				
P6	1	9.99	7.56	5.07	4.35	9.98	7.34	4.07	3.60	85.50
	2	10.00	7.72	4.97	4.18	10.01	7.54	4.42	3.80	
	3	9.99	7.64	5.12	4.35	9.98	7.45	4.14	3.61	
	Average				4.29	Average				
P9	1	9.97	7.42	5.23	4.59	9.97	7.64	4.55	3.87	82.65
	2	9.98	7.51	5.17	4.47	9.98	7.56	4.31	3.71	
	3	9.98	7.61	5.27	4.50	9.98	7.63	4.26	3.63	
	Average				4.52	Average				
P12	1	9.99	7.68	5.89	4.98	9.98	7.43	4.78	4.18	86.21
	2	9.98	7.48	5.78	5.02	9.99	7.35	4.68	4.13	
	3	9.98	7.53	5.47	4.72	9.99	7.58	5.11	4.38	
	Average				4.91	Average				
P15	1	9.98	7.63	5.77	4.92	9.98	7.51	5.11	4.42	87.48
	2	9.99	7.65	5.98	5.08	9.97	7.62	5.40	4.61	
	3	9.99	7.59	6.23	5.33	9.99	7.49	5.04	4.37	
	Average				5.11	Average				
PMA	1	9.98	7.67	5.46	4.63	10.00	7.64	4.67	3.97	84.96
	2	9.98	7.54	5.12	4.41	9.97	7.52	4.44	3.84	
	3	9.98	7.52	5.82	5.03	9.99	7.64	4.88	4.15	
	Average				4.69	Average				

ตาราง ข 25 ค่า Splitting strength ratio จากการทดสอบการหลุดลอกด้วยวิธี Splitting test
ของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำที่ใช้ตะกั่วหนักเป็นวัสดุผสมรวม

Type of Binder	Specimen No.	30 min				24 hr.				strength ratio
		diameter (cm.)	high (cm.)	stability (kN)	splitting strength (kg/cm ²)	diameter (cm.)	high (cm.)	stability (kN)	splitting strength (kg/cm ²)	
AC60/70	1	9.97	8.13	4.23	3.39	9.97	8.15	3.27	2.61	74.57
	2	9.98	8.11	4.28	3.43	9.98	8.12	3.12	2.50	
	3	9.98	8.14	4.20	3.35	9.98	8.14	3.10	2.48	
	Average				3.39	Average				
P3	1	9.98	8.15	4.51	3.60	9.99	8.14	3.28	2.62	74.93
	2	9.99	8.12	4.26	3.41	9.97	8.15	3.44	2.75	
	3	9.97	8.16	4.76	3.80	9.97	8.13	3.41	2.73	
	Average				3.60	Average				
P6	1	9.97	8.16	4.92	3.92	9.98	8.16	3.90	3.11	75.22
	2	9.98	8.15	5.13	4.09	9.98	8.17	3.78	3.01	
	3	9.99	8.14	4.97	3.96	9.97	8.20	3.65	2.90	
	Average				3.99	Average				
P9	1	9.98	8.14	5.11	4.08	9.97	8.17	4.05	3.23	78.68
	2	9.97	8.15	4.99	3.98	9.98	8.13	4.15	3.32	
	3	9.97	8.16	5.37	4.28	9.98	8.14	3.97	3.17	
	Average				4.12	Average				
P12	1	9.98	8.12	5.26	4.21	9.99	8.15	4.47	3.56	79.19
	2	9.98	8.14	5.38	4.30	9.98	8.16	4.18	3.33	
	3	9.97	8.14	5.67	4.53	9.99	8.15	4.31	3.43	
	Average				4.35	Average				
P15	1	9.98	8.12	5.78	4.63	10.01	8.15	4.50	3.58	80.52
	2	9.97	8.16	5.98	4.77	9.98	8.15	4.69	3.74	
	3	9.97	8.16	5.46	4.35	9.99	8.17	4.72	3.75	
	Average				4.58	Average				
PMA	1	9.99	8.14	5.12	4.08	9.98	8.17	4.28	3.41	78.03
	2	9.97	8.13	5.37	4.30	9.98	8.15	4.35	3.47	
	3	9.97	8.11	5.66	4.54	9.97	8.15	4.02	3.21	
	Average				4.31	Average				

ตาราง ข 26 ค่าแรงเสียดทานของก้อนทดสอบทั้งในสภาพแห้ง และสภาพเปียก

Type of Asphalt Concrete	Type of Binder	Test No. Specimen No.	Limestone								Slag							
			Dry Condition				Wet Condition				Dry Condition				Wet Condition			
			1	2	3	Ave.	1	2	3	Ave.	1	2	3	Ave.	1	2	3	Ave.
Dense-Grade Asphalt Concrete	AC 60/70	1	75	76	77	76	68	67	65	67								
		2	72	74	74	73	66	65	64	65								
		3	75	75	77	76	67	66	66	66								
		Average				75	Average			66								
Drainaged Asphalt Concrete	AC 60/70	1	95	96	96	96	95	94	93	94	115	117	116	116	110	109	109	109
		2	97	98	97	97	96	97	97	97	113	113	114	113	110	109	108	109
		3	95	95	94	95	94	93	93	93	112	113	113	113	107	107	108	107
		Average				96	Average			95	Average			114	Average			109
	P3	1	95	95	95	95	94	93	94	94	116	116	115	116	111	110	110	110
		2	96	97	96	96	95	96	95	95	113	114	115	114	108	108	109	108
		3	92	92	93	92	90	91	90	90	113	112	113	113	108	107	107	107
		Average				95	Average			93	Average			114	Average			109
	P6	1	95	96	96	96	95	95	96	95	112	115	114	114	108	108	107	108
		2	93	93	93	93	92	93	93	93	111	113	113	112	109	108	110	109
		3	94	95	95	95	93	94	94	94	110	112	112	111	107	107	106	107
		Average				94	Average			94	Average			112	Average			108
	P9	1	93	93	94	93	91	91	92	91	114	115	116	115	112	113	113	113
		2	96	97	97	97	95	95	95	95	112	114	114	113	112	112	113	112
		3	95	94	95	95	94	93	93	93	117	116	115	116	110	110	109	110
		Average				95	Average			93	Average			115	Average			112
	P12	1	91	92	92	92	90	91	91	91	115	114	115	115	109	107	108	108
		2	95	94	94	94	94	93	93	93	112	113	112	112	108	107	106	107
		3	95	96	95	95	94	94	95	94	114	113	111	113	106	106	105	106
		Average				94	Average			93	Average			113	Average			107
	P15	1	93	94	96	94	91	94	94	93	113	112	112	112	106	106	108	107
		2	97	95	95	96	91	94	93	93	113	114	116	114	109	107	109	108
		3	92	92	93	92	89	90	91	90	112	113	114	113	107	109	110	109
		Average				94	Average			92	Average			113	Average			108
	PMA	1	91	91	92	91	90	91	90	90	114	115	115	115	110	108	108	109
		2	95	94	96	95	94	94	93	94	114	114	117	115	111	108	109	109
		3	92	93	94	93	91	92	91	91	113	111	114	113	110	111	109	110
		Average				93	Average			92	Average			114	Average			109

ตาราง ข 27 ความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ
ที่ใช้หินปูนและตะกรันเหล็กเป็นวัสดุผสมรวม ตามแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดต่างๆ

Type of Binder	เวลาในการระบายน้ำ (วินาที)								
	Test No. Specimen No.	Limestone				Slag			
		1	2	3	Average	1	2	3	Average
AC 60/70	1	98	98	100	99	95	95	96	95
	2	96	96	98	97	97	96	96	96
	3	98	98	98	98	97	96	95	96
	Average				98	Average			96
P3	1	102	103	103	103	100	101	101	101
	2	103	103	103	103	102	102	102	102
	3	102	101	103	102	100	99	100	100
	Average				103	Average			101
P6	1	107	107	107	107	104	104	105	104
	2	105	106	106	106	105	105	105	105
	3	105	106	107	106	106	105	105	105
	Average				106	Average			105
P9	1	108	108	109	108	106	107	107	107
	2	109	109	109	109	108	107	108	108
	3	110	110	110	110	107	108	108	108
	Average				109	Average			107
P12	1	113	113	114	113	110	111	112	111
	2	112	113	113	113	110	111	111	111
	3	112	112	112	112	109	109	110	109
	Average				113	Average			110
P15	1	115	115	115	115	113	113	114	113
	2	114	116	116	115	112	113	113	113
	3	115	115	115	115	111	112	113	112
	Average				115	Average			113
PMA	1	112	112	112	112	108	108	108	108
	2	111	112	112	112	108	109	109	109
	3	110	110	112	111	109	110	110	110
	Average				111	Average			109

ตาราง ข 28 ความสามารถในการระบายน้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาของแอสฟัลต์
คอนกรีตระบายน้ำ 2cm 4cm และ 6cm ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

Type of Binder	Test No. specimen No.	ความหนาท่อระบายน้ำ											
		2 cm.				4 cm.				6 cm.			
		1	2	3	Average	1	2	3	Average	1	2	3	Average
AC 60/70	1	151	150	150	150	125	126	126	126	102	102	103	102
	2	149	149	149	149	125	125	125	125	103	104	104	104
	3	151	150	150	150	124	125	125	125	104	104	103	104
		Average			150	Average			125	Average			103
P3	1	150	151	152	151	127	127	128	127	105	105	105	105
	2	151	151	151	151	127	127	127	127	105	106	105	105
	3	152	152	151	152	125	125	127	126	105	106	106	106
		Average			151	Average			127	Average			105
P6	1	156	156	156	156	132	132	132	132	108	108	109	108
	2	155	154	154	154	129	130	130	130	108	108	108	108
	3	157	156	156	156	130	130	131	130	107	108	109	108
		Average			156	Average			131	Average			108
P9	1	159	160	160	160	135	135	136	135	112	112	113	112
	2	157	158	159	158	136	136	136	136	113	113	113	113
	3	159	159	158	159	132	133	133	133	112	111	112	112
		Average			159	Average			135	Average			112
P12	1	163	164	164	164	140	141	141	141	116	116	117	116
	2	163	163	162	163	139	139	139	139	115	116	117	116
	3	162	162	162	162	138	139	139	139	117	118	118	118
		Average			163	Average			139	Average			117
P15	1	165	166	165	165	140	141	141	141	118	118	118	118
	2	167	168	169	168	139	139	139	139	119	120	120	120
	3	163	163	163	163	141	141	141	141	118	119	119	119
		Average			165	Average			140	Average			119
PMA	1	163	163	162	163	137	137	137	137	115	114	116	115
	2	162	162	163	162	138	138	139	138	116	114	115	115
	3	160	161	161	161	138	138	138	138	115	116	116	116
		Average			162	Average			138	Average			115

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข 29 ผลการทดสอบ Dynamic creep ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาของแอสฟัลต์คอนกรีตระบายน้ำ
2cm 4cm และ 6cm ปูทับบนแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

Type of Binder	speciment No.	ความหนาของชั้นระบายน้ำ		
		2 cm.	4 cm.	6 cm.
AC60/70	1	1121	568	295
	2	1157	571	307
	3	1174	582	304
	average	1151	574	302
P3	1	1297	746	424
	2	1278	727	446
	3	1315	758	407
	average	1297	744	426
P6	1	1790	1037	640
	2	1758	1050	665
	3	1725	997	671
	average	1758	1028	659
P9	1	2142	1380	975
	2	2198	1399	968
	3	2118	1376	954
	average	2153	1385	966
P12	1	2998	1694	1248
	2	2940	1712	1229
	3	2952	1686	1234
	average	2963	1697	1237
P15	1	3239	1831	1407
	2	3278	1874	1429
	3	3207	1856	1382
	average	3241	1854	1406
Market PMA	1	2743	1618	1223
	2	2777	1642	1256
	3	2760	1597	1214
	average	2760	1619	1231



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 $PI < -1$ จะเป็นแอสฟัลต์ที่มีค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิลึกค่อนข้างสูง (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

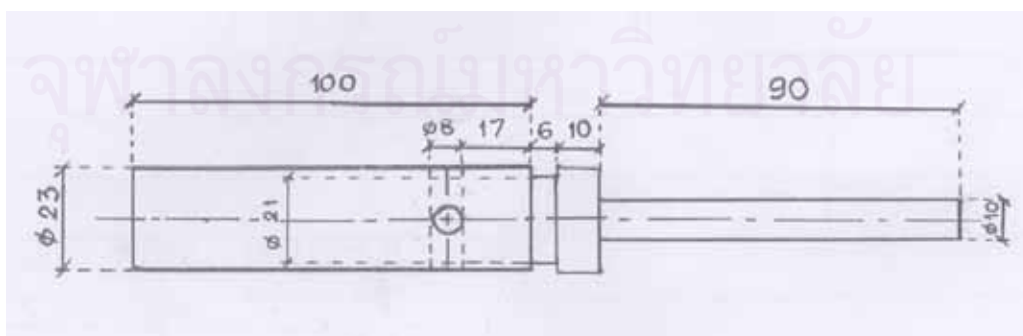
การทดสอบ Elastic Recovery ของวัสดุแอสฟัลต์

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

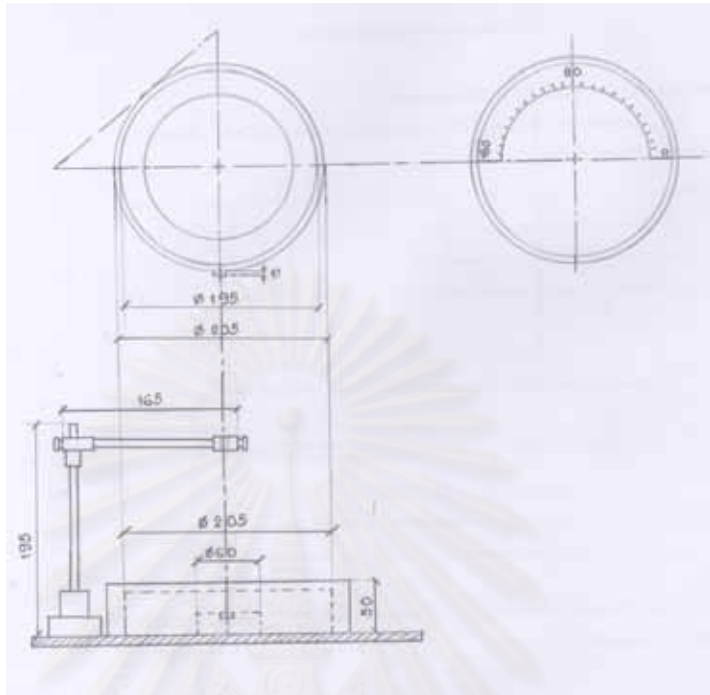
2 เครื่องมือและวัสดุ

- 2.1 แท่งบิด เป็นแท่งโลหะไร้สนิมที่ใช้ในการบิด (แรงบิดตัว ที่ศูนย์กลางของตัวอย่างที่มีขนาดตามรูปที่ ค 1)



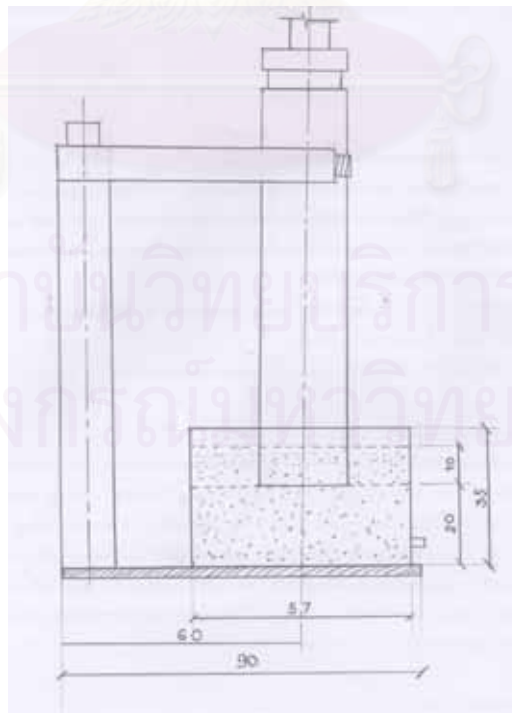
รูปที่ ค 1

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



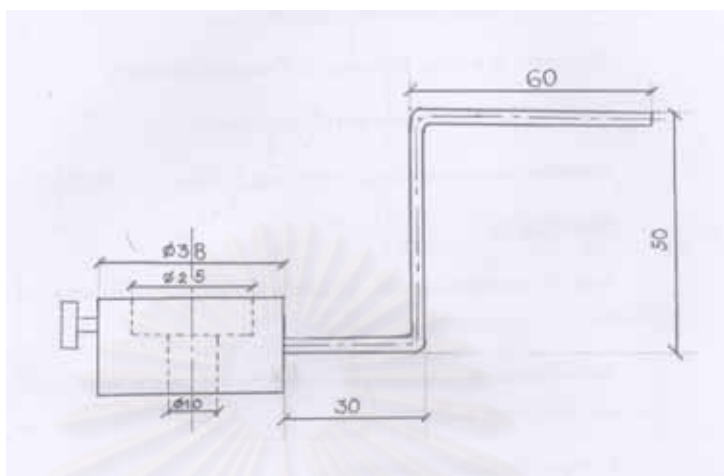
รูปที่ ค 2

- 2.3 ถ้วยใส่ตัวอย่างพร้อมขาตั้งแท่งบิด ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างทดสอบ มีขนาดตามรูปที่ ค 3



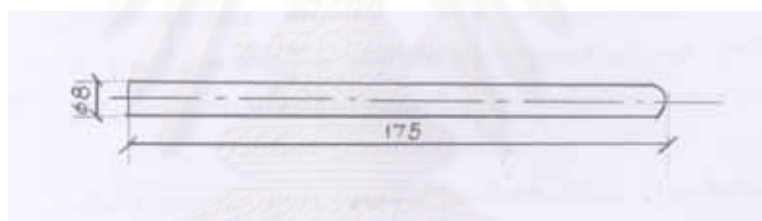
รูปที่ ค 3

- 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 \pm 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 ให้นำตัวอย่างพร้อมแท่งบีดใส่ลงไปในห้องทดสอบ 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

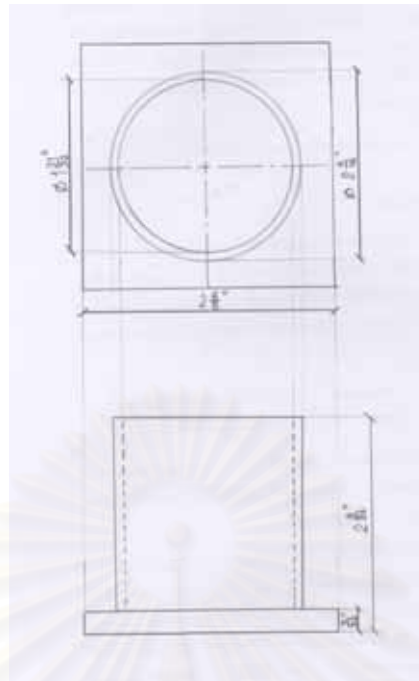
- **Toughness** หมายถึง พลังงาน (Energy) ที่ใช้ในการทำให้ชิ้นทดสอบขาดอย่างสมบูรณ์ ภายใต้แรงเค้น (Stress) และใน Diagram ของแรงกับการยืดตัว (Force and Elongation) ได้แก่ พื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้น Curve ดังรูปที่ ค 11
- **Tenacity** หมายถึง งาน (Work) ที่กระทำจากจุดรับ Load สูงสุดจนกระทั่งตัวอย่างขาด ใน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

3 หลักการ

จุ่มหัวเครื่องลงกลมลงไปในตัวอย่าง และภายใต้สภาวะที่กำหนด ยึดตั้งด้วยความเร็วคงที่จนแยกขาดจากกัน

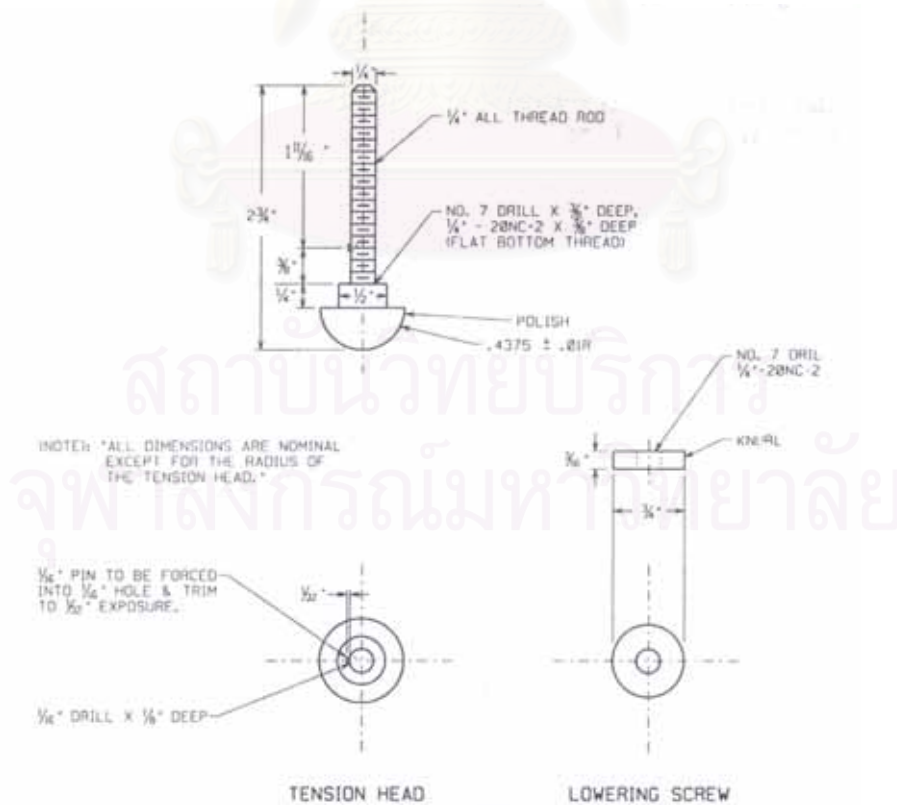
4 เครื่องมือ

- 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



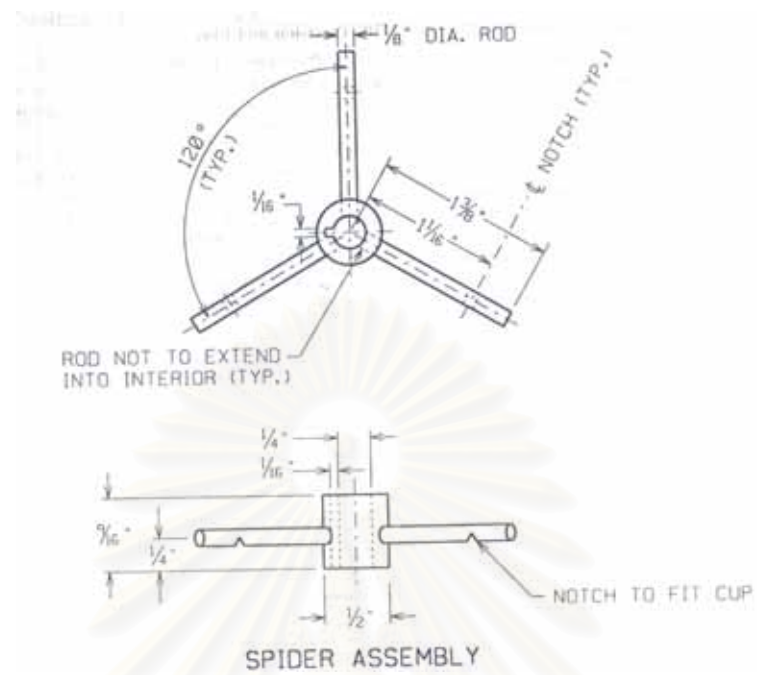
รูปที่ ค 7

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



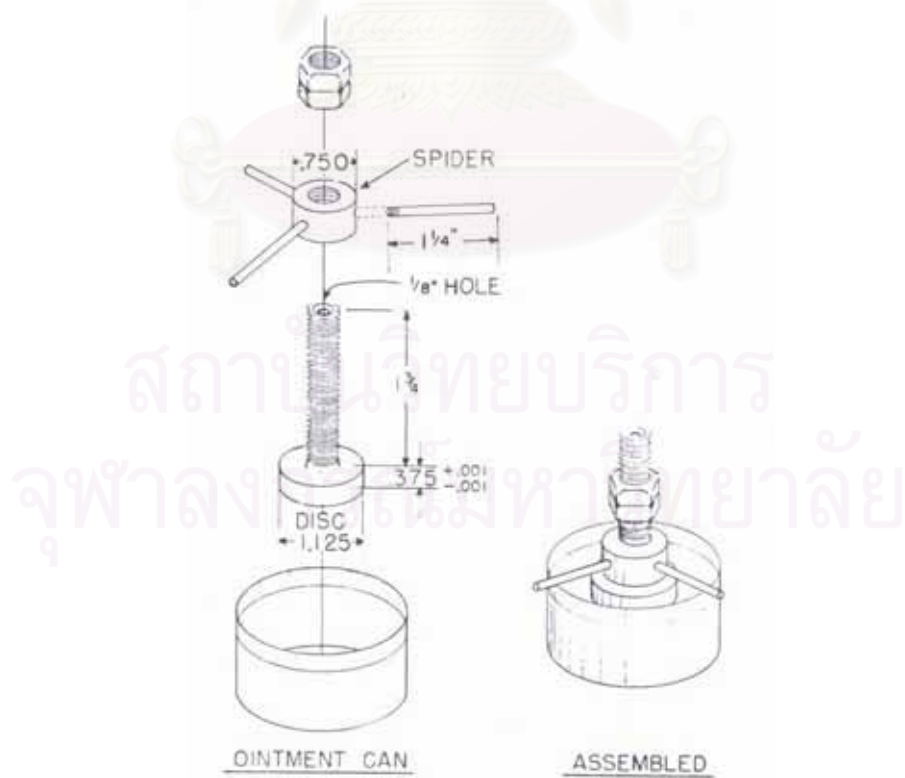
รูปที่ ค 8

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 หย่อยหัวดึง (Tension head) ลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง โดยให้ระดับตัวอย่างอยู่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของครึ่งวงกลม การปรับระดับหัวดึงทำได้โดยปรับเกลียวปรับระดับ (Lowering screw)
- 6.3 ปล่อยตัวอย่างให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องนาน 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

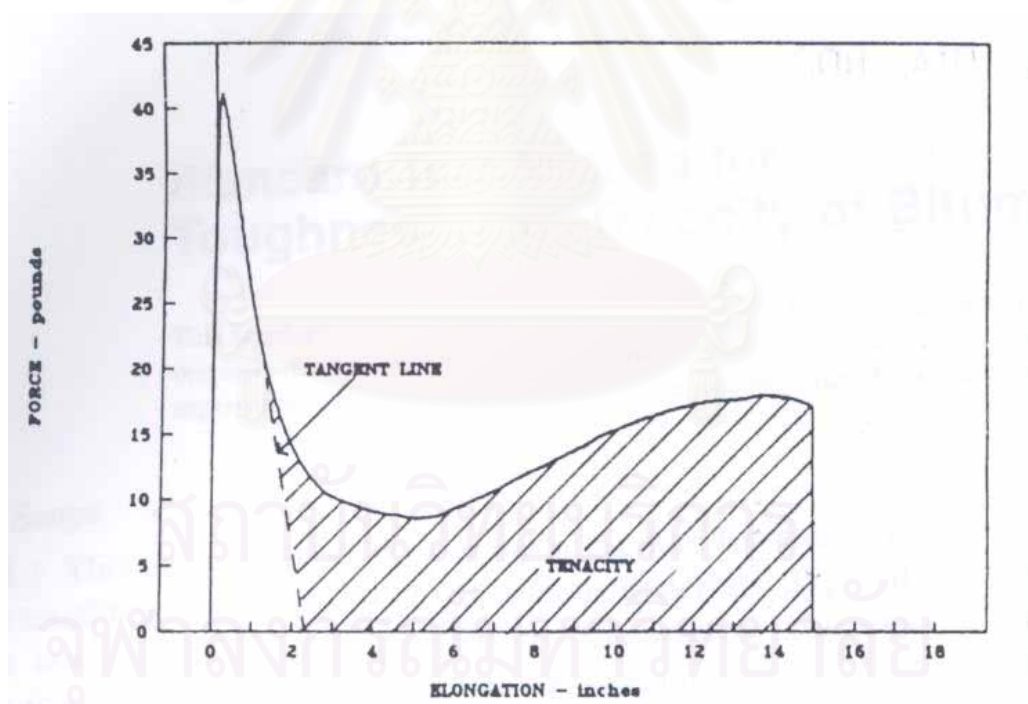
ในการวิเคราะห์ Curve ของเส้นสัมผัส (Tangent line) จะถูกขยายออกไปด้านขวาของ Curve ระหว่าง Force กับ Elongation ในขณะที่ Curve จะลดลงจากค่าสูงสุด โดยตรวจจอบดังนี้

- วัดค่า Toughness ได้แก่ พื้นที่ทั้งหมดภายใต้ Curve หน่วยเป็น Kg-cm

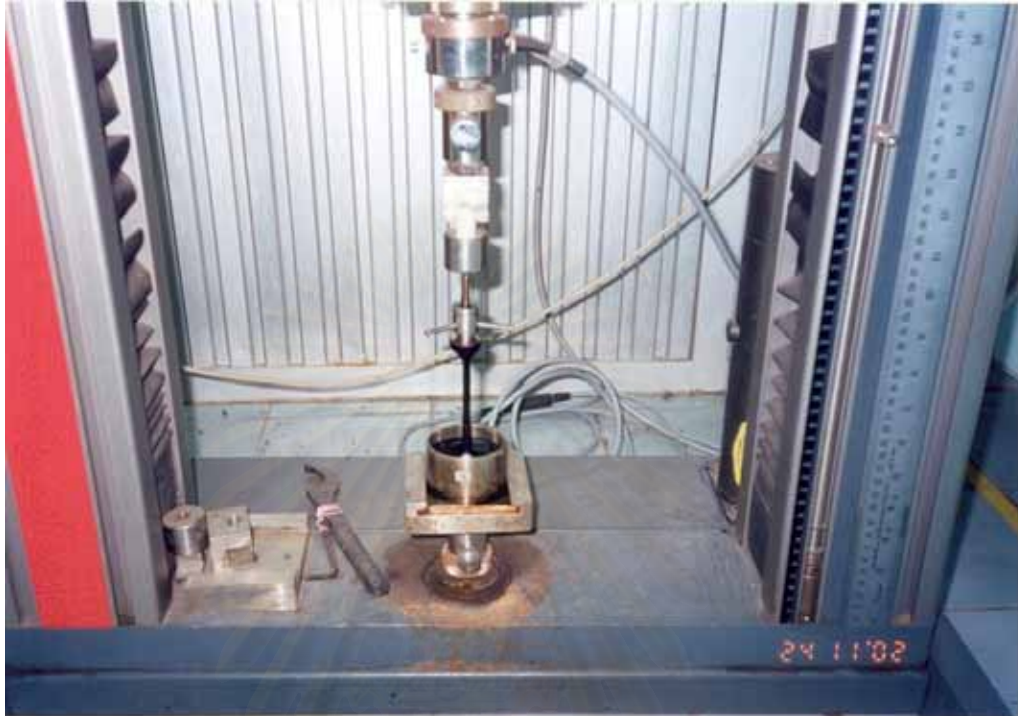
- วัดค่า Tenacity ได้แก่พื้นที่ภายใต้ Curve ทางด้านขวาของเส้นสัมผัส (Tangent line) หน่วย Kg-cm

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 ของเหลวนั้นจะเป็น Non-Newtonian ของเหลวหลายชนิดจะมีพฤติกรรมเป็นทั้ง Newtonian และ Non-Newtonian ขึ้นอยู่กับ Shear rate
- 2.3 **Viscosity** คือ อัตราส่วนระหว่าง Shear stress และ Rate of Shear เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด 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 และหลีกเลี่ยงการลุกติดไฟของ 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 ใสลงไปในระบบให้ความร้อน (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

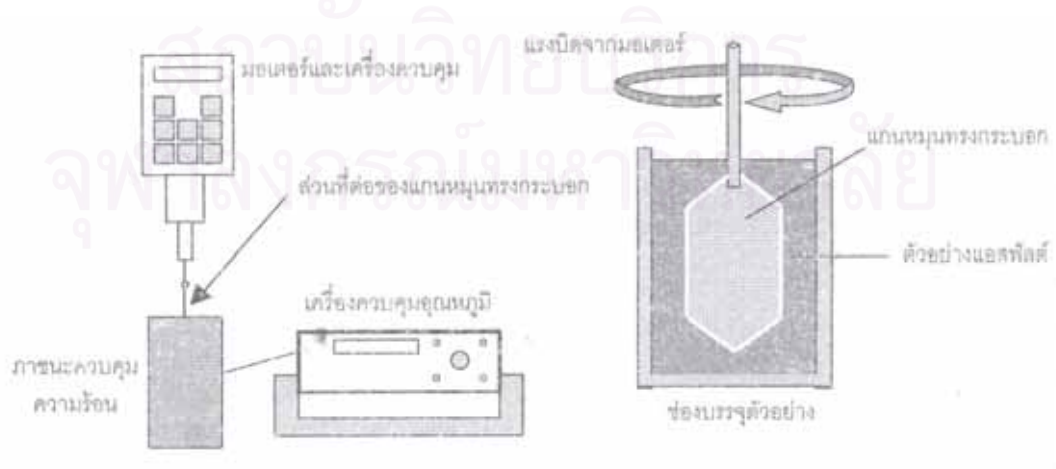
- 7.1 รายงานคุณสมบัติทดสอบ หมายเลข Spindle และความเร็ว (Speed) พร้อมผลการทดลองตัวอย่าง เช่น Viscosity ที่ 60 องศาเซลเซียส = 105 Mpa with Spindle number
- 7.2 เขียนกราฟระหว่างค่า Viscosity กับคุณสมบัติที่ทดสอบจริง สำหรับแต่ละคุณสมบัติทดสอบและลากเส้น Curve

8 ความเที่ยงตรง

- 8.1 เกณฑ์ต่อไปนี้จะใช้สำหรับการตัดสิน การยอมรับของผลการทดสอบใด ๆ (ระดับความเชื่อมั่น 95%)
- 8.1.1 Repeatability ค่า 2 ค่าที่ได้จากผู้ทดลองคนเดียวกัน จะไม่นำมาพิจารณายอมรับ ยกเว้นที่แตกต่างกันไม่เกิน 3.5%
- 8.1.2 Reproducibility 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

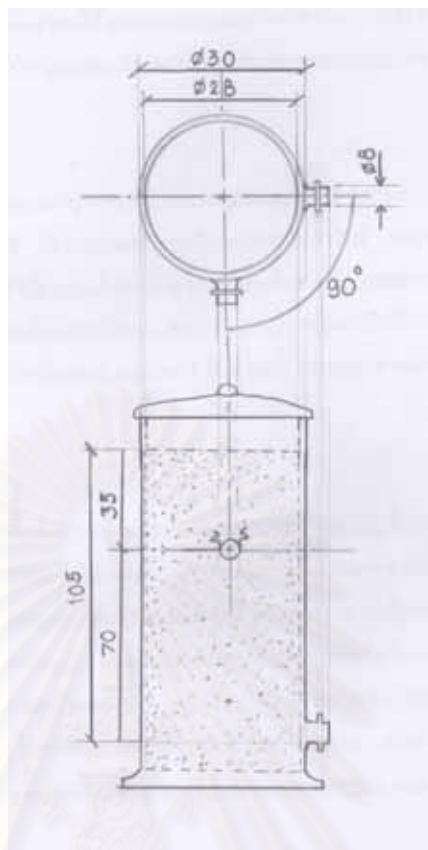
ตัวอย่างที่เป็นเนื้อเดียวกันของ Modified Asphalt Cement จะถูกเก็บไว้ในภาชนะที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 120 ชั่วโมง (5 วัน) หลังจากครบกำหนดตรวจสอบค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของตัวอย่างที่นำออกมาจากส่วนบน และส่วนล่าง

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 เติตัวอย่างปริมาณ 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

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เอกพล อัครภาณิชย์กร เกิดวันที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด ภูเก็ต สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย เมื่อปีการศึกษา 2539 จาก โรงเรียนภูเก็ตวิทยาลัย จังหวัด ภูเก็ต สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา เมื่อปีการศึกษา 2543 จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมขนส่งและการจราจร เมื่อปีการศึกษา 2546 จากจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย