

การศึกษาผลกระทบจากการใช้ฝุ่นจากธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของ
แอสฟัลท์คอนกรีต

EFFECT OF WASTE NATURAL FILLERS ON ASPHALT MIXTURE
PERFORMANCE

พีรดา รักคง

มานิตา ไทยเรือง

สิริพรรณ คนองนีก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

EFFECT OF WASTE NATURAL FILLERS ON ASPHALT MIXTURE PERFORMANCE

PEERADA RUKKHONG
MANITA THAIRUENG
SIRIPUN KANONGNUK





A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาผลกระทบจากการใช้ฝุ่นธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของแอสฟัลท์
คอนกรีต
EFFECT OF WASTE NATURAL FILLERS ON ASPHALT MIXTURE
PERFORMANCE

นักศึกษา นางสาวพริดา รักคง รหัสนักศึกษา 62010648
นางสาวมานิตา ไทยเรือง รหัสนักศึกษา 62010738
นางสาวสิริพรรณ คนองนีก รหัสนักศึกษา 62010953

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จาร์วิษฐ์ ปราบณศักดิ์	
ผศ.นัฐพร นวกิจรังสรรค์	
ผศ.ดร.จำรัส พิทักษ์ศฤงคาร	
รศ.ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.ชลิตา อุตะเภา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ ๒ มิ.ย. ๒๕๖๖

การศึกษาผลกระทบจากการใช้ฝุ่นจากธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของแอสฟัลท์

คอนกรีต

นางสาวพีรดา	รักคง	รหัสนักศึกษา	62010648
นางสาวมานิตา	ไทยเรือง	รหัสนักศึกษา	62010738
นางสาวสิริพรรณ	คนองนิก	รหัสนักศึกษา	62010953

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

คุณสมบัติความเหนียวเป็นส่วนสำคัญของโครงสร้างวัสดุแอสฟัลท์ซึ่งมีบทบาทในการเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพต่างๆโดยการใช้ฝุ่นสามารถเพิ่มเสถียรภาพได้ ซึ่งการใช้ฝุ่นที่แตกต่างกันในการผสมแอสฟัลท์ที่อัตราส่วนเดียวกัน จะส่งผลให้คุณสมบัติความเหนียวของแอสฟัลท์แตกต่างกันและความเหนียวของแอสฟัลท์จำเป็นต้องนำมาพิจารณาสำหรับการทำงานในสนาม ซึ่งในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเหนียวและเสถียรภาพในการต้านทานความเสียหายโดยใช้ฝุ่นที่สามารถหาได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้ฝุ่นจากเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมัน จากการทดสอบพบว่าค่าความเหนียวของแอสฟัลท์มาستيكผสมฝุ่นเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าอยู่ในช่วงความเหนียวของแอสฟัลท์มาستيكที่ผสมฝุ่นหินปูนและหินแกรนิตในทุกอุณหภูมิเมื่อใช้อัตราส่วนผสมเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยปริมาตรของแอสฟัลท์และอัตราส่วนผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 15 โดยปริมาตรของแอสฟัลท์ จากนั้นทดสอบหาค่าเสถียรภาพโดยวิธี Marshall Stability เมื่อใช้มาตรฐานที่ชั้นทาง Wearing course สรุปได้ว่าปริมาณแอสฟัลท์ต่อปริมาณมวลรวมที่เหมาะสม ได้แก่ แอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าแกลบร้อยละ 4.5 และแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5.0 โดยมวลของมวลรวม

คำสำคัญ: ฝุ่นเถ้าแกลบ , ฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน , การเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

Effect of Waste Natural Fillers on Asphalt Mixture Performance

Miss. Peerada Rukkhong Student ID. 62010648

Miss. Manita Thairueng Student ID. 62010738

Miss. Siripun Kanongnuk Student ID. 62010953

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Preeda Chaturabong

Academic Year 2022

ABSTRACT

The workability of asphalt construction is crucial for enhancing its stability and overall performance. Incorporating various mineral filler can significantly affect the workability of asphalt within the same mix design. While fillers can improve stability, the viscosity of asphalt mastic is crucial factor to consider when working in the field. This study investigates the use of rice husk ash and palm oil fuel ash, which are agricultural waste materials, to determine their impact on asphalt mastic viscosity. The results indicate that the viscosity of asphalt mastic containing 20% rice husk ash and 15% palm oil fuel ash is relatively similar to that of mastic with limestone filler and granite filler at all temperatures. Marshall Stability Test and standard wearing course test were conducted to evaluate the stability of the asphalt mixtures. Laboratory test results demonstrate that incorporating 4.5% rice husk ash and 5.0% palm oil fuel ash, asphalt content by weight of the aggregate is suitable for asphalt mixture stability.

KEYWORDS: rice husk ash as filler, palm oil fuel ash as filler, agricultural waste materials.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รศ.ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไข ปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง ในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอด ความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและ การดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท ทักษิณปาล์ม(2521) จำกัด จากจังหวัดสุราษฎร์ธานี และ ด.ต.อวยชัย ไทย เรือง ที่สนับสนุนเก้าอี้ปาล์มน้ำมันและเก้าอี้แกลบ มาใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการ ทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาทั้งหมดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการ สนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึก ซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ปรีดา	รักคง
มานิตา	ไทยเรือง
สิริพรรณ	คนองนิก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.1 แอสฟัลท์คอนกรีต (Asphalt Concrete).....	3
2.1.1 มวลรวม (Aggregate).....	3
2.1.2 แอสฟัลท์ (Asphalt).....	4
2.1.2.1 Asphalt Cement.....	4
2.1.2.2 Asphalt Emulsion.....	4
2.1.2.3 Cut-back Asphalt.....	5
2.1.2.4 Polymer Modified Asphalt (PMA).....	5
2.2 แอสฟัลท์มาستيك (Asphalt Mastics).....	6
2.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของแอสฟัลท์มาستيك.....	6
2.2.2 คุณสมบัติของส่วนประกอบมาستيك.....	17
2.2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเติม.....	17
2.2.2.2 คุณสมบัติทางเคมีของฟิลเลอร์.....	23
2.2.2.3 คุณสมบัติของตัวประสาน (Binder).....	25
2.3 การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลท์.....	28
2.4 ความหมายและการนำไปใช้งานของความหนืดของแอสฟัลท์.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 เครื่องวัดความหนืดแบบหมุน (Rotational viscometer).....	29
2.6 การวัดเสถียรภาพด้วยวิธี Marshall (Marshall Stability)	30
2.7 ปริมาตรในส่วนผสมของแอสฟัลท์คอนกรีต.....	32
2.7.1 ช่องว่างอากาศ.....	32
2.7.2 ช่องว่างอากาศในมวลรวม.....	32
2.7.3 ช่องว่างที่ถูกแทนด้วยแอสฟัลท์.....	33
2.8 ถังปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Fuel Ash)	33
2.9 ถังแกลบ (Rice Husk Ash)	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 การทดสอบความหนืดของแอสฟัลท์มาستيكด้วยเครื่อง Rotational Viscometer.....	35
3.1.1 ร้อยละโดยปริมาตรของฝุ่นต่อแอสฟัลท์ที่ศึกษา.....	37
3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ.....	37
3.2 การทดสอบ Marshall Stability และ Flow.....	38
3.2.1 เครื่องมือสำหรับการทดสอบ Marshall Stability และ Flow	39
3.2.2 อุปกรณ์.....	39
3.2.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ.....	39
3.2.4 ขั้นตอนการทดสอบ.....	40
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	41
4.1 ผลการทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Rotational viscometer.....	41
4.2 ผลการทดสอบ Marshall stability และ Flow.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก ก.	
ภาคผนวก ข.	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของมวลรวมและปริมาณของแอสฟัลท์ที่ใช้.....	3
ตารางที่ 2.2 มวลของฟิลเลอร์สำหรับความเข้มข้นของอนุภาคที่ส่งผล.....	12
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของมาستيكที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของส่วนผสมแอสฟัลท์.....	16
ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การออกแบบและข้อกำหนด.....	31
ตารางที่ 3.1 ชนิดของวัสดุผสมแทรก(Filler)ที่ใช้ในการทดสอบ.....	35
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดสอบระยะที่1.....	36
ตารางที่ 3.3 แสดงการคำนวณหาปริมาณของฝุ่นเข้าทั้งสองชนิดตามเปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตรของแอสฟัลท์.....	37
ตารางที่ 3.4 การออกแบบการทดสอบระยะที่ 2	38
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงอุณหภูมิผสมและบดอัดของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสม filler แต่ละชนิดตามสัดส่วนที่แตกต่างกัน.....	43
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดคละของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ใช้โดยปริมาณ ของมวลรวม.....	44
ตารางที่ 4.3 แสดงผล % Air voids, Flow และ Stability ของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ ผสมฝุ่นจากเถ้ากลบใช้ปริมาณยาง 4.5% และแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์ม น้ำมันในปริมาณยาง 5.0%	47

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงปริมาตรส่วนประกอบของ Asphalt Mixture	12
รูปภาพที่ 2.2 ความหนืดของมาสติกแอสฟัลท์เปรียบเทียบกับอัตราส่วนของฝุ่นต่อแอสฟัลท์.....	15
รูปภาพที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของฟิลเลอร์ชนิดต่างๆ.....	20
รูปภาพที่ 2.4 Rigden Voids ของฟิลเลอร์ชนิดต่างๆ.....	22
รูปภาพที่ 2.5 แผนภาพแสดงการเคลือบฟิลเลอร์ของแอสฟัลท์.....	23
รูปภาพที่ 2.6 การกำหนดค่าอุณหภูมิผสมและการบดอัด.....	29
รูปภาพที่ 2.7 เครื่องวัดความหนืดแบบหมุน	30
รูปภาพที่ 2.8 เครื่องทดสอบเสถียรภาพ Marshall	31
รูปภาพที่ 3.1 แสดงฝุ่นจากวัฏศูธรรมชาติโดย a) ถ้ำเกลือ b) ถ้ำปาล์มน้ำมัน.....	36
รูปภาพที่ 3.2 แสดงขนาดคละของมวลรวม.....	39
รูปภาพที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นถ้ำเกลือ 20% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน20%และฝุ่นหินแกรนิต.....	41
รูปภาพที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นถ้ำปาล์มน้ำมัน10% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน20%และฝุ่นหินแกรนิต20%.....	42
รูปภาพที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นถ้ำปาล์มน้ำมัน15% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน20%และฝุ่นหินแกรนิต20%.....	43
รูปภาพที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นถ้ำปาล์มน้ำมัน20% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน20%และฝุ่นหินแกรนิต20%.....	43
รูปภาพที่ 4.5 กราฟแสดงค่า Density, %Air voids, Flow, Stability, %V.F.B, %V.M.A ของแอสฟัลท์คอนกรีตผสมฝุ่นจากถ้ำเกลือและใช้ปริมาณยาง 4.5%, 5.0% และ 5.5% ต่อปริมาตรของมวลรวม.....	45
รูปภาพที่ 4.5 กราฟแสดงค่า Density, %Air voids, Flow, Stability, %V.F.B, %V.M.A ของแอสฟัลท์คอนกรีตผสมฝุ่นจากถ้ำปาล์มน้ำมันและใช้ปริมาณยาง 4.5%, 5.0% และ 5.5% ต่อปริมาตรของมวลรวม.....	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในประเทศไทยและประเทศอื่นๆ ถนนส่วนใหญ่ถูกสร้างด้วยแอสฟัลท์คอนกรีต(ยางมะตอยผสมหิน) เนื่องจากถนนยางมะตอยสามารถให้ประสิทธิภาพในการขับขี่ได้ดีกว่าและมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมน้อยกว่าถนนคอนกรีตรวมถึงเหมาะกับอากาศร้อนของประเทศไทย หน้าที่พื้นผิวจะมีความเหนียวอยู่เล็กน้อย เมื่อการขับขี่หน้ายางของล้อรถเจอกับความร้อนเหมือนกัน จึงทำให้เหนียวขึ้น เกิดแรงเสียดทานทำให้การเกาะถนนดีขึ้น ยางมะตอยมีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด มีอำนาจการยึดหยุ่นสูงซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญในการรับแรงดึงหรือบางชนิดเป็นกึ่งของแข็งสีดำหรือสีน้ำตาลแก่แกมดำเป็นของผสมระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและสารอินทรีย์อื่นๆ ยางมะตอยได้มาจากขบวนการการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมโดยยางมะตอยเป็นส่วนของน้ำมันดิบที่หนักที่สุดและจะถูกนำไปผ่านขบวนการผลิตยางมะตอยต่อไปเพื่อให้ได้ยางมะตอยที่มีคุณสมบัติตามความต้องการ มีราคาถูกและหาได้ง่าย การที่ยางมะตอยได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างกว้างขวางนั้น เนื่องจากมีคุณสมบัติในการยึดประสาน ทำหน้าหน้าที่เป็นตัวเชื่อมวัสดุต่างๆให้ติดกัน เช่น การผสมยางมะตอยกับมวลรวมเพื่อใช้ทำผิวจราจร เป็นต้น ในส่วนผสมของแอสฟัลท์คอนกรีตมีฝุ่น(Filler) เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดความหนืดในการทำงานในช่วงการผสมและบดอัด ด้วยเหตุนี้ยางมะตอยผสมฝุ่น(แอสฟัลท์มาสต์ิก) จึงจำเป็นในการศึกษาเพื่อหาค่าความหนืดที่เหมาะสมและได้ประสิทธิภาพที่ดี

ในปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์หลากหลายชนิดมาผสมกับยางมะตอย เพื่อให้มีความยืดหยุ่น มีความเหนียวและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำไปใช้ก่อนสร้างผิวทางจะได้ไม่แข็งเปราะ มีความยืดหยุ่น เมื่อวิ่งรถผ่านมากๆไม่เกิดการหลุดตัวจนเป็นร่องถาวร ช่วยยืดอายุของถนน รวมถึงเป็นการพัฒนาการด้านวัสดุที่ดีมีประโยชน์และเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิจัยต่างๆ ที่พยายามพัฒนาวิธีการทดสอบหาคุณสมบัติการไหลและคุณสมบัติความคงทนของยางมะตอย เพื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของพอลิเมอร์ที่ผสมในยางมะตอยให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในขณะเดียวกันมีการใช้วัสดุเติมแต่งและวัสดุปรับสภาพผสมลงในยางมะตอย เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของมวลรวมและมีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้นในการก่อสร้างถนน โดยพบว่าส่วนผสมของมวลละเอียด(Filler) จะช่วยไปอุดช่องว่าง สามารถเพิ่มความหนืดและประสิทธิภาพของยางมะตอยได้เป็นอย่างดี

ด้วยเหตุผลนี้ผู้วิจัยจึงได้นำวัสดุธรรมชาติ ที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาทำให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้วัสดุนั้นๆ ซึ่งวัสดุที่นำมาวิจัยครั้งนี้คือ ถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วกลีบ ที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากการกระบวนการอุตสาหกรรมของปาล์มน้ำมันและข้าว สามารถหาได้โดยง่ายในประเทศไทย โดยการศึกษานี้จะนำทั้งถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วกลีบมาบดละเอียดในรูปของฝุ่น ที่ร่อนผ่านตะแกรง(Sieve) เบอร์ 200 แล้วนำไปกับยางมะตอยให้เป็นแอสฟัลท์มาสติก ซึ่งมีสมมติฐานว่ามีความเป็นไปได้ในการเพิ่มความหนืดและสามารถคงประสิทธิภาพของยางมะตอยได้ จึงนำมาซึ่งงานวิจัยการศึกษาผลกระทบจากการใช้ฝุ่นธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของแอสฟัลท์คอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการใช้ฝุ่นถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วกลีบที่มีผลต่อการทำงานของแอสฟัลท์คอนกรีต
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการที่นำถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วกลีบมาใช้แทนหินฝุ่นแกรนิตและหินปูน
3. เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วกลีบ
4. เพื่อศึกษาผลของความหนืดของแอสฟัลท์มาสติกต่อเสถียรภาพและการไหล

1.3 สมมติฐาน

1. การใช้ฝุ่นจากถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วกลีบ สามารถช่วยเพิ่มความหนืดและประสิทธิภาพได้เมื่อนำมาผสมกับแอสฟัลท์

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาเฉพาะยางมะตอยชนิด AC 60-70 เท่านั้น
2. ศึกษาเฉพาะมวลรวมที่เป็นหินปูนเท่านั้น
3. ถั่วปาล์มน้ำมัน ถั่วกลีบ ยางมะตอย และมวลรวมที่นำมาทดสอบมาจากประเทศไทยเท่านั้น
4. ทดสอบความหนืดในห้องปฏิบัติการ
5. ทดสอบเสถียรภาพและการไหลโดยใช้เครื่อง Marshall stability test

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ฝุ่นจากถั่วปาล์มน้ำมันและถั่วกลีบ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแอสฟัลท์คอนกรีต
2. สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรของปาล์มน้ำมันและกลีบ

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 แอสฟัลท์คอนกรีต (Asphalt Concrete)

แอสฟัลท์คอนกรีต คือ วัสดุที่เกิดจากส่วนผสมกันระหว่างแอสฟัลท์หรือยางมะตอยกับมวลรวมในอัตราส่วนและอุณหภูมิที่เหมาะสม หรือที่ออกแบบไว้ตามกำหนด เพื่อใช้ในงานก่อสร้างผิวทาง ซ่อมผิวถนน เป็นต้น ซึ่งก็มีวิธีประยุกต์ใช้หลายวิธีกันไป

2.1.1 มวลรวม (Aggregate)

มวลรวม มี 2 ชนิด คือ มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) และในกรณีที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลท์คอนกรีต อาจเพิ่มฝุ่นหิน (Mineral Filler) ได้เช่นกัน โดยมาตรฐานของกรมทางหลวง (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/2532) กำหนด ขนาดคละ (Gradation) ของมวลรวมดังนี้ มวลรวมหยาบ หมายถึง ส่วนของหินที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 ที่มีขนาดรูกรอง 4.75 มิลลิเมตร ขึ้นไปจนถึงขนาดที่ออกแบบ และมวลรวมละเอียด หมายถึง ส่วนที่ ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ไปจนถึงส่วนที่เป็นฝุ่น หรือทรายที่สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอมปนเปื้อนและจาก มาตรฐานของกรมทางหลวง ขนาดคละของมวลรวมและแอสฟัลท์ต้องมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 ขนาดคละของมวลรวม และปริมาณของแอสฟัลท์ที่ใช้ (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/2532)

ขนาดที่ใช้เรียก มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19.0 (3/4)	25.0 (1)
สำหรับชั้นทาง	Wearing Course		Binder Course	Base Course
ความหนา มิลลิเมตร	25-35	40-70	40-80	70-100
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)	ปริมาณผ่านตะแกรง (ร้อยละโดยมวล)			
37.5 (1½)				100
25.0 (1)			100	90-100
19.0 (3/4)		100	90-100	-
12.5 (1/2)	100	80-100	-	56-80
9.5 (3/8)	90-100	-	56-80	-
4.75 (เบอร์ 4)	55-85	44-74	35-65	29-59
2.36 (เบอร์ 8)	32-67	28-58	23-49	19-45
1.18 (เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600 (เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300 (เบอร์ 50)	7-23	5-21	5-19	5-17
0.150 (เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075 (เบอร์ 200)	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลท์ ร้อยละโดยมวลของมวลรวม	4.0-8.0	3.0-7.0	3.0-6.5	3.0-6.0

2.1.2 แอสฟัลท์ (Asphalt)

Asphalt สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้

2.1.2.1 Asphalt Cement

ซีเมนต์ เป็นยางมะตอยแท้ที่เป็นพื้นฐานของยางมะตอยอีกสองชนิดผลิต ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ มีลักษณะ เป็นสีดำหรือสีน้ำตาลปนดำ มีลักษณะเป็นกึ่งของแข็ง ประกอบด้วยบิทูเมนเป็นหลักสามารถหลอมเหลวเมื่อ ได้รับความร้อน ซึ่งก่อนใช้ต้องผ่านความร้อน ประมาณ 140-150 องศาเซลเซียสก่อน เมื่อแห้งจะแข็งทำให้ เป็นวัสดุประสาน และยึดเกาะวัสดุต่างๆ ได้ดี แบ่งเป็นเกรดต่างๆ ตามค่าเพนิเทรชันเป็น 5 เกรด คือ 40-50, 60-70, 80-100, 120-150 และ 200-300 โดยเกรดที่มีค่าตัวเลขมากจะแสดงถึงความอ่อนของยางมะตอยที่ มากด้วย ซึ่งเกรด 200- 300 จะอ่อนที่สุด โดยที่อุณหภูมิห้องเมื่อนำมาอัดเบาๆจะเกิดรอบบวมได้ง่าย ส่วนเกรด 40-50 เป็น เกรดที่แข็งที่สุด ต้องใช้แรงกดเพิ่มขึ้นจึงจะทำให้เกิดรอย นอกจากนั้น แอสฟัลท์ซีเมนต์ ยังแบ่ง ออกเป็น 3 เกรด คือ

1. เกรดเพนิเทรชัน (Penetration grade) ได้แก่ AC 60/70 (AC หมายถึงยางมะ ตอย ซีเมนต์ และ 60/70 หมายถึง ค่าเพนิเทรชันที่อยู่ในช่วง 60-70 คือเข็มกดลงได้ 6-7 มิลลิเมตร)
2. เกรดเป่า (Blown grade) คือ ยางมะตอยที่ได้จากการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปเป่าที่ความร้อน 250-300 องศาเซลเซียส จนยางมะตอยมีปริมาณของ Asphaltances เพิ่มขึ้น ทำให้มีความแข็ง และทนความร้อนได้ดีขึ้น ยางมะตอยเกรดนี้ ได้แก่ R 85/25, R 85/40, R 115/15, R 138/10 และ R 155/7 เป็นต้น (R หมายถึง คุณสมบัติคล้ายยาง, ตัวเลขด้านหน้า หมายถึง อุณหภูมิของยางมะตอยที่จุดอ่อนตัว และ ตัวเลข ด้านหลัง หมายถึง ค่าเพนิเทรชันเฉลี่ยของยางมะตอย)
3. เกรดแข็ง (Hard grade) คือ ยางมะตอยที่ได้จากการนำยางมะตอยเกรดเพนิเทรชันไปกลั่นในระบบ สูญญากาศที่อุณหภูมิสูง ทำให้ยางมะตอยมีความแข็งมากขึ้น เกรดยางมะตอยชนิด นี้ ได้แก่ H 80/90 (H หมายถึง ยางมะตอยที่มีความแข็งสูง, ตัวเลขด้านหน้า หมายถึง อุณหภูมิของ ยางมะตอยที่จุดอ่อนตัว และ ตัวเลขด้านหลัง หมายถึง ค่าเพนิเทรชันของยางมะตอย)

2.1.2.2 Asphalt Emulsion

แอสฟัลต์อิมัลชัน หรือ ยางมะตอยน้ำ เป็นยางมะตอยที่เกิดจากการผสมระหว่าง แอสฟัลต์ซีเมนต์กับ น้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ด้วยการเติมสารอิมัลซิไฟด์เพื่อให้ยางมะตอยสามารถรวมตัวกับน้ำได้ดี ซึ่ง จะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์แตกตัวกระจายออกในรูปของหยดขนาดเล็กผสมกับน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปแอสฟัลต์อิมัลชัน จะประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ 55-75% สารอิมัลซิไฟด์ 3% และส่วนที่เหลือจะเป็นน้ำ 22-42% แต่ทั้งนี้ อาจมีการเพิ่มสารอื่นๆด้วย เช่น สารเพิ่มความเสถียร สารป้องกันการหลุดลอก สารบำรุงการเคลือบ เป็นต้น ยางมะตอยชนิดนี้เมื่อใช้งานน้ำจะระเหยออกไป และเกิดการรวมตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นของแข็งยึดเกาะ วัสดุ

ชนิดของแอสฟัลต์อิมัลชัน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดประจุบวก เหมาะสมหรับใช้งานกับวัสดุประเภทหินแกรนิต หินปูน
2. ชนิดประจุลบ เหมาะสมหรับใช้งานกับวัสดุประเภทหินทรายสำหรับเกรดของยางมะตอย

ชนิดนี้ แบ่งเป็น 3 เกรด คือ

1. เกรดแตกตัวเร็ว (Rapid Setting) ได้แก่ CRS 1, CRS 2
2. เกรดแตกตัวเร็วปานกลาง (Medium Setting) ได้แก่ CMS 2, CMS 2h
3. เกรดแตกตัวเร็วช้า (Slow Setting) ได้แก่ CSS 1, CSS 1h

2.1.2.3 Cut-back Asphalt

คัทแบคแอสฟัลต์ เป็นยางมะตอยที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์กับตัวทำละลาย เพื่อลดความหนืดและสะดวกต่อการใช้งานโดยไม่ต้องผ่านความร้อน เมื่อตัวทำละลายระเหย ไปจะทำให้ยางมะตอยมีเนื้อแข็งขึ้น ทำหน้าที่ประสานวัสดุต่างให้ยึดเกาะกันแน่น โดยยางมะตอยชนิด นี้จะแบ่งเป็นเกรดต่างๆตามสัดส่วน และชนิดของตัวทำละลาย เช่น ชนิด RC ใช้แก๊สโซลีนเป็นตัวทำละลาย ชนิด MC ใช้คีโรซีนเป็นตัวทำละลาย สำหรับเกรดของยางมะตอยชนิดนี้ แบ่งเป็น 3 เกรด คือ

1. เกรดระเหยไว (Rapid Curing) ได้แก่ RC 70, RC 250, RC 800
2. เกรดระเหยปานกลาง (Medium Curing) ได้แก่ MC 30, MC 70, MC 3000
3. เกรดระเหยช้า (Slow Curing) ได้แก่ SC 70, SC 800
4. โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ (PMA)

2.1.2.4 Polymer Modified Asphalt (PMA)

Polymer Modified Asphalt (PMA) คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติหรือยางพารา ยางสังเคราะห์ เช่น SBS EVA กับ Additive ในสัดส่วนที่พอเหมาะผิวทาง ที่ผสมโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์จะมีความแข็งแรงและทนทานกว่าผิวทางที่ใช้แอสฟัลต์ ซีเมนต์แบบธรรมดา โดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 2156/2547 และ ทล.-ก. 408/2536 ดังนี้

1. ความต้านทานต่อความล้า (Fatigue) สูง
2. ความต้านทานสูงต่อการเสียรูปอย่างถาวรของถนน (Pavement Deformation)
3. ความยืดหยุ่น (Elastic Recovery) สูง
4. แรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) ระหว่างวัสดุรวมกับแอสฟัลต์สูง ลดปัญหาผิวหน้าหลุด

เป็นข้าวตัง (Reveling)

5. ความต้านทานต่อการหลุดลอก (Stripping) ที่ดีกว่า
6. ความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ลดปัญหาการไหลเอิ้ม (Bleeding)

2.2 แอสฟัลท์มาستيك (Asphalt mastics)

2.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของแอสฟัลท์มาستيك

วัสดุฟิลเลอร์และ Asphalt Binders มีหลากหลายชนิด ชนิดของ Binder ที่กำหนดมาจะเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันไปตามชนิดของ Fillers ที่ใช้ ดังนั้นคุณสมบัติของ Mastic ขึ้นอยู่กับการรวมกันของ Filler และ Binder Wang et al (2011) ทำการทดลองขึ้นมาชุดหนึ่งเพื่อวัดว่าคุณสมบัติ โหนของ Filler ส่งผลต่อ Mastic มากที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้คือ Rigden voids มีอิทธิพลต่อการแข็งตัวโดยใช้ Filler ใน Mastic และแนวโน้มที่จะเกิดการทรุดตัวเป็นร่องในสารผสม ปริมาณ CaO และดัชนี ความละเอียด (The Fineness modulus :FM) ส่งผลต่อการแข็งตัวด้วยเช่นกัน แต่ในระดับที่น้อยกว่า Rigden voids ความหนืดสัมพัทธ์ของ binder มีผลต่อแนวโน้มที่จะเกิดการทรุดตัวเป็นร่องมากที่สุด ผลกระทบนี้ที่คุณสมบัติของ Filler มีต่อ Mastic นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของ Binder และการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ของส่วนผสมคอนกรีตหยาบ (Wang et al, 2011).

เปอร์เซ็นต์ของ Filler ใน Asphalt Mastics อยู่ใน Norwegian Standards หรือก็คือการทำงานของน้ำหนักรของส่วนผสมคอนกรีตในสารผสม (NPRA N200). อัตราส่วนของ Filler ต่อ Binder (F/A-ratio) มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของ Mastic น้ำหนักก่อนวัดของ Filler เนื่องจากความหลากหลายของความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของวัสดุฟิลเลอร์ น้ำหนักก่อนศึกษาอัตราส่วนระหว่าง Filler และ Binder อาจทำให้เกิดผลความแตกต่างทางปริมาตรอย่างมหาศาลซึ่งขึ้นอยู่กับ ชนิดของ Filler ที่ใช้ใน Mastic หากว่าความหนาแน่นของ Filler ต่ำ ปริมาตรของ Filler จะสูงเมื่อ น้ำหนักของ Filler คงที่ และจำเป็นต้องใช้ Binder เพื่อเคลือบวัสดุฟิลเลอร์มากขึ้นอีกด้วย การเพิ่มของปริมาณสัมพัทธ์ของ Fixed Binder ส่งผลให้เกิด Free Binder น้อยลง ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็น Dry Asphalt Mastic และการเคลือบที่ไม่เพียงพอต่ออนุภาคเล็กที่รวมตัวกัน (Faheem and Bahia, 2010). เกณฑ์ของ Superpave กำหนดไว้ว่าอัตราส่วนของ Filler และ Binder โดยมวลคือ 0.6 ถึง 1.2 ใน สารผสม Asphalt ซึ่งปริมาณของ Binder จะต้องเป็น Free Binder ที่ไม่ได้ดูดซับโดยส่วนผสม คอนกรีตของสารผสม (AASHTO R35). Norwegian standards ไม่ได้กำหนดอัตราส่วนของ Filler และ Binder หรือคุณสมบัติของ Filler ที่เกินขอบเขตของเปอร์เซ็นต์มวลหรือขอบเขตโดยทั่วไปของ Rigden Voids

Filler ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมกำลังให้กับ Binder และกลไกการเสริมกำลังนี้สามารถแยกออกเป็นการเสริมกำลังแบบเหนียวน้ำ โดย Particle-interaction volume-Filling และ Physiochemical properties ของ Filler (Buttlar et al, 1999). การเสริมกำลังแบบ Particle-interaction จะเพิ่มปริมาตร Filler ในขณะที่วัสดุฟิลเลอร์เข้าใกล้และเริ่มสร้างโครงร่าง การแข็งตัวที่เกิดจาก Volume-Filling คือผลลัพธ์ของวัสดุฟิลเลอร์ที่มีชนิดแข็งมากกว่าที่จะเป็น Mastic ชนิดแข็ง ทำให้มีความหนาแน่นมากขึ้น การเสริมกำลังแบบ physiochemical ที่ให้ผลเป็นความแข็งนั้นเกิด จากพันธะการยึดเหนี่ยวระหว่าง Asphalt Binder และ Filler

เช่น การดูดซับ การดูดซึม และการดูดซับแบบคัดเลือก (Buttler et al, 1999). ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเสริมกำลังแบบ Physiochemical คือส่วนประกอบแร่ธาตุ ลักษณะเนื้อผิว การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิว และลักษณะโครงสร้าง ขั้นตอนการดูดซึมมีการคายพลังงานออกมา และปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจาก ปฏิกิริยา Filler-bitumen บ่งชี้ถึงความเข้มข้นในการดูดซับ (Anderson and Goetz, 1973).

Ishai and Craus (1996) ทำการทดลองเรื่องการดูดซับชุดหนึ่งโดยใช้ Microcalorimeter วัดปริมาณ ของความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาเพื่อคัดเลือก Filler ขนาด 5.0 grams ของยางมะตอยที่ เจือจางแล้วถูกเทลง ไปในข้าวเซลล์ที่แตกต่างกันสอง Cells 1.0 gram ของ Dry Filler ถูกวางลงใน Glass Ampule ในขณะที่อีก Glass Ampule หนึ่งไม่ใส่ Dry Filler ข้าวเซลล์และ Glass Ampules ทั้งสองถูกวางลงใน Microcalorimeter ที่ อุณหภูมิ 35 องศา หลังจาก 24 ชั่วโมง Glass Ampules ทั้งสอง แยกภายในข้าวเซลล์, และ Filler ใน Ampules แรกจมิดใน Binder ความแตกต่างในการปล่อยความร้อนจากทั้งสองข้าวถูกนำมาวัด จาก การศึกษาพบว่า Filler ที่มีค่าการปล่อยความร้อนสูงสุดต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยเช่น การผสมผสานระหว่างความไม่ สม่าเสมอด้าน Geometric และมีปฏิกิริยาบนพื้นผิวที่ มากทำให้พันธะของ Filler-binder แข็งแรงขึ้นและ อัตราส่วนของ Fixed Binder ต่อ Free Binder เพิ่มขึ้น ผลของ Physiochemical ทำให้เกิดความหนืดแน่น ของ Mastic มากขึ้นและความแข็งแรงที่เพิ่มมากกว่าชั้นของสารผสม asphalt ปูนขาวมีค่าการปล่อยความร้อนมากที่สุดต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย รองลงมาเป็นหินปูนและโดโลไมต์ หินบะซอล และหินทรายให้ค่าในการ ทดสอบ Fillers ต่ำที่สุด (Ishai and Craus, 1996).

Craus et al (1979) ทำการทดลองเกี่ยวกับการดูดซับแบบคัดเลือกของสารประกอบใน Binder ใน วัสดุฟิลเลอร์ ใช้วิธีโครมาโทกราฟี เพื่อวัดการไหลซึมของยางมะตอยแบบเจือจางผ่าน คอลลิมน์ของ Filler ต่างชนิดกัน ผลลัพธ์ที่ได้คือหินปูนและปูนขาวมีการดูดซับแบบคัดเลือกมากที่สุด ตามด้วยหินบะซอล ในขณะที่ หินทรายแทบจะไม่มีคุณสมบัติในการดูดซับเลย Siliceous Filler มีการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวต่ำ ดังนั้นความ เข้มข้นในการดูดซับจึงต่ำลงไปด้วย ความสามารถในการดูดซับ แบบคัดเลือกบ่งชี้ถึง Filler Effect ในการยึด เหนียวและความเสถียรของสารผสม Asphalt (Craus et al, 1979).

คุณสมบัติอีกอย่างของ Mastic ที่ได้รับอิทธิพลมาจากชนิดของ Filler คือ Creep Compliance ที่ไม่ สามารถย้อนกลับได้ J_{nr} ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนรูปร่างโดยถาวรของ Mastics ระหว่างมีการเติม Filler ชนิดต่างๆ ลงไป อัตราส่วน J_{nr} ของ Mastic ต่อ Binder Points ส่งผลต่อความแข็งแรงของ Filler ใน Mastic J_{nr} ถูกวัดโดย Dynamic Shear Rheometer (DSR) ในแบบทดสอบ การกระทำซ้ำของแรงเค้น The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) การทดสอบเป็นส่วน หนึ่งของ Superpave Performance Grading Asphalt Binder Specification แต่ก็มีมีการนำมาใช้ วัด Mastics ด้วย (Wang et al, 2011). จุดประสงค์ของ วิธีนี้คือระบุ Elastic response ภายใต้ Shear creep และ Recovery at two stress levels ณ อุณหภูมิห้อง

ตัวอย่างหนึ่งของ Asphalt mastics ที่มีค่ามีการครีพที่มีค่าความเครียดอยู่ที่ 0.1 kPa เป็นเวลา 1 วินาที และ 9 วินาทีของ Unloaded recovery ความเค้นและความเครียดถูกบันทึกทุก ๆ 0.1 วินาทีของรอบการครีพ และ 0.45 วินาทีของรอบ Recovery กระบวนการต้องทำซ้ำสี่ครั้งแล้วตามด้วยกระบวนการเดิมแต่ใช้ 3.2 kPa Creep stress (ASTM D7405:10a). ความเค้นที่เปลี่ยนไปหลัง recovery cycle แต่ละครั้งจะถูก คำนวณ โดยใช้สมการที่ (2.1)

$$\epsilon_{10} = \epsilon_r - \epsilon_0 \quad (2.1)$$

เมื่อ ϵ_{10} = ความเค้นที่เปลี่ยนไปหลัง Recovery cycle แต่ละครั้ง

ϵ_r = ค่าความเค้นครั้งสุดท้ายหลัง Recovery cycle แต่ละครั้ง

ϵ_0 = ค่าความเค้นเริ่มต้น

ในสปีรอบการทดสอบ แต่ละรอบค่าของ Creep stress ของ 0.1 kPa และ 3.2 kPa และ Creep compliance ที่ไม่สามารถย้อนกลับได้จะหาค่าได้จากสมการ (2.2), โดย N = 1 ถึง 10:

$$J_{nr}(i, N) = \frac{\epsilon_{10}}{100} \quad (2.2)$$

เมื่อ J_{nr} = Creep compliance ที่ไม่สามารถย้อนกลับได้

i = Creep stress ของ 0.1 kPa และ 3.2 kPa

N = จำนวนรอบ

ϵ_{10} = ความเค้นที่เปลี่ยนไปหลังรอบ Recovery แต่ละรอบ

แบบทดสอบนี้จัดทำขึ้นเพื่อ Binder และ Mastic และ J_{nr} ที่ได้กล่าวไปของ Mastic คือ อัตราส่วนของสองค่า Wang et al (2011) แสดงให้เห็นว่า SBS Modified binder มีปฏิกิริยาต่อ Fillers ที่ถูกทดสอบมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีการผันแปรอย่างของ Binders ที่สามารถบ่งชี้ถึง ปฏิกิริยา Physiochemical ที่ขึ้นอยู่กับการรวมตัวกันของ Filler และ Binder ปริมาณของ Rigden void ใน Fillers สร้างผลอย่างมีนัยยะต่อ J_{nr} ที่กล่าวไปโดยไม่คำนึงถึงชนิดของ binder ที่ใช้ใน Mastic (Wang et al, 2011). Faheem et al (2012) พบว่า Negative relationship ระหว่าง Rigden voids และ Mastic J_{nr} บ่งบอกถึงการเพิ่มของ Mastic J_{nr} ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้เกิดการลดลงของการทรุดตัวเป็นร่อง นี่เป็นตัวบ่งชี้ว่า Binders ที่มี J_{nr} ต่ำ หรือ Filler ที่มีปริมาณ Rigden void มากจะมีโอกาสเสี่ยงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรของ Mastic ได้

The DSR apparatus สามารถใช้เพื่อวัดค่า Complex shear modulus G^* สำหรับ Binder เช่นเดียวกันกับ Asphalt mastics ค่าที่วัดออกมาได้คือค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปแบบอีลาสติกและพลาสติกเมื่อ Mastic เจอกับความเค้นเฉือนหลายๆ ครั้ง มุมเฟส δ คือการวัด Elastic response ของวัสดุ และบ่งบอกถึง Stress response ที่อ่อนลงต่อ Applied strain purely viscous materials มีมุมเฟสอยู่ที่ 90 องศา ในขณะที่ Purely elastic materials มุมเฟสจะอยู่ที่ 0 องศา (LerFald, 2000). The parameter $G^*/\sin\delta$ มีความเกี่ยวข้องกับการทรุดตัวเป็นร่อง และ $G^*\sin\delta$ แสดงถึงแนวโน้มที่จะเกิดการรอยแตกจากการเสื่อมสภาพในอนาคต (Huang, 2004). Pasetto et al (2014). ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติหุ่ยนหินดีเพื่อนำไปทดสอบ DSR ใน Mastics ด้วย อัตราส่วน F/A ที่ต่างออกไป จากปริมาณของ Filler ใน Mastic ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ The complex shear modulus และมุมเฟสเพิ่มขึ้นด้วย ความแข็งของ Mastic มีค่ามากกว่าสิบเท่า สำหรับ Mastics ที่ บรรจุ Filler ไว้ 100% จากน้ำหนักของ Mastic เมื่อเทียบกับความแข็งของ Neat binder สองขนาด ของ Spindle ถูกใช้เพื่อลดปัญหา Spindle compliance (Pasetto et al, 2014). Yan et al (2013) ทดลอง mix asphalt อุ่นแล้วด้วน The purpose of relating G^* ต่ออัตราส่วน F/A ใน 9 Asphalt mastics มีการทดสอบ DSR ด้วยแปดอัตราส่วน F/A กับ Sasobit modified binder และ สามชนิดของ Filler เช่น หินปูน ปูนขาว และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลลัพธ์ที่ได้คือหากอัตราส่วน F/A สูง the G^* จะสูงตามไปด้วย Mastics ที่บรรจุปูนขาวจะทำให้เกิด G^* สูงสุด ตามด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และหินปูน

ปริมาณ Rigden void ในวัสดุฟิลเลอร์คือหัวข้อที่น่าสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากมันมีอิทธิพล อย่างมาก ต่อคุณสมบัติเชิงรีโอโลยีของ Mastic (Liao et al, 2012). Mastic ถือเป็นสารแขวนลอย ของของแข็งในของเหลวหรือก็คืออนุภาคของ Filler ในยางมะตอยนั่นเอง และโมเดลรีโอโลยีสามารถ นำไปใช้เพื่อหาค่าความหนืดของ Mastic ความหนืดของ Asphalt mastics ส่งผลกระทบต่อโอกาสใน การเคลือบส่วนผสมคอนกรีตอย่างทั่วถึงเช่นเดียวกันกับการใช้งานและความเข้ากันได้ การที่เราสามารถคาดเดาค่าของความหนืดได้นั้นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนืดนั้นหลากหลายแตกต่างกันไป ตามชนิดของ Binder Filler และการเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิว และความหนืดจะเพิ่มขึ้นด้วย อัตราส่วน F/A ที่เพิ่มขึ้น (Liao et al, 2012). Faheem et al (2012). พบว่า Rigden voids และ ความหนืดของ Binder คือตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของ Mastic ถ้าหนึ่งหรือสองของความหนืดของ Binder และปริมาณของ Rigden voids เพิ่มขึ้น ความหนืดของ Mastic ที่กล่าวและความแข็งก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

โมเดลแรกที่อยู่ถึงพฤติกรรมรีโอโลยีถูกเสนอโดย Albert Einstein ในปี 1905 (Einstein, 1905). ทฤษฎีของเขาถือว่าความหนืดสัมพันธ์ถูกกล่าวถึง และมันคือการเพิ่มขึ้นของความหนืด ในสารแขวนลอยตามอัตราส่วนของความหนืดในของเหลว ความเข้มข้นของอนุภาคใน Filler อยู่ใน สมการของอัตราส่วนของขนาดของอนุภาคต่อปริมาณของสารแขวนลอย ในกรณีนี้คือปริมาณของ Filler ต่อปริมาณของ Mastic โมเดลของ Einstein คาดการณ์เอาไว้ว่าหากความเข้มข้นของอนุภาค ต่ำซึ่งเป็นจุดที่ Filler จะอยู่ห่างจากกันมาก

พอที่จะไม่ทำให้อนุภาคใดเกิดปฏิกิริยาได้ (Shashidhar and Romero, 1998; Hesami et al, 2012). สมการ (2.3) แสดงสมการของ Einstein (2.3)

$$\eta_r = 1 + \eta' \phi \quad (2.3)$$

เมื่อ η_r = ความหนืดสัมพัทธ์ของสารแขวนลอย

η' = ความหนืดภายใน

ϕ = ความเข้มข้นของอนุภาค Filler 10

ค่าความหนืดภายในของ asphalt mastic มีความเกี่ยวข้องกับรูปทรงอนุภาคของ Filler และคุณสมบัติทางกายภาพ เช่นเดียวกันกับการรวมตัวของชนิดของ Filler และชนิดของ Binder (Leseur, 2009). หรือสามารถมองเป็น A curve Fitting parameter ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุด (Hesami et al, 2012). ความสัมพันธ์นี้แสดงในสมการ (2.4)

$$\eta' = \frac{2}{\phi_m} \quad (2.4)$$

เมื่อ η' = ความหนืดภายใน

ϕ_m = ค่าความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุดต่อปริมาตร

ค่าความหนืดภายในหรือที่รู้จักกันในชื่อ ค่าสัมประสิทธิ์ Einstein (the Einstein coefficient KE) จะต้องเป็น 2.5 ของอนุภาคทรงกลม (Einstein, 1905). Shashidhar and Romero (1998) นิยาม ค่าสัมประสิทธิ์ ว่าเป็นอัตราการแข่งขันของ Mastic เป็นฟังก์ชันของการเพิ่ม Filler เข้าไป ที่มาก ไปกว่านั้นคือความเข้มข้นของอนุภาคหารด้วยปริมาตรสูงสุด ϕ_m ใน Asphalt mastics คือปริมาณ ของ Filler ที่มากที่สุดที่จะใส่เพิ่มเข้าไปได้โดยไม่ทำให้เกิด Air voids ใน Mastic Asphalt mastic ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุดจะไม่มี Free binder เลย (Shashidhar and Romero, 1998). เกี่ยว เนื่องมาจากผลในการเสริมกำลังของ Filler ใน Mastics ความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุดช่วยเรื่องการ แข็งตัว แบบ Volume-Filling The Einstein coefficient แสดงให้เห็นถึง Physiochemical reinforcement (Shashidhar and Romero, 1998). ความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุดในตัวอย่างของ Mastics ที่แห้งและอัดแน่นอยู่ในสมการที่ (2.5)

$$\phi_m = \frac{V_f}{V_f + V_{b.fixed}} = \frac{V_f}{V_{f.bulk}} \quad (2.5)$$

เมื่อ ϕ_m = ความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุด

V_f = ปริมาตร Filler

$V_{b,Fixed}$ = Fixed binder volume

$V_{F,bulk}$ = Filler bulk volume

ดังที่กล่าวไปในข้างต้น บางส่วนของ Fixed binder volume ถูกเกาะติดโดย Filler และทำ ตัวเป็นส่วนหนึ่งของอนุภาค ซึ่งทำให้อนุภาคของ Filler มีรัศมีที่กว้างขึ้นเล็กน้อย The effective radius ของอนุภาค Filler คือรัศมีที่ Filler ไปเพิ่มความหนาของ Binder ที่เคลือบอนุภาคอยู่ด้วยเหตุผลนั่นเอง The effective Filler volume ใน Mastic มีปริมาณมากกว่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรก่อนวัดของ Filler ที่ใส่เพิ่มเข้าไปใน Mastic (Liao et al, 2012). The compositional Filler volume concentration แสดงโดยสมการ (2.6) และ The effective Filler volume ในสมการ (2.7) และ (2.8). ความสัมพันธ์แสดงในรูปภาพที่ 2.2

$$\phi = \frac{V_f}{V_f + V_{b,fixed} + V_{b,free}} = \frac{V_f}{V_{f,bulk} + V_{b,free}} \quad (2.6)$$

$$\phi = 1 - \frac{V_R}{100} \quad (2.7)$$

$$\phi = \frac{\phi}{\phi_m} \quad (2.8)$$

เมื่อ ϕ = ความเข้มข้นของอนุภาค Filler

V_f = ปริมาตร Filler

$V_{b,Fixed}$ = Fixed binder volume

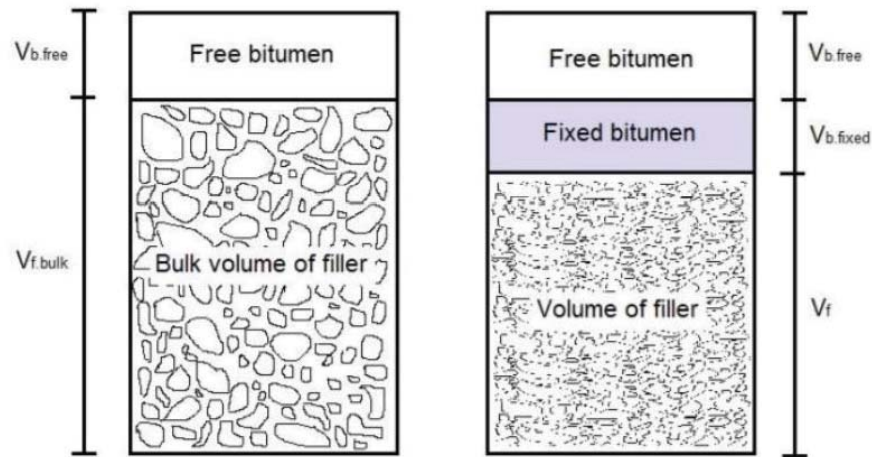
$V_{b,Free}$ = Free binder volume

$V_{F,bulk}$ = Filler bulk volume

ϕ_m = ความเข้มข้นของอนุภาคสูงสุด

V_R = Rigden void content (%)

ϕ_e = Effective particle concentration



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงปริมาณส่วนประกอบของ Asphalt Mixture

The effective particle concentration ถูกจำกัดความเอาไว้ว่าเป็นความเข้มข้นของ Filler ใน Mastic ที่ทำให้เกิดความแข็งเดียวกันแต่ใช้ Filler ต่างชนิดกัน (LerFald, 2000). งานวิจัยของ LerFald ปี 2000 กล่าวไว้ว่ามีความหลากหลายใน The effective particle concentrations สำหรับชนิดของ Filler ใช้ใน Mastics ผลลัพธ์ที่คล้ายกันถูกพบโดย Buttlar et al (1999) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสอง Mastic ที่มี Filler volume concentrations ต่างกันอย่างมาอาจทำให้เกิดค่า Effective volume concentrations และ Equivalent stiffening ratios ใกล้เคียงกันได้ Different effective volume concentration ที่ต่างกัน เกิดจากความจริงที่ว่า Filler ต่างชนิดกันมีคุณสมบัติในการดูดซับกัน ปริมาณ Rigden void บริเวณพื้นผิว และลักษณะพื้นผิว (Buttlar et al, 1999).

Shashidhar and Romero (1998) กล่าวไว้ว่าหากการดูดซับของ Binder ทำได้มากจะทำให้เกิด The actual particle concentration ϕ เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น The effective particle concentration จึงเพิ่มดังสมการ (2.8) ดังตาราง 2.1 ข้างล่าง ตัวอย่างพอสังเขปของมวล Filler ที่ใช้ทดลอง กับปูนขาว หินปูน และ Two baghouse dusts ที่จะทำให้เกิด Effective volume concentrations 3 แบบคล้ายกันใน Soft binder mastic จากการศึกษาของ LerFald (2000). ตัวเลขในตารางแสดงถึงความแตกต่างระหว่างหินปูน และ Filler ชนิดอื่นที่ถูกทดสอบ และระหว่าง The sieved baghouse dusts ตารางที่ 2.2 มวลของฟิลเลอร์สำหรับความเข้มข้นของอนุภาคที่ส่งผลใกล้เคียงกัน (LerFald, 2000)

Filler type, mass (g)	$\varphi_e = 0.1$	$\varphi_e = 0.3$	$\varphi_e = 0.6$
Hydrated lime	6.1	19.8	45.8
Limestone	13.1	47.0	123.0
Sieved baghouse dust, Lia	11.5	38.2	100.4
Sieved baghouse dust, Tau	12.4	42.4	110.8

The eFFective radius และปริมาณของอนุภาค Filler ส่งผลต่อความหนืด Einstein โมเดล เกี่ยวกับความหนืดของสารแขวนลอยตั้งสันนิษฐานไว้ว่าไม่มีปฏิริยาระดับอนุภาคระหว่าง Fillers ภายใน Mastic โมเดลนี้จะต้องถูกดัดแปลงเพื่อรองรับความเข้มข้นของอนุภาคที่มากขึ้นซึ่งเป็นจุดที่ อนุภาคใน Filler จะทำปฏิริยากันมีทฤษฎีศึกษาเพิ่มเติมมากมายเกี่ยวกับความหนืดของสารแขวนลอยที่มีเปอร์เซ็นต์อนุภาคสูง ที่ถูกเสนอขึ้นมา และ เน้นถึง Frankel โมเดลว่าเป็น โมเดลที่เหมาะสมสำหรับ Asphalt mastics สมการของ ทฤษฎี Frankel อยู่ในสมการ (2.9)

$$\eta_r = \left(\frac{\delta}{r} - \frac{h}{r} \right) \times N_C \times C_1 \quad (2.9)$$

เมื่อ η_r = ความหนืดสัมพัทธ์ในสารแขวนลอย

r = Weighted average particle radius

δ = ความหนาของชั้น Binder หลังดูดซับแล้ว

h = ระยะห่างระหว่าง Two eFFective particles

C_1 = สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานของระบบ

N_C = จำนวนของอนุภาค

ค่าความหนาของชั้น Binder หลังดูดซับแล้วหาได้จากสมการ (2.10) ของ Buttlar et al (1999) ในขณะที่ระยะห่างระหว่าง Two eFFective particles หาได้จากสมการ (2.11) ของ Coussot (2005)

$$\delta = \left(\frac{\phi_e - \phi}{\phi G_m A} \right) \quad (2.10)$$

$$h = 2r \left(\phi_e^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ δ = ความหนาของชั้น Binder หลังดูดซับแล้ว

ϕ_e = eFFective particle concentration

ϕ = ความเข้มข้นอนุภาคของ Filler

ϕ_m = ความเข้มข้นอนุภาคสูงสุด

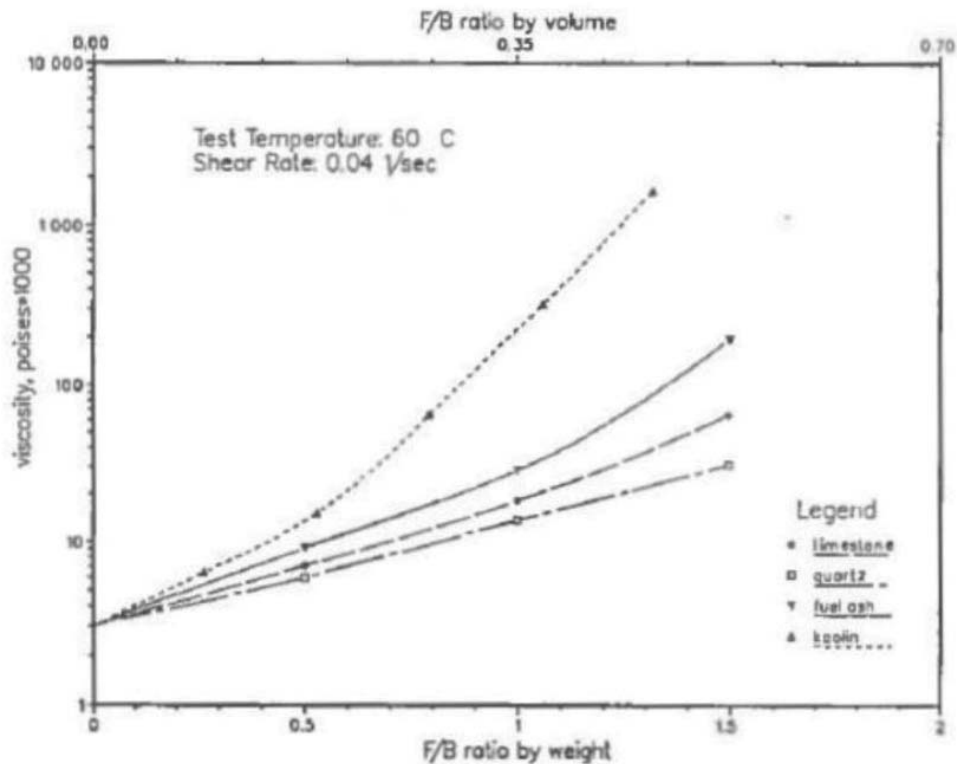
G_m = ความถ่วงจำเพาะของ Iller

A = พื้นที่ผิวต่อน้ำหนักของอนุภาค Filler

r = weighted average particle radius

ตามที่ Leseur and Little (1999) กล่าวไว้ในงานวิจัยของพวกเขาว่าการเปลี่ยนแปลงของ ความเข้มข้นอนุภาคสูงสุด ϕ_m ในชนิด Filler ต่างกันใน Viscoelastic models ถือเป็นสิ่งที่เน้นย้ำ Leseur and Little (1999). ให้ความสำคัญเรื่องที่ว่าความหนืดภายในหรือค่าสัมประสิทธิ์ Einstein KE คือฟังก์ชันของ ϕ_m ดังที่เห็นในสมการ (2.4) สำหรับปูนขาว $\phi_m = 0.2$ ในขณะที่ ค่าเฉลี่ยของ Filler ส่วนมากคือ 0.63 สิ่งนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ KE อย่างมาก ดังนั้น Viscosity model สำหรับ Mastic จึงมีความเกี่ยวข้องกับ Binder และ Filler ได้ วัสดุฟิลเลอร์ส่วนใหญ่มีรูปร่างต่างออกไปจากรูปร่างนี้ และ Leseur and Little (1999) กล่าวว่าอนุภาคแบนและรีด้วย อัตราส่วน Dimension 1:10 ทำให้ $KE = 13.6$ พวกเขาสรุปว่า องค์ประกอบที่เพิ่มเข้ามานอกจาก คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของวัสดุฟิลเลอร์สามารถยืนยันว่า Rheological Factors ใช้สำหรับการ เกิดปฏิกิริยาของ Filler-binder ใน Mastic ได้

ผลลัพธ์ที่คล้ายกันถูกค้นพบโดย Kavussi and Hicks (1997). Mastics จะมีความหนืดมากขึ้น ถ้า Filler ถูกเติมลงไปและลักษณะเฉพาะตัวนี้มีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับขนาดของอนุภาค ลำดับชั้น และพื้นผิวของ Filler อัตราการเพิ่มขึ้นมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นฟังก์ชันของความละเอียดของ Filler และ Surface affinity tests แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดสูงเป็นผลมาจากสภาพผุดกิ้นของ Filler ที่ สูง (Kavussi and Hicks, 1997). รูปภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในความหนืด Mastic จากอัตราส่วน F/A ต่อมวลและปริมาตร ดังรูปด้านล่าง The kaolin Filler ให้ค่าที่สูงกว่ามากจาก Filler ปูนขาวและควอร์ตซ์ Kavussi and Hicks (1997) เชื่อมโยงเรื่องนี้กับข้อเท็จจริงที่ว่า kaolin มีอนุภาคกลมและความละเอียดสูง ในขณะที่ควอร์ตซ์และปูนขาวมีความหยาบและอนุภาคเหลี่ยม



รูปที่ 2.2 ความหนืดของมาสติกแอสฟัลท์เปรียบเทียบกับอัตราส่วนของฝุ่นต่อแอสฟัลท์

(Kavussi and Hicks, 1997)

NCHRP Project 9-45 (2010) ทำแบบทดสอบโดยการใช้อัตราส่วน F/A ต่อมวล 1:1 เพื่อวัด การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของ Mastic การวิจัยนี้ใช้ Filler 17 ชนิดแตกต่างกันผสมกับ binder 4 ชนิด แตกต่างกันเพื่อสร้าง mastic ทั้ง 68 ชนิดแตกต่างกัน สัดส่วนโดยปริมาตรของ Filler ต่อ Mastic ผันแปรอยู่ที่ 26% และ 32% ทั้ง Filler แบบผลิตและ Filler แบบธรรมชาติถูกนำมาทดลองและ Filler แบบธรรมชาติมี สัดส่วนโดยปริมาตรโดยเฉลี่ย 28% อยู่ในช่วง $\pm 2\%$

Faheem and Bahia (2009) สรุปว่าเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของ Filler ต่ำกว่า 40% Rigden voids และการกระจายขนาดอนุภาคของ Filler จะมีอิทธิพลมากกว่าปริมาตรความเข้มข้น Rigden voids และสัดส่วนโดยปริมาตรมีส่วนเกี่ยวข้องกันใน Filler แบบธรรมชาติ และเมื่อสัดส่วน โดยปริมาตรมากจะทำให้ เกิด Rigden voids มากตามไปด้วย ค่าของ Fillers แบบผลิตนั้นไม่มีส่วน เกี่ยวข้องและกระจัดกระจาย Faheem and Bahia (2009) นำปริมาณของ Rigden void มารวมใน สมการเพื่อ Mixture performance ที่เพียงพอโดยยึดคุณสมบัติของ Mastics และข้อจำกัดเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ อาจมีการตั้ง คำถามเกี่ยวกับความแม่นยำในการใช้ ประโยชน์จากคุณสมบัติ Mastics เพราะการเชื่อมต่อกันระหว่าง Filler และ Mixture performance นั้นอยู่ในการควบคุมของผลกระทบจาก Filler ใน MHA โมเดลที่กล่าวไปถูก

แสดงในตาราง 2.2 ข้างล่าง แต่พวกเขาจำเป็นต้องทำการตรวจสอบเพิ่มเติมและปรับเปลี่ยนเพื่อการเปลี่ยนแปลง เฉพาะที่ (Faheem and Bahia, 2009).

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของมาستيكที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของส่วนผสมแอสฟัลท์ (Faheem and Bahia, 2009)

Performance indicator	Mastic property	Mastic limit	Mastic model
Workability	Relative viscosity at 135 °C	Less than 5.0	Mastic viscosity = -8244 + 4.68(binder viscosity) + 205(Rigden void content)
Rutting	J_{nr} at 3.2 kPa and 58 °C	Less than 0.40	Mastic J_{nr} = 1.01 + 0.160(binder J_{nr}) - 0.0230(Rigden void content)

Rigden (1947) กล่าวถึงทฤษฎีหนึ่งไว้ว่าผลความแข็งของ Filler ได้รับอิทธิพลมาจาก The filler fractional voids ที่มี Fixed asphalt binder อยู่ข้างใน Rigden voids มากจะทำให้เกิดผลความแข็งมาก เนื่องจาก binder ที่เติมลงไปเกิดการแข็งตัวและเติมเต็มช่องว่างภายในวัสดุฟิลเลอร์ ดังนั้น Binder ที่น้อยกว่าจะทำให้มีพื้นที่ว่างสำหรับการกระจายตัวของอนุภาค Filler (Anderson, 1987; Harris and Stuart, 1995). ในงานวิจัยหลายงานพบว่า ตั้งแต่ Rigden voids ถูกวัดในตัวอย่าง Filler แห่ง คุณสมบัติของ Mastic system ทั้งหมดไม่ถูกนำมาพิจารณา (Shashidhar and Romero, 1998). งานวิจัยของ Landel et al (1965) พิสูจน์แล้วว่าความเข้มข้น อนุภาคสูงสุด ϕ_m ในตัวอย่างฟิลเลอร์แห้งและอัดแน่นไม่เท่ากับค่าที่ได้จากของเหลวอื่นและรับรองว่า ϕ_m ในของเหลวอื่นว่าทำหน้าที่เป็น Parameter ในการค่าความแข็งได้ เพราะ ϕ_m มีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับปริมาณ Rigden void จากสมการ (2.7) Shashidhar and Romero (1998) กล่าวว่า การวัดโดยของค่า ϕ_m และ KE อาจใช้ได้ผลดีกว่าปริมาณ Rigden void ใช้เป็นการ หาค่าผลความแข็งของ Filler โดย Parameter ใน Asphalt mastics

จากงานวิจัยการประเมินอุณหภูมิสำหรับบดอัดของวัสดุส่วนผสมบิทูมินัสเสริมไฟเบอร์ ด้วยวิธีทดสอบความเหนียวที่ทำการทดสอบความเหนียวของมาستيكแอสฟัลท์ (M.Crispino, 2013) ซึ่งเป็นการทดสอบแอสฟัลท์ที่ผสมฝุ่นต่างกัน 4 ชนิด คือ เซลลูโลสบริสุทธิ เซลลูโลสผสมแก้ว เซลลูโลสผสมพอลิเมอร์ และเซลลูโลสผสมพอลิเมอร์รีไซเคิล มีจุดประสงค์เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการบดอัดตัวอย่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เครื่องวัดความเหนียวแบบหมุนเช่นเดียวกัน และผลที่ได้จาก การทดสอบความเหนียวของวัสดุบิทูมินัส พบว่าการเติมไฟเบอร์ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุมาستيك บิทูมินัส ณ อุณหภูมิที่เหมาะสมได้ และยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทนต่อการบดกระแทกของวัสดุ, คุณสมบัติเชิงปริมาตร, ความสามารถในการทนต่อความเสียหายของวัสดุได้ดีขึ้น

จากการทดลองของงานศึกษานี้เป็นการศึกษาผลของคุณสมบัติวัสดุผสมชนิดต่างๆที่ได้จากการทดสอบวิธีที่ต่างกัน ซึ่งงานศึกษานี้ใช้ไฟเบอร์ชนิดเซลลูโลสเป็นสารเติมแต่งในวัสดุพียูมินัส เพื่อให้หาคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการทดสอบการบดอัดของวัสดุผสมชนิดต่างๆ ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุผสมชนิดต่างๆเหล่านั้น นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุพียูมินัสผสมไฟเบอร์ ที่มีการใช้สถานะอุณหภูมิในกระบวนการทดสอบการบดอัดที่ต่างกัน ยืนยันผลการทดลองด้วยการประเมินศักยภาพของไฟเบอร์ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการสร้างถนน แม้ว่าความสามารถของวัสดุเติมแต่งที่ใช้จะขึ้นกับปัจจัยด้านอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนทดสอบการบดอัดแรงกระทำของวัสดุ อย่างไรก็ตามงานศึกษานี้ไม่ได้ให้รายละเอียดเกี่ยวกับความเหมาะสมของการออกแบบวิธีการทดลองที่สอดคล้องกับวัสดุเติมแต่งที่เป็นองค์ประกอบแต่ละชนิด

กล่าวได้ว่าไฟเบอร์มีส่วนช่วยปรับปรุงคุณสมบัติและความสามารถของวัสดุแมสติกพียูมินัสได้ดีมากขึ้น อย่างไรก็ตามการควบคุมสถานะของชนิดวัสดุเติมแต่งและสถานะของขั้นตอนการทดสอบ ความทนต่อแรงบดอัดเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงปริมาตรของตัวอย่างได้ การออกแบบขั้นตอนการทดสอบที่เหมาะสม เช่น การทดสอบความหนืดของวัสดุพียูมินัสเสริมไฟเบอร์ เป็นวิธีที่ใช้ในการประเมินคุณสมบัติที่ดีของไฟเบอร์ที่เป็นองค์ประกอบในวัสดุตัวอย่างได้อย่างดี (M.Crispino, 2013)

2.2.2 คุณสมบัติของส่วนประกอบมาสติก

2.2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเติม

Void ที่เป็นส่วนเติมหรือ Rigden voids เป็น ส่วนประกอบในฟิลเลอร์เมื่ออัดให้ เช่น ขนาดของอนุภาค และรูปร่าง ลักษณะพื้นผิว และความเป็นมุม เมื่อผสม Asphalt กับฟิลเลอร์ที่แห้ง ตัวผสมจะเติม Rigden voids ด้วยฟิลเลอร์ที่เลเบลไว้ ตัวผสมที่เหลือ และเกินออกมาจาก Void จะถูกเรียกว่าตัวผสมอิสระ ที่สามารถทำให้ Mastic ลื่นและทำให้มีความเป็นของไหล เมื่อประกอบไปด้วย Rigden void มากและมีปริมาณตัวผสมอิสระในปริมาณน้อย

Rigden voids ถูกพบโดยวิธี 14.4282 ในคู่มือ R210 โดย Norwegian Public Road Administration (NPR) ตัวอย่างฟิลเลอร์ที่รู้ความหนาแน่น ถูกนำไปทำให้แห้งที่ 110 ± 5 °C จนกว่าจะมีมวลคงที่ ก่อนที่จะเย็นลงในเครื่องทำให้แห้ง (Desiccator) เป็นเวลา 90 นาที นำกระดาษ กรองใส่ในกระบอกเหล็กและชั่งน้ำหนักได้ 0.01 กรัม และมีการวัดความหนาของกระดาษและความสูงของแสดมภ์ หลังจากนั้นนำฟิลเลอร์ที่หนักประมาณ 10 กรัมใส่ในกระบอกและนำกระดาษกรอง และแสดมภ์ไว้บนสุด แล้วใส่ในอุปกรณ์ Rigden, ภายในอุปกรณ์ Rigden กระบอกและแสดมภ์ถูกยก ให้ไปตาม Bar เหล็กที่สูง 100 ± 25 mm และปล่อยให้ตกอย่างอิสระ 100 ครั้ง มีการวัดความสูงและ น้ำหนักของฟิลเลอร์ที่ถูกทำให้แน่นและมีกระดาษกรองและแสดมภ์ โดย Rigden void คำนวณโดยสมการ (2.12)

$$V_R = \left(1 - \frac{1000m}{(h_1 - h_2)A\rho_f} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ V_R = ส่วนประกอบ Rigden void (%)

m = มวลของฟิลเลอร์ที่แน่น (g)

h_1 = ความสูงของฟิลเลอร์ที่แน่น แสตมป์และกระดาษกรอง (mm)

h_2 = ส่วนสูงของแสตมป์และกระดาษกรอง (mm)

A = ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลงในของกระบอก (mm²)

ρ_f = ความหนาแน่นของวัสดุฟิลเลอร์ (g/cm³)

มาตรฐานชาวอร์เวย์ได้จำเพาะค่าของ Rigden void ระหว่าง 28% ถึง 55% สำหรับการเติมฟิลเลอร์ในสารผสม Asphalt (NPRA N200) มากไปกว่านั้น ฟิลเลอร์ควรมีความแห้งที่พอดี ไม่มีการจับตัวเป็นก้อน และไม่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ ทำการทดสอบ 3 รอบและค่าของ Rigden void ทั้งหมดต้องมีค่าไม่เกิน $\pm 1\%$ ของค่าเฉลี่ย

Kavussi และ Hicks (1997) ได้พูดถึงปัญหาของการของความว่องไวในการทดสอบ Rigden void ในการทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกันของประเภทฟิลเลอร์เดียวกัน ซึ่งอาจจะมีการกระจายของข้อมูลที่คำนวณได้จากพื้นผิวที่แตกต่างกันที่ฐานของอุปกรณ์ เมื่อมีพื้นผิวที่อปเคาน์เตอร์ที่เป็นเหล็ก จะสามารถคำนวณค่า Rigden void ได้ 36.2% ในขณะที่ฟิลเลอร์ที่เหมือนกันได้ 34.5% เมื่อพื้นผิวเป็นโตะไม้ โดยวางและหนีบอุปกรณ์ Rigden บน ขาดั้งไม้ที่ติดบนที่อปเคาน์เตอร์ ผลลัพธ์ที่ไม่ตรงกันลดลงเรื่อยๆสำหรับพื้นผิวทุกชนิดและระยะที่แตกต่างกันของค่าจากพื้นผิวที่ได้กล่าวถึง ลดลงตั้งแต่ 35.3% ถึง 35.7%

การตรวจสอบฟิลเลอร์ของเยอรมันเป็นวิธีที่ใช้วัดปริมาณฟิลเลอร์ที่ใช้เพื่อดูดซึม น้ำมัน hydraulic 15 กรัม โดยใส่น้ำมันในถ้วยแล้วใส่ฟิลเลอร์ในปริมาณน้อย ผสมฟิลเลอร์กับน้ำมัน และสามารถนำสารผสมนี้สร้างเป็นบอลได้ ถ้าบอลอยู่ติดกัน จะใส่ฟิลเลอร์น้ำและจะทำกระบวนการ ซ้ำจนกว่าสารผสมจะแยกออกจากกันและไม่สามารถอยู่ในรูปร่างบอลได้อีก โดยปริมาณฟิลเลอร์น้ำที่ใส่จะเป็นค่าทดสอบ โดยการทดสอบนี้จะสัมพันธ์กับ Rigden voids เมื่อค่า Rigden void ในฟิลเลอร์ น้ำที่สูงจะเท่ากับค่าทดสอบฟิลเลอร์เยอรมันที่น้อย เพราะน้ำมัน Hydraulic ที่ถูกยึดใน Void และใช้ ฟิลเลอร์น้อยในการทำให้สารผสมแยกออกจากกัน

อีกคุณสมบัติของฟิลเลอร์คือความหนาแน่น ปกติแล้วความหนาแน่นสามารถบ่งบอกถึงมวลของสารที่มีค่าปริมาตรที่จำเพาะของวัสดุชนิดหนึ่งที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง (NPRA R210) ในงานเขียนวิชาการของอเมริกา ความถ่วงจำเพาะได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อแทนที่ความหนาแน่น โดยความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นสามารถดูได้จากสมการ (2.13)

$$\rho_f = G_m \rho_w \quad (2.13)$$

เมื่อ ρ_F = ความหนาแน่นของฟิลเลอร์ (g/cm³)

G_m = ค่าแรงโน้มถ่วง

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง (g/cm³)

ความหนาแน่นที่จำเพาะของฟิลเลอร์สามารถหาได้จากวิธี 14.427 (NPRA R210) โดยใช้ Pycnometer น้ำหนักของ Pycnometer ที่มีตัวหยุดแก้ว แล้วเติมน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 25 °C ในการเติมตัวอย่างวัสดุฟิลเลอร์ที่แห้งจะใช้กรวยในการเติมลงใน Pycnometer ก่อนที่จะนำไปชั่ง น้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม เติมน้ำกลั่นไปจนกว่าวัสดุฟิลเลอร์ที่ท่วมออกมา และนำไปชั่งน้ำหนัก เครื่อง Pycnometer ถูกนำไปวางไว้ในเครื่องที่ทำให้แห้งสุญญากาศซึ่งสามารถ เอาอากาศออกจากฟิลเลอร์ได้ หลังจากนั้นจึงนำเครื่อง Pycnometer ออกแล้วไปใส่ในอ่างน้ำที่ อุณหภูมิ 25 °C อย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยหาความหนาแน่นของฟิลเลอร์จาก สมการ (2.14)

$$\rho_f = \frac{(m_4 - m_1)\rho_w}{m_2 - m_1 - m_5 + m_4} \quad (2.14)$$

เมื่อ ρ_F = ความหนาแน่นของฟิลเลอร์ (g/cm³)

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm³)

m_1 = มวลของ Pycnometer และตัวหยุดแก้ว (g)

m_2 = มวลของ Pycnometer และตัวหยุดแก้วที่มีน้ำกลั่น (g)

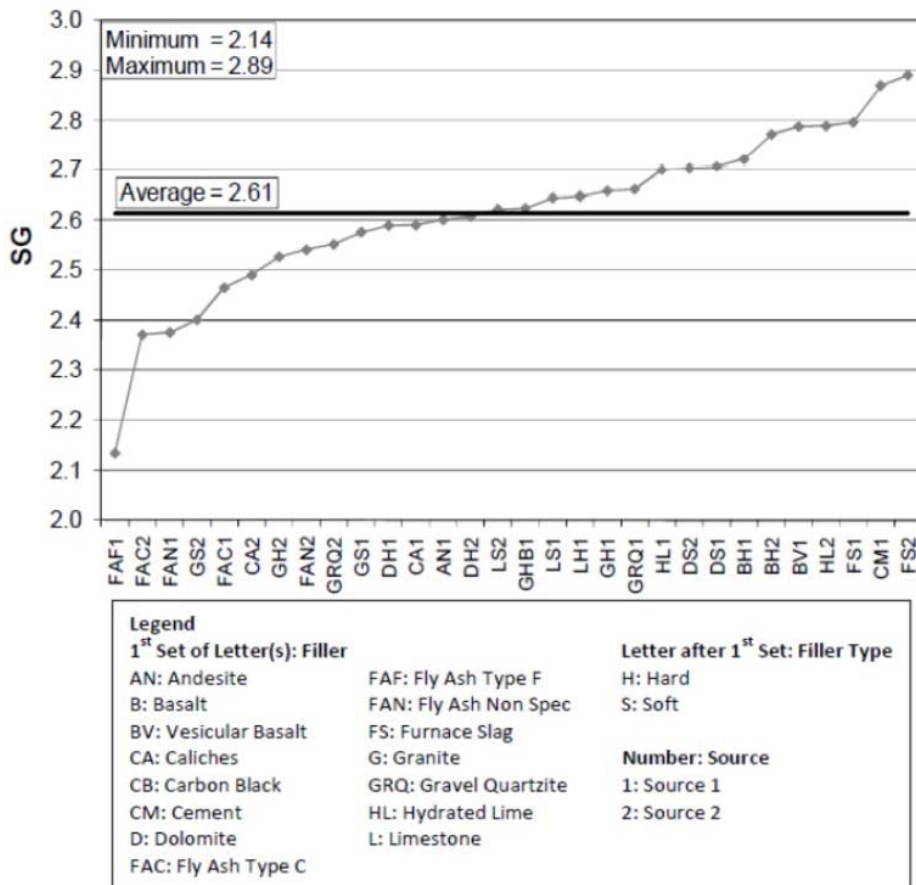
m_4 = มวลของ Pycnometer และตัวหยุดแก้วที่มีฟิลเลอร์ (g)

m_5 = มวลของ Pycnometer และตัวหยุดแก้วที่มีน้ำ (g)

อุณหภูมิของน้ำต้องมีความคงที่เพราะความหนาแน่นของน้ำสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ น้ำสามารถขยายตัวได้ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าที่กำหนดน้ำจะสามารถเติมเต็ม Void ได้น้อยลง เป็นผลให้ความหนาแน่นของฟิลเลอร์สูงขึ้น ในหนังสือเคมีและฟิสิกส์ ดัดแปลงครั้งที่ 95th โดย Haynes และอื่นๆ (2014) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของน้ำและอุณหภูมิของน้ำในตาราง B1 ในดัชนี B

ในสารผสม Asphalt ปริมาณของฟิลเลอร์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมวลของ ส่วนประกอบทั้งหมด เมื่อมีความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดฟิลเลอร์ ปริมาตรของฟิลเลอร์ที่เติมใน Asphalt mastic ก็จะไม่แตกต่างกันเช่นเดียวกัน ผลจากอัตราส่วนระหว่างฟิลเลอร์และตัวผสมใน Mastic จะถูกพูดถึงต่อไป ผลการทดลองจากโปรเจ็ค NCHRP 9-45 (2010) แสดงให้เห็นว่าฟิลเลอร์ที่ถูกผลิต

มา ในกรณีนี้คือถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยที่สุดและมากที่สุดตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละฟิลเลอร์สามารถดูได้จากรูป 2.4 จากในรูป มีประเภทของฟิลเลอร์ 2 ประเภทที่คล้ายกันจะมีค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับแหล่งดั้งเดิม เช่น ฟิลเลอร์ Soft granite จากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันมีค่าความถ่วงจำเพาะที่ต่างกันระหว่าง 2.40 และ 2.58



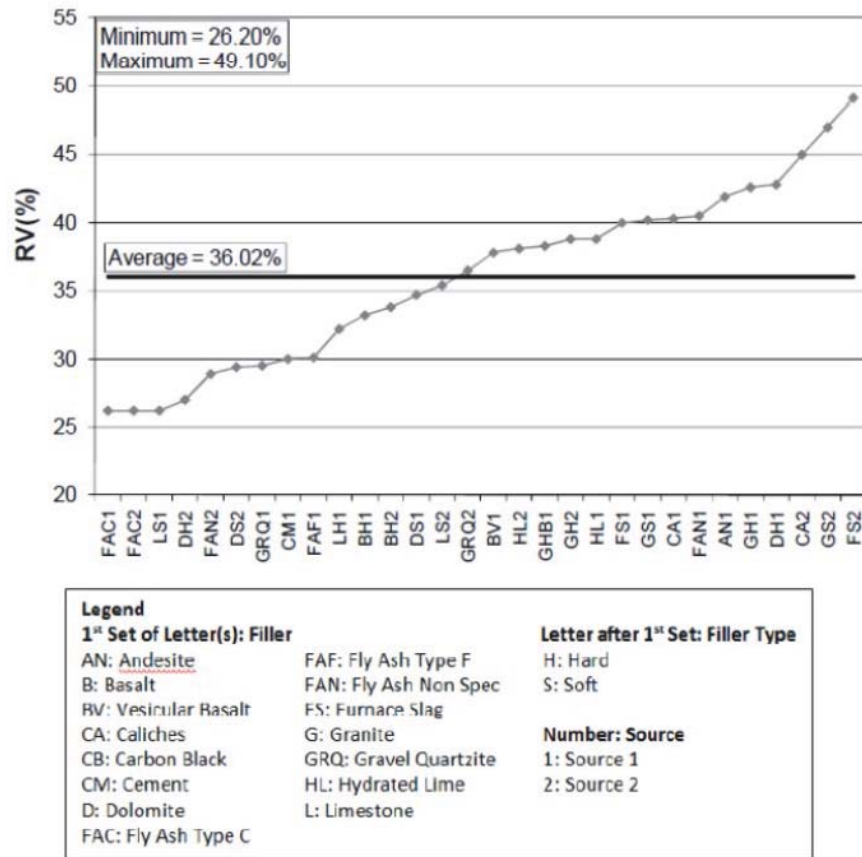
รูปที่ 2.3 ความถ่วงจำเพาะของฟิลเลอร์ชนิดต่าง ๆ (NCHRP Project 9-45, 2010)

ความหนาแน่นของฟิลเลอร์ส่งผลต่อปัจจัยทางกายภาพต่างๆ เช่น รูปร่างทาง เรขาคณิตของอนุภาค ขนาดของอนุภาค การกระจายตัว และลักษณะทางกายภาพ รูปร่างของอนุภาค ขนาดของมุม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยกล้องจุลทรรศน์และ Software ในการวิเคราะห์ภาพ (โปรเจกต์ NCHRP 9-45, 2010) ในการศึกษาโดย LerFald (2000) พบว่ารูปร่างของปูนขาวจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจาก ผุ่นไปจนและ หินปูน ในขณะที่หินปูนมีลักษณะเป็นทรงกลม และผุ่นจะยาวกว่า ปูนขาวมีอนุภาคที่พรุนและมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอและมีพื้นที่ผิวสูง รูปร่างของฟิลเลอร์ที่ ผลิตออกมาจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และปูนขาวเป็นผลจาก Calcium Carbonate ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำไปเป็น Calcium oxide (LerFald, 2000) ในงานวิจัย Buttler และคณะ (1999) ใช้ เครื่องวิเคราะห์การดูดซึมนไนโตรเจนในการศึกษาพื้นที่ผิวของอนุภาคฟิลเลอร์ โดยวัดการดูดซึมน Isotherm ของแก๊สไนโตรเจนที่บริเวณชั้นผิว โดยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) ที่มี

การ พัฒนามาตั้งแต่ 1930s (Sing,1998) งานวิจัยของ Geber และ Gomse (2010) พบว่าแร่หินภูเขาไฟ เพิ่มพื้นที่ผิว ดังนั้น ฟิลเลอร์หินแอนดีไซต์มีพื้นที่ผิวมากในขณะที่หินปูนมีน้อย

Buttlar และคณะ (1999) พบว่ามีกระจายของขนาดของอนุภาคในวัสดุฟิลเลอร์โดย หลักการ Liquid phase photosedimentation วิธีการนี้ใช้สารแขวนลอยกับสารลดแรงตึงผิวเป็น ตัวกระจาย และผลลัพธ์ คือการกระจายของขนาดอนุภาคและมีการทดสอบกับขนาดอนุภาคที่มีขนาด กลาง (Buttlar และคณะ, 1999) วิธีอื่นในการศึกษาการกระจายของขนาดในวัสดุฟิลเลอร์ต้องมีการร่อนออกมาหรือใช้เลเซอร์ในการ แยก Harris และ Stuart (1995) ได้สรุปงานวิจัยของเขาว่า ในวิธีนี้อนุภาคของฟิลเลอร์ในการกระจายในน้ำ แสงจากเลเซอร์กระจายในทุกทิศทาง ลักษณะการกระจาย ของแสงจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคฟิลเลอร์ และลักษณะจะถูกวิเคราะห์เพื่อออกแบบการกระจายของขนาดอนุภาคในวัสดุฟิลเลอร์ (โปรเจค NCHRP 9-45,2010) การอธิบายเพิ่มเติมของวิธีเหล่านี้ สามารถอ่านได้จากงานเขียนต่างๆ (Harris และ Stuart,1995; Sing,1998; Tayebali และคณะ ,1998)

ลักษณะทางเรขาคณิตมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งที่มาของวัสดุฟิลเลอร์ Rigden void จะมีผลกระทบมาจากรูปร่าง ขนาด และลักษณะของฟิลเลอร์ ซึ่งสามารถใช้เป็น ตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิต ของอนุภาคได้ การศึกษาที่ร่วมกับโปรเจค NCHRP 9-45 ได้แสดงให้เห็นถึงความกว้างของข้อมูล Rigden void โดยค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดพบได้ในฟิลเลอร์ที่ถูกผลิต ซึ่งถ้าลดยมีปริมาณ Rigden void น้อย เท่ากับ 26.2% และตะกรันเตากลูงเหล็ก มี 49.1% ฟิลเลอร์ หินอ่อนมีค่าประมาณ 30% แต่ไม่มีความสัมพันธ์ กับปริมาณ Rigden void สมบัติของแร่และแหล่ง ของฟิลเลอร์ (โปรเจค NCHRP 9-45,2010) การแสดงทาง กราฟฟิก ได้แสดงในรูปที่ 2.5 ค่าปริมาณ Rigden void ที่น้อยที่สุดและมากที่สุด พบในงานวิจัยต่อเนื่องโดย ทำร่วมกับชวานอร์เวย์ ต้องการ 28% และ 55% พบใน NPRA N200



รูปที่ 2.4 Rigden Voids ของฟิลเลอร์ชนิดต่าง ๆ (NCHRP Project 9-45, 2010)

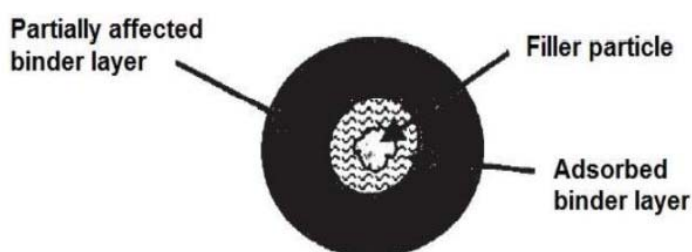
คุณสมบัติอื่นถูกใช้เพื่อแยกฟิลเลอร์คือ โมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus; FM) โดยที่ค่าเอมพิริคอลลคำนวณได้จากสมการ (2.4) ซึ่งมีค่าใกล้ 0.01 Wang และคณะ (2011) ได้มีการทดสอบ FM ของวัสดุที่ใช้ตะแกรงร่อนขนาด 75, 50, 30, 20, 10, 5, 3 และ 1 um ซึ่งวิธีการจะกล่าวถึงใน ASTM C 125 และ % Yieldของวัสดุที่มีค่าน้อยกว่าค่า FM โดยที่ค่า FM จะถูกใช้ เป็นอินดิเคเตอร์ของรูปร่างและลักษณะพื้นผิวของฟิลเลอร์ และค่าจะถูกพิจารณาเป็นปัจจัยสำคัญของฟิลเลอร์ ที่เป็นตัวกำหนดภาพลักษณ์ของลักษณะเรขาคณิตของฟิลเลอร์ควบคู่ไปกับปริมาณ Rigden void ที่บ่งบอกถึงการกระจายของขนาดและพื้นที่ผิว (โปรเจค NCHRP 9-45,2010) โดยสมการที่ (2.15)

$$FM = \frac{\sum \text{Cumulative percentages retained on the specified sieves}}{100} \quad (2.15)$$

โดยที่ FM คือ ค่าโมดูลัสความละเอียด

2.2.2.2 คุณสมบัติทางเคมีของฟิลเลอร์

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้น ตัวผสมใน Asphalt mastic ที่ทั้งยึดไว้หรืออิสระ ตัวผสม ที่ยึดสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนแรกจะติดกับวัสดุฟิลเลอร์ และทำหน้าที่ เป็นส่วนหนึ่งของอนุภาค ในขณะที่ส่วนที่ 2 จะไม่ถูกดูดซึมแต่จะส่งผลต่อการดูดซึมของส่วนภายใน (Faheem และ Bahia,2010) ตัวผสมที่ยึดและฟิลเลอร์จะมีปฏิสัมพันธ์กันและเกิดพันธะเคมีความแข็งแรงของพันธะเคมีจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาบนพื้นผิวและคุณสมบัติของแร่ธาตุของฟิลเลอร์ โดย Ishai และ Craus (1996) พบว่ายิ่งรูปร่างของฟิลเลอร์ยิ่งแปลก จะยิ่งมีความสามารถในการดูดซึม ซึ่งผลนี้ เป็นผลให้พันธะระหว่างตัวผสมและฟิลเลอร์แข็งแรงมากขึ้น และยังส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณตัว ผสมที่ยึดติด อีกทั้ง mastic จะมีความหนาแน่นและความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Ishai และ Craus,1996)



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการเคลือบฟิลเลอร์ของแอสฟัลท์

Tunnickliff (1962) ยืนยันว่าผลของการทำให้แข็งขึ้นบริเวณพื้นผิวของฟิลเลอร์ และความแข็งแรงลดลงตามระยะทางจากพื้นผิว และในระดับของแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับสารเคมีของฟิลเลอร์ ซึ่งเป็นสิ่งที่อธิบายว่าทำไมฟิลเลอร์ถึงมีรูปร่างคล้ายกัน ปริมาณ Rigden void และลักษณะพื้นผิวมีความแข็งที่แตกต่างทางคุณสมบัติของแร่ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิว

ปริมาณโคลนในวัสดุฟิลเลอร์ก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ Woodward และคณะ (2002) ได้กล่าวไว้ว่าลักษณะพิเศษของโคลนในสารผสม Asphalt เป็นปัจจัยที่สำคัญโดยลักษณะพิเศษแรก คือ พื้นผิวของโคลนที่มีขนาดกว้างที่ต้องการยางมะตอยมากขึ้นในการเคลือบ ลักษณะพิเศษอีกอย่างคือ โคลนเมื่อเจอกับน้ำจะมีความยืดหยุ่นเหมือนพลาสติก (plastic) มากไปกว่านั้น โคลนจากกลุ่ม Smectite และ Montmorillonite ที่มีความอันตรายเนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเก็บความชื้นไว้ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อวัฏจักรการแช่แข็งหลอมเหลว (Freezing-thawing cycle) (Woodward และคณะ, 2002) ปริมาณความชื้นที่มากในฟิลเลอร์จะลดพันธะระหว่างตัวผสมกับฟิลเลอร์ ซึ่งเกิดจากประจุของน้ำบริเวณผิว และการดูดซึมน้ำจะส่งผลต่อการต้านความเย็นของสารผสม Asphalt โคลนและอนุภาคที่เปราะมีแนวโน้มที่จะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนและแตกออกจากกัน

ในระหว่าง ที่เกิดความเครียด ปริมาณเล็กน้อยของโคลนที่ขยายตัวในพื้นที่ที่คับแคบก็ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของ มาสติก

การทดสอบโดยเมทิลีนบลู (Methylene Blue Value ;MBV) เป็นเทคนิคที่ใช้ใน การตรวจสอบ ปริมาณโคลน ในสภาวะที่เป็นของเหลว เมทิลีนบลู จะเป็นสีที่เป็น Cation ที่จะดูดซึม พื้นที่ผิวของโคลนที่มี ประจุลบ วิธีนี้จะใช้การไตเตรท และฟิลเลอร์แห้ง 2 กรัมจะถูกผสมกับน้ำกลั่น หรือน้ำ Deionized 200 ml สารละลายเมทิลีนบลูจะถูกเติมและเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนที่จะ นำไปพักจนกว่าจะถึงจุดสมมูลของการ ดูดซึม หลังจากนั้นนำสารผสม 5 ml ไปปั่นเหวี่ยงและ วิเคราะห์โดยเครื่อง Spectrophotometer เพื่อหา ปริมาณเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่และปริมาณที่ถูกดูด ซึมโดย mineral ฟิลเลอร์ (Santanarina และคณะ,2002) ผลการทดลองจาก โปรเจค NCHRP 9-45 แสดงให้เห็นว่าฟิลเลอร์ที่ถูกผลิตขึ้นเช่น แก้วลอย ตะกรันเตา หลอมพื้นดิน ที่มีค่า MBV ต่ำ เช่นเดียวกันกับหินปูนและหินอ่อนในขณะที่ฟิลเลอร์บะซอลต์และแอนติไซต์มีค่า สูง อีกวิธีในการตรวจวัดปริมาณโคลน ทำโดยการตรวจวัดความเป็นพลาสติก (Plasticity) โดยความเป็น พลาสติกของวัสดุคือความแตกต่างระหว่างจุดขอบเขตของพลาสติกและขอบเขตของของเหลวของวัสดุที่บาง กว่า 0.4 mm (NPR R210) ขั้นตอนในการหาขอบเขตของ พลาสติกจะอธิบายอยู่ในวิธี 14.442 ใน NPR R210 และตรวจวัดโดยการแยกฟิลเลอร์ที่เพิ่มความ ชุ่มชื้น 20 กรัมขอบเขตของพลาสติก คือ ปริมาณน้ำที่ทำให้แยกชั้นส่วนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ขอบเขตของของเหลวคือปริมาณน้ำในฟิลเลอร์ที่ทำให้ร่องของ โคน (Cone) กลายเป็น 10 mm เมื่อโคนถูกปล่อยจากพื้นผิวของฟิลเลอร์ กระบวนการนี้ได้ถูกอธิบายเพิ่มเติม ในวิธี 14.441 ใน NPR R210 การวัดทั้งสองใช้ในการหาดัชนีความเป็นพลาสติก (plasticity index) โดย สมการ (2.16)

$$PI = LL - PL \quad (2.16)$$

เมื่อ PI = Plasticity index

PL = ขอบเขตความเป็นพลาสติก

LL = ขอบเขตของของเหลว

วัสดุที่มีค่า PI มากกว่า 30 จะมีความเป็นพลาสติกมาก ในขณะที่วัสดุที่ไม่เป็นพลาสติก มีค่าอยู่ ระหว่าง 0 และ 3 วัสดุพวกดินเหนียวหรือโคลนมีค่า PI สูง (Das,2010)

ปริมาณสารอินทรีย์ในวัสดุฟิลเลอร์ ในงานวิจัยได้พิจารณาถึงอันตรายจากการ แตกหักและการแยก ชั้นส่วนที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการทางชีวเคมี (Kandhal และคณะ,1998; Hintz และคณะ,2010; Melotti และคณะ, 2013) การแยกชั้นส่วนส่งผลต่อโครงสร้างของดิน ซึ่ง นำไปสู่การเป็นรูพรุนสูงและทำให้น้ำสามารถ เข้าไปแทรกซึมได้ง่าย ฟิลเลอร์ที่มีปริมาณสารอินทรีย์จะมีความชื้นสูง อุ่นน้ำได้ดี และมีแรงยึดติดระหว่างฟิล เลอร์และตัวผสมต่ำ ซึ่งหมายความว่าปริมาณ สารอินทรีย์ในฟิลเลอร์ควรจะน้อย โดยการวัดปริมาณ

สารอินทรีย์วัดได้จากน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (The loss of ignition test; LOI test) ตามวิธีการที่ระบุในวิธี 14.445 ใน NPRA R210 และใน AASHTO T267 ในการทดสอบ LOI ฟิลเลอร์จะนำไปอบแห้งที่ 110 °C 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำ ตัวอย่างไปไว้ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle Furnace) ที่ 455 ± 10 °C 6 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิที่สามารถเผาสารอินทรีย์หมด ความแตกต่างของน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังเผาจะรายงานเป็น ค่า LOI NPRA N200 ต้องการให้ฟิลเลอร์ที่ใช้ไม่ประกอบด้วยสารอินทรีย์

ในการศึกษาลักษณะของแร่ธาตุของวัสดุฟิลเลอร์ที่มีผลต่อการทำงานของ mastic พันธะของตัวผสม Asphalt จะแน่นอนตามประเภทของแร่ธาตุ เพราะแรงยึดติดของฟิลเลอร์ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูด พันธะและพันธะขั้วที่มีปริมาณแคลเซียมสูงจะเป็น Hydrophobic และมีแนวโน้มที่จะ สร้างพันธะที่แข็งแรงกับยางมะตอย ฟิลเลอร์ที่เป็นซิลิกอนเช่นฟิลเลอร์จาก ควอตซ์และแกรนิต จะมี คุณสมบัติเป็น Hydrophilic และจะจับกับน้ำได้ดีกว่ายางมะตอย ฟิล์มที่เคลือบฟิลเลอร์ที่ชอบน้ำจะ กลายเป็นแถบเมื่อเจอกับน้ำ วัสดุพวกแคลเซียมซึ่งเป็น Hydrophobic จะมีประจุบวกเมื่อสัมผัสกับน้ำ ในขณะที่ฟิลเลอร์ซิลิกอนจะเป็นประจุลบ โดยประจุเหล่านี้จะส่งผลต่อการยึดติด ในการเพิ่มการ ยึดติดควรเติมเอมีนเพื่อเป็นสารเพิ่มพันธะระหว่างธาตุ Hydrophobic และยางมะตอย (Robert และคณะ,1996)

จากที่ฟิลเลอร์หลายๆชนิดประกอบไปด้วยธาตุต่างๆที่แตกต่างกัน ทำให้ฟิลเลอร์มี ลักษณะที่เป็นทั้ง Hydrophilic และ Hydrophobic แต่ในการเกิดปฏิกิริยาของฟิลเลอร์จะสามารถดู ได้จากปริมาณแคลเซียม ซึ่งวิธี X-ray Fluorescence spectrometry เป็นวิธีที่สามารถบอกปริมาณ แคลเซียมออกไซด์ได้ (CaO) (Hintz และคณะ,2010) ในการทดสอบนี้จะปล่อยรังสี Fluorescent X-ray จากฟิลเลอร์แล้วตรวจวัดความเข้มแสง การศึกษานี้ทำให้เห็นว่าฟิลเลอร์ที่เป็นตะกั่วซึ่งมีปริมาณ CaO สูง ในขณะที่ฟิลเลอร์จากแกรนิตมีปริมาณ CaO ต่ำ นอกจากนี้พบว่าฟิลเลอร์หินปูนประกอบไป ด้วย CaCO_3 ในขณะที่ปูนขาวประกอบไปด้วย Ca(OH)_2 (LerFald, 2000; NCHRP Project 9-45, 2010) ปริมาณแคลเซียมสำคัญต่อความแข็งแรงของฟิลเลอร์ เช่นเดียวกับความแข็งแรงของ Mastic (Anderson, 1979) Wang และคณะ (2011) พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CaO และความเป็น ร่องลึกใน Asphalt โดยปริมาณ CaO สูงจะมีร่องน้อย

2.2.2.3 คุณสมบัติของตัวผสม (Binder)

ตัวผสม Asphalt ยางมะตอยพบได้ในวัสดุธรรมชาติหรือสารบริสุทธิ์ที่ได้จากการ กลั่นน้ำมันดิบและตัวผสมส่วนมากในอุตสาหกรรมในปัจจุบันมาจากทรัพยากรจากในอดีต ลักษณะ ของตัวผสมจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งปิโตรเลียม ส่วนประกอบหลักคือคาร์บอนและ ไฮโดรเจน ในขณะที่ heteroatom ของซัลเฟอร์ ไนโตรเจนและออกซิเจนพบได้ในปริมาณน้อย โดย heteroatom จะติดอยู่กับคาร์บอนเพื่อเป็นโมเลกุลที่ภายในมีแรง Electrochemical ที่แตกต่างกัน ทำให้เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว จากความเป็นขั้วของโมเลกุล ทำให้มีการดึงดูดกันของโมเลกุลภายในตัวผสม และเช่นเดียวกันกับพื้นผิวของโมเลกุลที่รวมกัน ที่เป็นฟิลเลอร์

ใน Mastic (Robert และคณะ, 1996) นอกจากนี้ยังมีอีกทั้งกลุ่มที่ไม่มีขี้ในตัวผสมที่จะเป็นสารละลายให้กับกลุ่มที่มีขี้ Fritschy และ Papirer (1978) กล่าวว่าฟิลเลอร์ประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีพันธะที่แข็งแรงกับส่วนที่มี ขี้ของตัวผสมในขณะที่ควอตซ์จะส่งผลได้ดีต่อส่วนที่ไม่มีขี้

โมเลกุลในตัวผสมจะจัดแยกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ Asphaltene resin และน้ำมัน โดย ที่ Asphaltene มีความเป็นขี้มากที่สุดและเป็นส่วนที่ทำให้ปฏิกิริยาได้ดี นอกจากนี้ยังเป็นส่วนสำคัญที่ ทำให้ตัวผสมมีความหนืด ตัวผสมที่มีปริมาณของ Asphaltene ต่ำมีความเกี่ยวข้องกับความร้อนตัว (Robert et al, 1996). เรซินทำหน้าที่เป็นตัวกระจาย Asphaltene ในน้ำมันจึงเกิดเป็นตัวผสมเนื้อเดียว การเกิดปฏิกิริยาของตัวผสมเนื้อเดียวจะขึ้นอยู่กับระดับการกระจายตัวของ Asphaltenes ในน้ำมัน หากมีการกระจายตัวสูงจะทำให้ตัวผสมเนื้อเดียวมีลักษณะ Newtonian Behavior ซึ่งเป็นสถานะที่ความหนืดจะไม่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลในทางกลับกันหากมีการกระจายตัวต่ำ ตัวผสมเนื้อเดียวจะมีลักษณะเป็น Non-Newtonian Flow (Robert et al, 1996).

ยางมะตอยคือสารที่ไวต่ออุณหภูมิและมีคุณสมบัติคล้ายเทอร์โมพลาสติก หรือพลาสติกชนิดที่อ่อนตัวแล้วเปลี่ยนรูปทรงได้ง่ายเมื่อถูกความร้อน และความแข็งที่ควรจะเป็น คุณสมบัติที่ยางมะตอยจะเกิดการขัดแย้งกับลักษณะโดยธรรมชาตินี้ของตัวมันเอง เมื่อถึงจุดที่อุณหภูมิต่ำยางมะตอยจะแข็งตัวและเป็น Non-Newtonian และในขณะที่ยางมะตอยอ่อนตัวลงเมื่อถึงจุดที่ อุณหภูมิสูงขึ้นนั้นหมายความว่ามันจะมีคุณสมบัติเป็น Newtonian และเปลี่ยนรูปทรงได้ง่าย (Leseur, 2009). ตัวผสมเนื้อเดียวจำเป็นต้องมีลักษณะอ่อนมากพอที่จะต้านการแตกร้าวเมื่อถึง จุดอุณหภูมิต่ำ และแข็งมากพอที่จะป้องกันการทรุดตัวเป็นร่องเมื่อถึงจุดอุณหภูมิสูง ความแข็งของตัว ผสมและความสม่ำเสมอจึงถือเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งยวดและถูกใช้เพื่อจำแนกประเภทตัวผสม เนื้อเดียว ยางมะตอยคือสารยึดหยุ่นและความแข็งของยางมะตอยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความ เค้นและความเครียดเช่นเดียวกันกับการฟังก์ชันของอุณหภูมิและ Loading time (Roberts et al, 27 1996) ความแข็งถูกแสดงค่าโดยตัวเลขการหยั่งทะลวงซึ่งจะสามารถหาค่าได้จากการวัดการหยั่งทะลวงโดยใช้วิธี Method 14.512 in NPRA R210. ตัวเลขหรือค่าการหยั่งทะลวงที่ได้มาบ่งบอกถึง ระยะทางของตัวเข็มที่ทะลวงลงไปเป็นแนวตั้งได้ในตัวอย่างยางมะตอยภายใน 0.1 mm. ที่อุณหภูมิ 25 องศา ค่าที่ถูกรายงานคือ Penetration grade หรือระดับความลึกของการหยั่งทะลวงบนและล่าง (NPRA R210) หากค่าหยั่งทะลวงน้อย หมายความว่าตัวผสมมีลักษณะแข็ง

NPRA Handbook N200 กำหนดค่าต่ำสุดที่ต้องการเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของตัวผสม ในสารผสม Asphalt และสิ่งจำเป็นสำหรับ Ab 11 ถูกเขียนไว้ในภาคผนวก C ตาราง C.1. จากความ หลากหลายในความหนาแน่นรวมของสารที่ต่างกัน ค่าที่ต่ำที่สุดจำเป็นจะต้องถูกแก้ไขโดยตัว ประกอบการปรับแก้ในสมการ (2.17) ทั้งนี้ที่นำปริมาณตัวผสมที่ถูกแก้ไขแล้วมาคำนวณ มวลของ ปริมาณตัวผสมที่ถูกใช้ในสารผสม

asphalt นั้นจะหาค่าได้จากในสมการ (2.18) ข้างล่าง (Fwa, 2005). ดังสมการแสดง ตัวผสมถูกเพิ่มเข้าไปที่ basis of weight

$$\alpha = \frac{2.65}{\rho_a} \quad (2.17)$$

$$M_b = \frac{p_b M_s}{100 - p_b} \quad (2.18)$$

เมื่อ α = ตัวประกอบการปรับแก้

ρ_a = ความหนาแน่นรวม

M_b = มวลของปริมาณตัวผสม (g)

M_s = มวลของส่วนผสม (g)

p_b = ปริมาณของตัวผสมเป็นเปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักทั้งหมด (%)

ตัวผสมอาจถูกตัดแปลงหรือไม่ก็ได้ และความจำเป็นที่จะต้องดัดแปลงนั้นขึ้นอยู่กับ ตัวผสมที่ใช้และคุณสมบัติที่ต้องการ การดัดแปลงถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติ ของรีโอโลยี และเชิงกลของ The neat binder การเพิ่มการดัดแปลงเข้าไปใน Polymer Modified Bitumen (PMB) นั้น เปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพเช่นจุดอ่อนตัวและความแข็ง ชนิดของ Polymer modifiers ที่พบเห็นทั่วไป มากที่สุดคือ Styrene-butadiene-styrene (SBS), Polyphosphorous acid (PPA) และ Ethylene vinyl acetate (EVA). Sengoz and Isikyakar (2008) ได้ศึกษาความ หลากหลายใน Neat binder และ SBS และ EVA modifiers, แล้วพิสูจน์ว่าการเพิ่มการดัดแปลงเข้าไปทำให้เกิดการยึดติดระหว่างตัวผสมและส่วนผสม คอนกรีต Huang et al (2007) พบว่าสารเติม เต็มปูนขาวสามารถทำให้ Bond ระหว่างส่วนผสมคอนกรีตและ Neat binder แข็งแรงยิ่งขึ้น และทำให้ทั้งปูนขาวและปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทำหน้าที่เป็น Anti-stripping agents ในสารผสม Asphalt (Yan et al, 2013)

Neat binders และ PMB แสดงปฏิกิริยาแตกต่างกันไปตามแต่ละวัสดุฟิลเลอร์ที่ แตกต่างกัน NCHRP Project 9-45 (2010) มีผลลัพธ์ที่ว่า SBS binder จะให้ค่าความหนืดของ Mastic ที่สูงกว่า PPA binder และ Neat binder ที่มากกว่าไปกว่านั้นคือ The mastics with SBS binder มีค่าความแปรปรวนของความหนืด มากที่สุดกับชนิดของสารเติมเต็มนั้น ไม่พบความแตกต่าง อย่างมีนัยยะใดระหว่างความหนืดของ Mastic ที่ Mastics บรรจุ PPA binder และ Neat binder แต่ถึงอย่างนั้นกลับมีความหลากหลายที่เป็นผลมาจากชนิด ของสารเติมเต็มที่แตกต่างกันออกไป (NCHRP Project 9-45, 2010). แนวโน้มที่พอสังเกตได้คือสารเติมเต็ม ธรรมชาติที่มีปริมาณของ Rigden void ต่ำ ซึ่งมีค่าความหนืดของ Mastic น้อยที่สุดโดยไม่คำนึงว่าจะมีการใช้ Modifiers หรือไม่

2.3 การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลท์

ปัจจุบันมีการนำวัสดุพอลิเมอร์มาผสมในยางมะตอย ซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในงานวิจัยต่างๆ ที่พยายามพัฒนาวิธีทดสอบคุณสมบัติการไหล, คุณสมบัติความคงทนยางมะตอย เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างทางประสิทธิภาพของวัสดุผสมชนิดต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างยางมะตอย เพื่อประเมินความสามารถที่สัมพันธ์ต่อการนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในขณะเดียวกันมีการใช้วัสดุเติมแต่ง, วัสดุปรับสภาพผสมลงในวัสดุยึดเกาะและวัสดุผสมยางมะตอย เพื่อให้วัสดุยางมะตอยมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นต่อการนำไปใช้สร้างถนน อย่างไรก็ตามความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีทั้งสองแบบข้างต้นร่วมกันสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเฉพาะเจาะจง และยังไม่มียุทธศาสตร์ที่ได้รับรายงาน

วัสดุเติมแต่งทุกชนิดที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วโลก พบว่า ไฟเบอร์เป็นวัสดุเติมแต่งที่ถูกนำมาใช้ผสมในยางมะตอยมากที่สุด เนื่องจากไฟเบอร์มีลักษณะหนาแน่น ที่จะช่วยเพิ่มความหนืดของยางมะตอย เมื่ออยู่ในกระบวนการให้ความร้อนสูง ส่งผลให้ไฟเบอร์มีส่วนช่วยลดลักษณะไม่พึงประสงค์ที่อาจเกิดขึ้นในระยะแรกของการขนส่งและการเทยางมะตอยได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้ไฟเบอร์กลายเป็นวัสดุที่มีบทบาทเป็นวัสดุเติมแต่งในวัสดุผสมยางมะตอย ที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อแรงบดอัดได้ดีขึ้น และยังช่วยลดคุณสมบัติความเสียหายของวัสดุผสมยางมะตอย

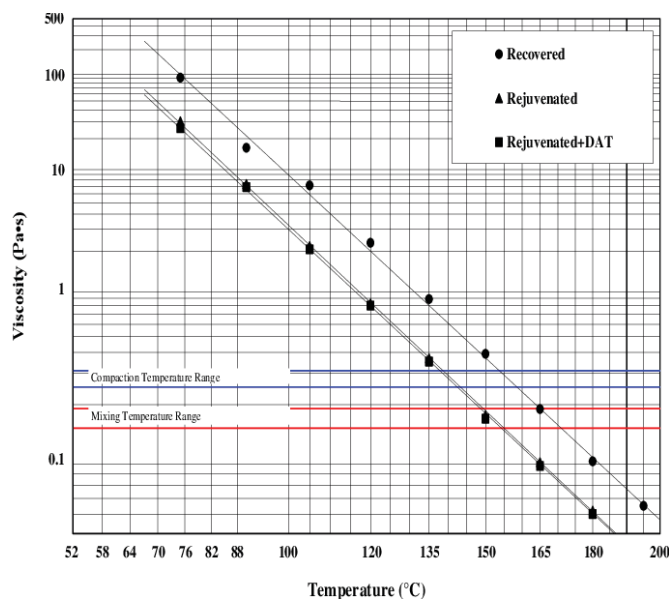
2.4 ความหมายและการนำไปใช้งานของความหนืดของแอสฟัลท์

ความหนืด (Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (ของไหลในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะยางมะตอยชนิด AC 60-70) ของไหลที่มีความหนืดสูง จะมีความต้านทานต่อการไหลสูง ส่วนของไหลที่มีความหนืดต่ำ จะมีความต้านทานต่อการไหลได้น้อย ซึ่งคุณสมบัติของยางมะตอย จะมีความหนืดจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ คือ เมื่ออุณหภูมิสูงจะมีความหนืดต่ำ และเมื่ออุณหภูมิต่ำจะมีความหนืดสูง

หน่วยของความหนืดของของเหลวในระบบเมตริก คือ Poise (P) หรือ Centipoise (cPs) ซึ่งเป็นระบบเดิม ระบบใหม่ใช้หน่วยของความหนืด SI มีหน่วยเป็น Pa.s

เนื่องจากความหนืด (Viscosity) คือ ความเสียดทานภายในของของไหล ดังนั้นความหนืดจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการผสมและบดอัด หากความหนืดสูงเกินไป การผสมและบดอัดที่จะได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการจะเป็นเรื่องที่ยาก และไม่สามารถผสมและบดอัดตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม หากความหนืดต่ำเกินไป ก็อาจเป็นเรื่องยากที่จะทำการกระจายตัวของยางมะตอยในการยึดเกาะแอสฟัลท์อย่างสม่ำเสมอไปถึงโครงสร้างมวลรวม อุณหภูมิจึงมีผลอย่างมากต่อความหนืด ซึ่งเป็นสาเหตุที่อุณหภูมิการผสมและการบดอัดถูกควบคุมโดยความหนืด

จากรูปที่ 2.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความหนืด (log scale) และอุณหภูมิ ถูกสร้างขึ้นโดยมีจุดข้อมูลเพียงสองจุดคือความหนืดที่อุณหภูมิ 135°C และ 165°C ซึ่งความหนืดสำหรับผสมและบดอัดได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM D2493 โดยได้ระบุไว้ว่า ค่าความหนืดที่เหมาะสมสำหรับการผสมตัวอย่างยางมะตอยอยู่ในช่วง 0.170 ± 0.02 Pa·s และ ช่วง สำหรับการบดอัดตัวอย่าง 0.280 ± 0.03 Pa·s จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่บดอัด และอุณหภูมิที่ผสม อยู่ในช่วง 140°C - 145°C และ 152°C - 158°C ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 การกำหนดค่าอุณหภูมิผสมและบดอัด (ASTM D 2493)

2.5 เครื่องวัดความหนืดแบบหมุน (Rotational viscometer)

เครื่องวัดความหนืดแบบหมุน (ดังแสดงในรูป 2.7) จะตรวจจับแรงบิดที่จำเป็นในการหมุนแกนหมุนด้วยความเร็วคงที่ขณะที่แช่อยู่ในตัวอย่างของเหลว ความหนืดแบบไดนามิกเป็นสัดส่วนกับแรงบิดที่วัดความหนืดแบบหมุนมาตรฐาน RV ค่อนข้างเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมเคมีและอาหาร สำหรับการวัดความหนืดของของเหลวที่ไม่ใช่ของนิวตัน

RV มีอุณหภูมิที่หลากหลายทำงานร่วมกับของเหลวที่ไม่ใช่ของนิวตัน (เช่น asphalt binder) ทำงานสำหรับของเหลวที่บดแข็งค่อนข้างเร็วและทำงานสำหรับ Modified asphalt binder (ยางมะตอยที่มีการใส่สารผสมเพิ่ม) ดังนั้นการวัด Modified asphalt binder จึงใช้ RV สำหรับการวัดค่า ความหนืดด้วยอุณหภูมิสูง อุณหภูมิในการใช้ RV วัดความหนืดของยางมะตอยอยู่ในช่วง 38°C - 260°C เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

สำหรับการปฏิบัติขั้นตอนการผสมยางมะตอยกับมวลรวม ซึ่งวิธีการทดลองของ RV เป็นไปตามมาตรฐาน AASHTOT 316 หรือ ASTM D 4402



รูปที่ 2.7 เครื่องวัดความเหน็ดแบบหมุน

ส่วนประกอบและหลักการทำงาน มาตรฐานวัดความเหน็ดแบบหมุนประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน ได้แก่

1. หัววัดที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่มีการกำหนดขนาดแน่นอน
2. อุปกรณ์ทำให้เกิดการหมุนเพื่อให้หัววัด หมุนด้วยแรงบิด (Torque) คงที่ และสามารถปรับค่าได้ เพื่อให้เกิดอัตราเฉือน (Shear rate) ในช่วงที่ต้องการวัดค่า
3. อุปกรณ์ที่วัดค่า shear stress ซึ่งตอบสนองกับอัตราเฉือน (Shear rate)
4. อุปกรณ์เสริมอื่น ๆ เช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของเหลวซอฟต์แวร์

2.6 การวัดเสถียรภาพด้วยวิธีMarshall (Marshall Stability)

การทดสอบเสถียรภาพและการไหลของมาร์แชลล์ด้วยเครื่องวัด Marshall stability ตามมาตรฐาน AASHTO T245 (รูปที่ 2.7) ใช้ทดสอบประสิทธิภาพสำหรับวิธีการออกแบบผสมแบบ มาร์แชล ความเสถียรของการทดสอบวัดค่าแรงสูงสุดที่รับได้ต่อชิ้นงานทดสอบที่อัตราไหล 50.8 มม./นาที (2 นิ้ว/นาที) โดยทั่วไป โหลดจะเพิ่มขึ้นจนกว่าจะถึงค่าสูงสุดแล้วเมื่อโหลดเริ่มลดลงโหลด จะหยุดและโหลดสูงสุดจะถูกบันทึก

มาตรฐานการหมุนที่ติดอยู่นั้นจะวัดการไหลของชิ้นงานซึ่งเป็นผลมาจากโหลดในระหว่างการไหลจะถูกบันทึกเพิ่มขึ้นทีละ 0.25 มม. (0.01 นิ้ว) ในเวลาเดียวกันกับที่บันทึกการ โหลดสูงสุดมาตรฐานความมั่นคงในการออกแบบและเกณฑ์การไหลของมาร์แชลล์แสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.8 เครื่องทดสอบเสถียรภาพ Marshall

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์การออกแบบและข้อกำหนด (จาก Asphalt Institute, 1979)

Mix Criteria	Light Traffic (less than 104ESALs)		Medium Traffic (104 – 106ESALs)		Heavy Traffic (greater than 106ESALs)	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compaction (number of blows on each end of the sample)	35		50		75	
Stability (minimum)	2224 N (500 lbs.)		3336 N (750 lbs.)		6672 N (1500 lbs.)	
Flow (0.25 mm (0.01 inch))	8	20	8	18	8	16
Percent Air Voids	3	5	3	5	3	5

marshall stability test ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D6927 – 06

2.7 ปริมาตรในส่วนผสมแอสฟัลท์คอนกรีต

2.7.1 ช่องว่างอากาศ

ช่องว่างอากาศ หรือ Air Voids (V_a) คือ พื้นที่ว่างของอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างมวลรวมที่ผสม และบดอัด ซึ่งควรอยู่ที่ 3-5% อัตราส่วนช่องว่างอากาศเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงในการผสมแอสฟัลท์ คอนกรีตบนผิวถนน เนื่องจากช่องว่างของอากาศส่งผลโดยตรงกับการซึมผ่านของน้ำ ช่องว่างอากาศ ที่น้อยสามารถเพิ่มความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมได้ รวมถึงลดโอกาสที่น้ำจะแทรกซึมเข้าไปทำลาย การยึดเกาะของแอสฟัลท์กับเม็ดหิน ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตที่หน้างาน ควรมีค่า เริ่มต้นมากกว่า 3-5% เล็กน้อย เนื่องจากมีการอัดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเปิดการใช้งานรับน้ำหนักจราจร

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad (2.19)$$

เมื่อ V_a = Air voids

G_{mm} = Maximum theoretical specific gravity of the mixture

G_{mb} = Bulk specific gravity of the compact mixture

2.7.2 ช่องว่างอากาศในมวลรวม

ช่องว่างอากาศในมวลรวม หรือ Voids in the Mineral Aggregate (VMA) คือปริมาตร ช่องว่างอากาศในมวลรวมของส่วนผสมแอสฟัลท์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว ซึ่งรวมไปถึงประสิทธิภาพของ การใช้งาน หาก VMA มีค่าต่ำเกินไป จะทำให้ส่วนผสมเกิดปัญหาทางด้านความทนทานเนื่องจากแอสฟัลท์ไม่สามารถเคลือบเม็ดหินได้ทั่วถึง ดังนั้น VMA ของส่วนผสมนั้นควรมีค่ามากเพียงพอที่จะให้แอสฟัลท์เคลือบเม็ดหินด้วยความหนาที่เหมาะสม และมีช่องว่างอากาศสำหรับให้แอสฟัลท์ขยายตัวได้ใน สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง เช่น อากาศที่ร้อน หรือถูกแดดส่องเป็นเวลานาน ดังนั้น จึงมีการกำหนดค่า VMA ที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้ แต่ไม่มีการกำหนดค่ามากที่สุดของ VMA

$$VMA = 100 - \left[\frac{(G_{mb} P_s)}{G_{sb}} \right] \quad (2.20)$$

$$VMA = \left(1 - \frac{G_{mb}(1-P_s)}{G_{sb}} \right) \quad (2.21)$$

เมื่อ P_b = Asphalt content by weight of mix (percent)

P_s = Aggregate content by weight of mix (percent)

G_{mb} = Bulk specific gravity of the compact mixture

G_{sb} = Bulk specific gravity of the compact aggregate

2.7.3 ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลท์

ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลท์หรือ Voids Filled with Asphalt (VFA) คือ ช่องว่างของมวลรวมที่ประกอบไปด้วยแอสฟัลท์ ซึ่งแสดงถึงปริมาณของแอสฟัลท์ที่มีประสิทธิภาพ และยังอธิบาย ได้เป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของช่องว่างในมวลรวมที่เต็มไปด้วยแอสฟัลท์ซีเมนต์ VFA จึงมีความสัมพันธ์ตรงกันข้ามกับช่องว่างของอากาศ (Air Voids) เมื่อช่องว่างอากาศลดลง VFA จะมีค่าเพิ่มขึ้น

$$VFA = \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad (2.22)$$

2.8 ถ่านปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash)

ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มก่อให้เกิดของเสียประเภทอินทรีย์วัตถุได้แก่ ทะลายเปล่า เปลือกปาล์ม กะลาปาล์ม และถ่านปาล์ม ดังนั้นถ่านปาล์มน้ำมัน คือ ถ่านที่ได้จากการเผาซากของผลปาล์มน้ำมันที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิประมาณ 800°C - 900°C เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือเป็นของเสียได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยถ่านปาล์มน้ำมันที่ได้มีลักษณะเป็นฝุ่นผงและมีสารประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินา มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.22

ของเสียจากภาคเกษตร เช่น ถ่านปาล์มน้ำมัน ไม่ควรเผาทำลายเพียงเพื่อลดปริมาณของวัสดุก่อนทิ้ง แต่ควรนำถ่านปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์ โดยสามารถถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายวัตถุประสงค์ เช่น การนำถ่านปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต Joo-Hwa Tay ได้ศึกษาการใช้ถ่านปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต พบว่าถ่านปาล์มน้ำมันมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ จึงได้นำถ่านปาล์มน้ำมันมาปรับปรุงคุณภาพให้มีความละเอียดด้วยการบด เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มกำลังอัด พบว่า การบดอัดถ่านปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในบางส่วนได้ดี

งานวิจัยที่นำถ่านปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุผสมแทรกเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสโตนมาสติกแอสฟัลท์ (Kamaluddin, N. 2008) ใช้วัสดุถ่านปาล์มน้ำมันที่ได้จากการเผาเส้นใยและกะลาปาล์มเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การทดสอบใช้ยางมะตอยชนิด PG76 ที่ 5%-7% มวลรวมข้ามขนาด (Gap graded aggregate) และออกแบบการทดสอบด้วย Marshall mix design method การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน JKP, ASTM และ ASSTHO ปริมาณถ่านปาล์มน้ำมันใช้ที่ 25% 50% 75% และ 100% โดยน้ำหนักของปริมาณวัสดุผสมแทรก จากผลการทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ถ่านปาล์มน้ำมันสามารถใช้วัสดุผสมแทรกในแอสฟัลท์ผสมร้อนโดยไม่ลดประสิทธิภาพของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสม

2) จากการทดสอบ Marshall แสดงค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าความแข็ง (Stiffness) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น

3) การผสมเถ้าปาล์มน้ำมันไม่ส่งผลต่อความคงตัวหรือการหลุดลอก (Stripping) ของแอสฟัลท์

4) ประโยชน์ของเถ้าปาล์มน้ำมันในการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมคือการใช้เป็นวัสดุผสมแทรกในแอสฟัลท์ผสมร้อนโดยเฉพาะสโตนมาสติกแอสฟัลท์และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและการกำจัดของเสียได้

โดยให้ข้อเสนอแนะว่าควรทำการทดสอบเพิ่มเติม ได้แก่ ควรศึกษาตัวแปรของขนาดมวลรวมเพิ่มเติม เช่น Dense graded และ Porous graded ศึกษาอัตราส่วนที่มีความละเอียดยิ่งขึ้น ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อคุณภาพของแอสฟัลท์ เช่น ความต้านทานการเกิดร่องล้อ ความเสียหายที่เกิดจากการล่า และการเสื่อมสภาพของแอสฟัลท์

2.9 เถ้าแกลบ (Rice husk ash)

เถ้าแกลบเป็นส่วนผลพลอยได้จากกระบวนการเผาไหม้แกลบอย่างสมบูรณ์ โดยถูกเผาที่อุณหภูมิ 700°C และมีระยะเวลาการเผาไหม้โดยประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งเถ้าจะมีลักษณะละเอียดเป็นผงเนื่องจากมีการบดแกลบให้มีขนาดเล็กมากกว่า 2 มม. และมีส่วนที่ประกอบด้วยซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก ซีเมนต์ ไฟเบอร์ซีเมนต์ เป็นต้น และมีคุณสมบัติสามารถทนความร้อนได้สูง เถ้าแกลบมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.67

โดยในงานวิจัยการใช้เถ้าแกลบมาผสมกับแอสฟัลท์มาสติก (Suleyman Demirel University, Turkey) แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งในส่วนของการทดสอบครั้งแรกเป็นการทดสอบหาค่าปริมาณแอสฟัลท์ที่เหมาะสม (Optimum bitumen) โดยมีวิธีที่ใช้ในการทดสอบ Marshall Stability Test และใช้ฝุ่นจากเถ้าแกลบที่แตกต่างกัน คือ 4%, 5%, 6% และ 7% รวมถึงมีการใช้ยางมะตอยที่แตกต่างกัน คือ 3.5%, 4%, 5%, 5.5%, 6% และ 6.5% ขึ้นต่อกันมา เป็นการทดสอบหาค่าปริมาณเถ้าแกลบที่เหมาะสม (Optimum Filler) ที่ใช้ผสมกับ แอสฟัลท์ มีวิธีการทดสอบโดยใช้ Marshall Stability Test เหมือนกับการทดสอบในส่วนแรก แต่มีทดสอบรวมกับการผสมหินปูนที่มีปริมาณต่างกัน คือ 0%, 25%, 50%, 75% และ 100% อุณหภูมิที่ใช้การทดสอบคือ 700 °C

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุด คือการผสมเถ้าแกลบ (Rice husk ash) 50% และหินปูน (Limestone) 50% ของร้อยละฝุ่น (Percent Filler) ที่ผสมกับแอสฟัลท์มาสติก เนื่องจากมีความเสถียรภาพ (Marshall stability) ที่ดีที่สุด โดยค่าความเสถียรภาพมีการเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดแล้วจึงลดลงมาหลังจากนั้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดสอบในการศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 ระยะ ประกอบด้วย ระยะที่ 1 การทดสอบความหนืดของแอสฟัลท์มาสต์ติกด้วยเครื่อง Rotational viscometer เพื่อพิจารณาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับความหนืดของแอสฟัลท์มาสต์ติกและเพื่อหาอุณหภูมิผสมและบดอัดที่เหมาะสม และระยะที่ 2 การทดสอบ Marshall stability และ Flow เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้ถ้าแกลบและถ้าปาล์มน้ำมันในวิศวกรรมการทาง

3.1 การทดสอบความหนืดของแอสฟัลท์มาสต์ติกด้วยเครื่อง Rotational Viscometer

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุที่สามารถหาได้จากแหล่งในประเทศไทย ซึ่งวัสดุที่เป็นตัวแปรควบคุมในการหาความหนืด คือ แอสฟัลท์ชนิด AC 60-70 สำหรับวัสดุผสมแทรก(Filler) จากฝุ่นหินและฝุ่นวัสดุธรรมชาติแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ซึ่งค่าความหนาแน่น (density) ของฝุ่นแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.1

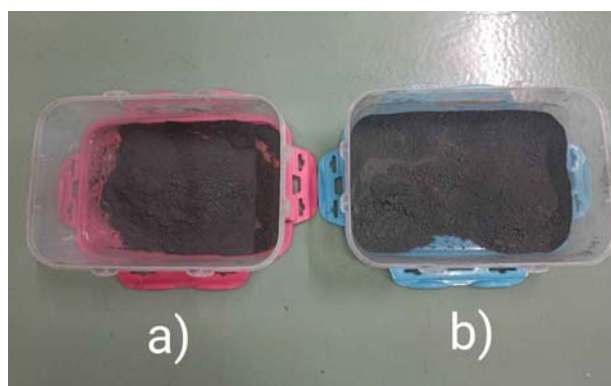
ตารางที่ 3.1 ชนิดของวัสดุผสมแทรก(Filler)ที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวแปร	ชนิดฝุ่น	ความหนาแน่น(กรัม/ซม ³)
ฝุ่นหิน	หินแกรนิต	2.58
	หินปูน	2.62
ฝุ่นวัสดุธรรมชาติ	ถ้าแกลบ	2.67
	ถ้าปาล์มน้ำมัน	2.22

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความหนาแน่นของฝุ่นธรรมชาติจากถ้าแกลบและถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของฝุ่นหินปูนและฝุ่นหินแกรนิต ดังนั้นการใช้ฝุ่นถ้าแกลบและฝุ่นถ้าปาล์มน้ำมันจึงมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักใกล้เคียงกับฝุ่นหิน โดยถ้าแกลบและถ้าปาล์มน้ำมันจะถูกบดอัดให้ละเอียดในรูปฝุ่นผงที่ละเอียดมากขึ้นและทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.75 มิลลิเมตร (เบอร์200) งานวิจัยนี้ใช้อย่างมะตอยชนิด AC 60-70 จากบริษัท ทิปโก้แอสฟัลท์ จำกัด (มหาชน) โดยทางคณะผู้จัดทำได้ออกแบบการทดสอบไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดสอบระยะที่ 1

ตัวแปร	ชนิด
แอสฟัลท์	AC 60-70
ฝุ่นหิน	หินปูน
	หินแกรนิต
ฝุ่นวัสดุธรรมชาติ	เถ้าแกลบ
	เถ้าปาล์มน้ำมัน
อุณหภูมิการทดสอบ	150°C, 160°C, 170°C
อัตราการรอบการหมุน (rpm)	20
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 การผสม	3-5
% โดยปริมาตร	10%, 15%, 20%



รูปที่ 3.1 แสดงฝุ่นจากวัสดุธรรมชาติ โดย a)เถ้าแกลบ b)เถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 3.2 แสดงการทดสอบระยะที่ 1 เนื่องจากมาตรฐาน AASHTO T 316 หรือ ASTM D4402 ซึ่งกำหนดอัตราการหมุนของเครื่อง Rotational viscometer ไว้ที่ 20 รอบต่อนาที และทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาจากงานวิจัยแล้วพบว่า ค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาสดิกที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อทดสอบด้วยความเร็วรอบการหมุนของเครื่องวัดความหนืดที่ต่างกัน ค่าความหนืดจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสมมติฐานที่ว่าความเร็วรอบในการทดสอบเปลี่ยนจะไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดในทุกอุณหภูมิสำหรับการทดสอบแอสฟัลท์มาสดิกจึงเป็นสมมติฐานที่สมเหตุสมผล

3.1.1 ร้อยละโดยปริมาตรของฝุ่นต่อแอสฟัลท์ที่ศึกษา

โดยปกติอัตราส่วนฝุ่นต่อแอสฟัลท์จะอยู่ระหว่าง 0.6-1.6 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฝุ่น หิน โดยอัตราส่วนนี้สามารถแปลงเป็นร้อยละโดยปริมาตรอยู่ที่ประมาณ 20% โดยปริมาตร ด้วยเหตุผลนี้ทาง คณะผู้จัดทำจึงนำค่าความหนืดที่ได้จากการทดสอบแอสฟัลท์มาสถิกผสมฝุ่นหิน 20% โดยปริมาตร มาเปรียบเทียบกับค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาสถิกจากฝุ่นเถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมันที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆเพื่อทดสอบหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาเบื้องต้นสำหรับปริมาณการผสมในการทดสอบของแอสฟัลท์มาสถิกจากฝุ่นเถ้าที่ 10%-30% ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ฝุ่นเถ้าแกลบที่ 20% และฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมันที่ 10% 15% และ 20% แสดงการคำนวณหาปริมาณของฝุ่นเถ้าทั้งสองชนิดได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงการคำนวณหาปริมาณของฝุ่นเถ้าทั้งสองชนิดตามเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลท์

ชนิด	ฝุ่นเถ้าแกลบ	ฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน		
		20	15	10
สัดส่วน (%)	20	20	15	10
SG.of binder (g/cm ³)	1.03	1.03	1.03	1.03
mass of binder (g)	100	100	100	100
volume of binder (cm ³)	97.087	97.087	97.087	97.087
SG.of filler	2.67	2.22	2.22	2.22
mass of Filler (g)	65	54	38	24
volume of filler (cm ³)	24.34	24.32	17.12	10.81
%filler by volume	20.05	20.03	14.99	10.02
%error	0.24	0.17	0.08	0.19

3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำแอสฟัลท์ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
2. นำแอสฟัลท์ที่อบแล้วมาผสมกับฝุ่นตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ในปิกเกอร์ให้เป็นแอสฟัลท์มาสถิก
3. เทแอสฟัลท์มาสถิกลงในหลอดทดลองสำหรับเครื่อง Rotational viscometer จำนวน 3 หลอด
4. นำหลอดแรกมาทดสอบ ระหว่างนั้นให้นำหลอดที่ 2 และ 3 ใส่ไปอบไว้ในเตาที่อุณหภูมิ 160°C

5. เปิดเครื่อง Rotational viscometer และปรับตั้งลูกน้ำให้ฟองอากาศอยู่ตรงกลาง จากนั้นติดตั้ง Cylinder Spindle เบอร์ 21
6. ทดสอบหลอดแรก โดยนำหลอดใส่ลงใน temperature controller ที่ตั้งอุณหภูมิตามกำหนด โดยในการทดสอบครั้งแรกจะใช้ที่ 150°C
7. ตั้งค่าเครื่องให้อ่านค่า Viscosity ชนิด Multipoint Average ทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลารวม 3 นาที ในหน่วย Pa.s
8. เมื่ออุณหภูมิแอสฟัลท์ในหลอดถึงค่าที่กำหนด ให้เริ่มทำการทดสอบ โคนอุณหภูมิการทดสอบ คลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
9. บันทึกค่า Viscosity และ Shear stress ที่ปรากฏบนหน้าจอเครื่อง Rotational viscometer
10. ทำซ้ำขั้นตอน 6 ถึง 9 ที่อุณหภูมิ 160°C และ 170°C
12. บันทึกผล พร้อมเฉลี่ยค่า Viscosity และ Shear stress ของแต่ละความเร็วในแต่ละอุณหภูมิ

3.2 การทดสอบ Marshall Stability และ Flow

ในการมาตรฐานการทดสอบ Marshall Stability และ Flow จำเป็นต้องทำการคำนวณหาอุณหภูมิผสมและบดอัดของแอสฟัลท์คอนกรีตเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยในมาตรฐาน ASTM D2493 ระบุไว้ว่า ค่าความหนืดที่เหมาะสมสำหรับการผสมตัวอย่างยางมะตอยอยู่ในช่วง 0.17 ± 0.02 Pa.s และ ช่วง 0.28 ± 0.03 Pa.s สำหรับการบดอัดตัวอย่าง จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้ทราบว่าคุณสมบัติผสมและอุณหภูมิบดอัด อยู่ในช่วง 140°C ถึง 145°C และ 152°C ถึง 158°C ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 การออกแบบการทดสอบระยะที่ 2

ตัวแปร	ชนิด
แอสฟัลท์	AC 60-70
ฝุ่นหิน	หินปูน
	หินแกรนิต
ฝุ่นธรรมชาติ	เถ้ากลบ
	เถ้าปาล์มน้ำมัน
Asphalt content (%)	4%-6%

%โดยปริมาตรของฝุ่นธรรมชาติ	(เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด)
Gradation ของหิน	(เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุด)
จำนวนตัวอย่างต่อ 1 ชนิดของฝุ่น	3

3.2.1 เครื่องมือสำหรับการทดสอบ Marshall stability และ Flow

1. ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 cm สูง 6.35 cm พร้อมแผ่นรองและส่วนต่อความยาวแม่พิมพ์

2. เครื่องสกัดตัวอย่าง สำหรับสกัดชิ้นงานหลังบดอัดให้ออกจากแม่พิมพ์

3. ค้อนบดอัดที่มีผิวหน้าสัมผัสแบบกลมแบน น้ำหนักเลื่อน 4.5 กิโลกรัม โดยมีระยะตกอิสระ 45 เซนติเมตร

4. ฐานบดอัดประกอบด้วยบล็อกไม้ขนาด 20 × 20 × 45 เซนติเมตร ต่อด้วยแผ่น MS 30 × 30 × 2.5 เซนติเมตร เพื่อยึดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ให้อยู่ในตำแหน่งระหว่างการบดอัด ตัวยึดแม่พิมพ์ประกอบด้วยสปริงซึ่งสปริงได้รับการออกแบบมาเพื่อยึดโมลด์บนฐานของการบดอัด

5. ชิ้นส่วนประกบตัวอย่าง ประกอบไปด้วยส่วนบนและส่วนล่าง เป็นทรงกระบอก มีความโค้งภายในรัศมี 5 เซนติเมตร พร้อมแท่งเสาที่อยู่ในส่วนล่าง สำหรับสอดเข้าไปในรูของส่วนบน เพื่อควบคุมตำแหน่ง

3.2.2 อุปกรณ์

1. เตาอบ

2. อ่างควบคุมอุณหภูมิ

3. เทอร์โมมิเตอร์ที่สามารถวัดได้ถึง 200°C รวมไปถึงอุปกรณ์เบ็ดเตล็ด เช่น ส่วนผสม เครื่องมือผสม ตัวอย่าง ถูมือกั้นความร้อน เป็นต้น

3.2.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบ

1. มวลรวมคละ 1200 กรัม ที่ผสมในสัดส่วนที่ต้องการ นำไปให้ความร้อนในเตาอบ ณ อุณหภูมิผสมที่ออกแบบไว้

2. ใส่แอสฟัลท์ที่อุณหภูมิผสม ในเปอร์เซ็นต์ที่ต่างกัน โดยมีความหนืดอยู่ที่ 170 ±centi-stokes

3. ผสมวัสดุในภาชนะที่มีเครื่องมือควบคุมความร้อน

4. เมื่อผสมเสร็จเรียบร้อย ให้นำกลับเข้าไปในเตาอบ เพื่อให้ความร้อน ณ อุณหภูมิ บดอัด โดยมีความหนืดอยู่ที่ 280 ±30 centi-stokes

5. ผสมลงในแม่พิมพ์มาร์แชลล์ และส่วนผสมจะกระจายไปรอบ ๆ ด้านข้างของ แม่พิมพ์ วางกระดาษกรองอยู่ใต้ตัวอย่างและด้านบนของตัวอย่าง

6. วางแม่พิมพ์ในแท่นบดอัดมาร์แชลล์

7. วัสดุถูกอัดด้วยค้อน 50 ครั้ง (หรือตามที่ระบุ) จากนั้น กลับตัวอย่างและบดอัด อีกด้านหนึ่งด้วยจำนวนการอัดที่เท่ากัน
8. หลังจากบดอัดแม่พิมพ์จะกลับด้าน นำส่วนต่อแม่พิมพ์ และฐานรองออก
9. ทิ้งตัวอย่างให้เย็น และสกัดตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ด้วยเครื่องมือสกัด
10. มวลของตัวอย่างเมื่อชั่งในอากาศ ถูกนำมาใช้ในการหาความหนาแน่น และ ช่องว่างในตัวอย่าง

3.2.4 ขั้นตอนการทดสอบ

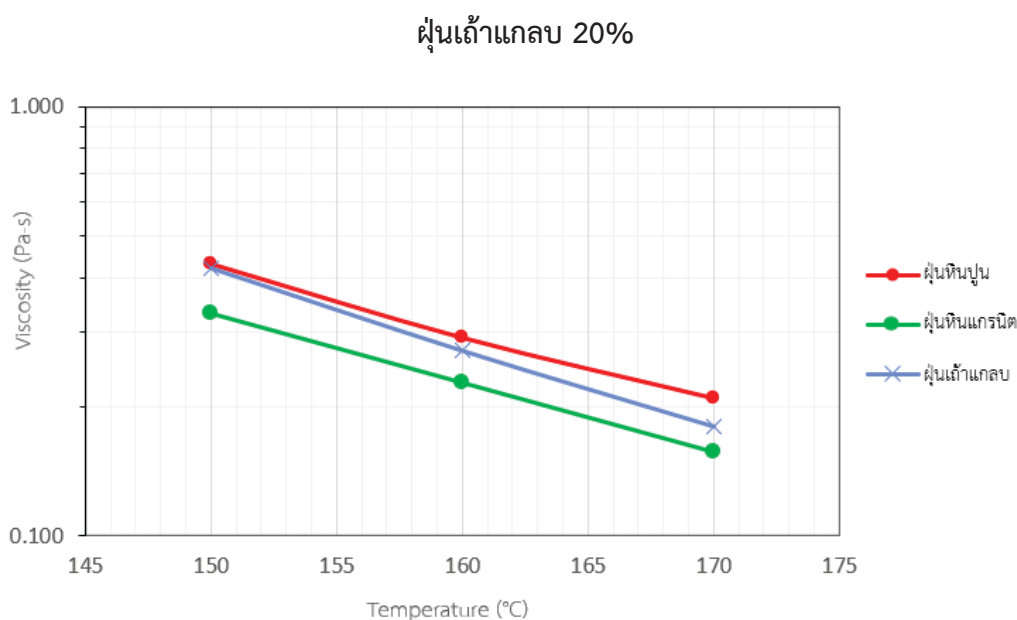
1. ให้ความร้อนตัวอย่าง โดยแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ณ 60 ± 1 °C เป็นเวลา 30 ถึง 40 นาที หรือนำเข้าตู้อบอย่างน้อย 2 ชั่วโมง
2. นำตัวอย่างออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิหรือเตาอบ แล้วนำไปวางในเครื่อง ทดสอบ Marshall
3. ปรับเครื่องทดสอบให้เข้าที่ และปรับให้เครื่อง Marshall อ่านค่าได้เป็นศูนย์
4. กดตัวอย่างในอัตรา 50 มิลลิเมตรต่อนาทีจนกว่าจะได้ค่าน้ำหนักกดสูงสุด
5. บันทึกน้ำหนักกดสูงสุดในหน่วยนิวตันหรือปอนด์ และการไหลในหน่วย มิลลิเมตร ที่อ่านได้จากเครื่อง

บทที่ 4

ผลการวิจัย

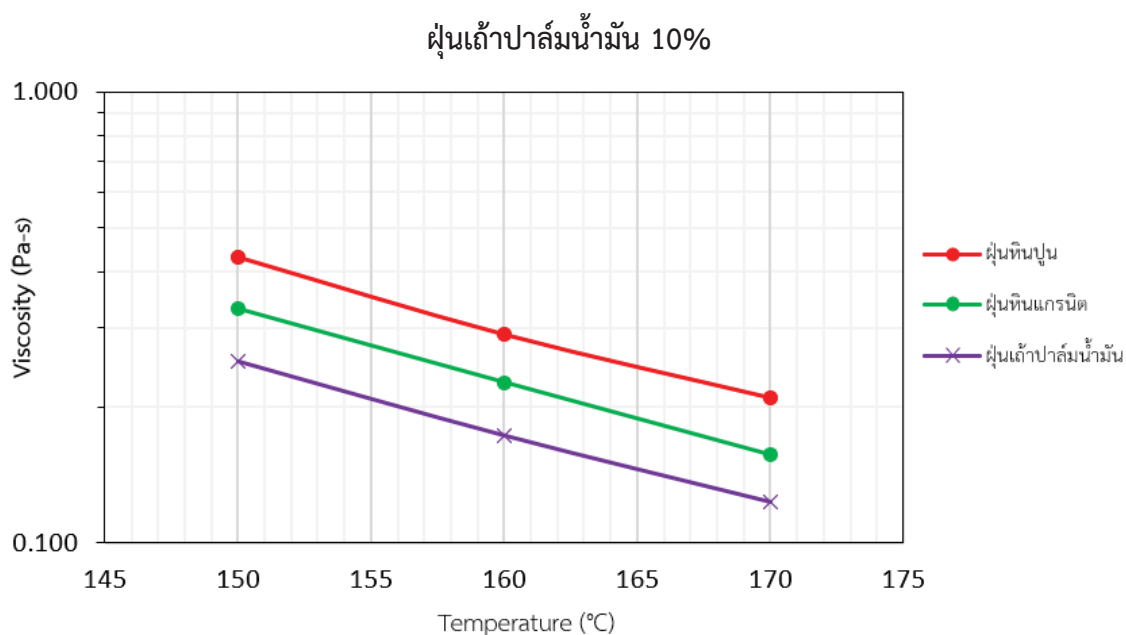
4.1 ผลการทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Rotational viscometer

ผลการทดสอบความหนืดด้วยเครื่อง Rotational viscometer ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด(Pa.s) และอุณหภูมิของแอสฟัลท์มาสต์ติก($^{\circ}\text{C}$) ที่มีชนิดและสัดส่วนของฝุ่นแตกต่างกัน โดยในการทดสอบพบว่าได้ค่าเฉลี่ยของค่าความหนืดในช่วงที่เหมาะสมที่สุดคือ ฝุ่นเถ้าแกลบที่20% แสดงดังรูปที่ 4.1

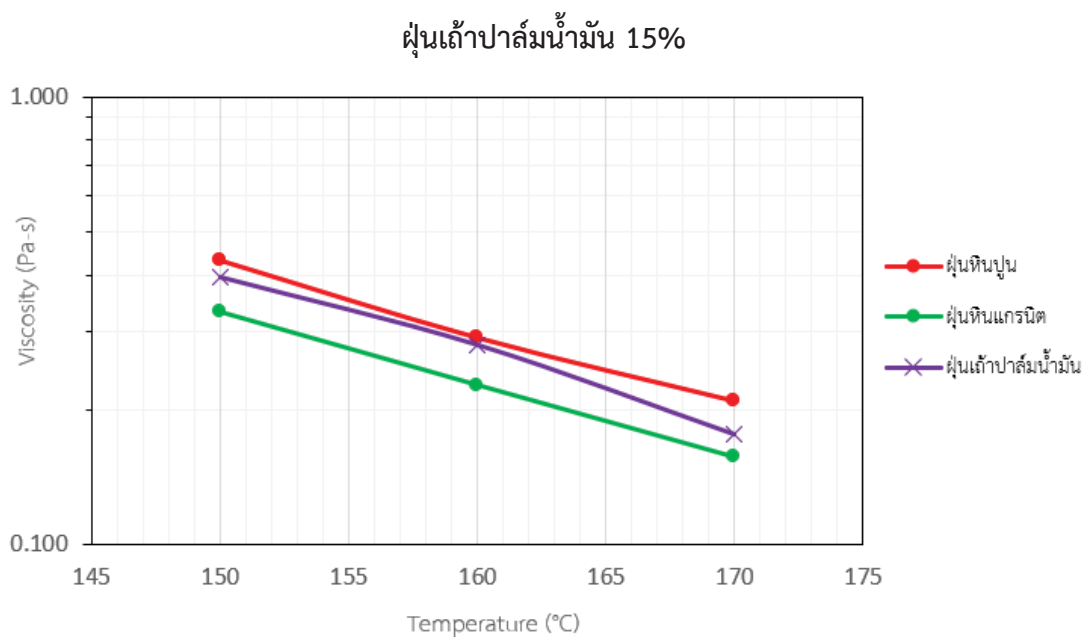


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าแกลบ20% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน20%และฝุ่นหินแกรนิต 20%

ในการทดสอบหาค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational viscometer สำหรับฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมันได้เริ่มทำการทดสอบที่ 10% 15% และ 20% ตามลำดับ และได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 ,4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

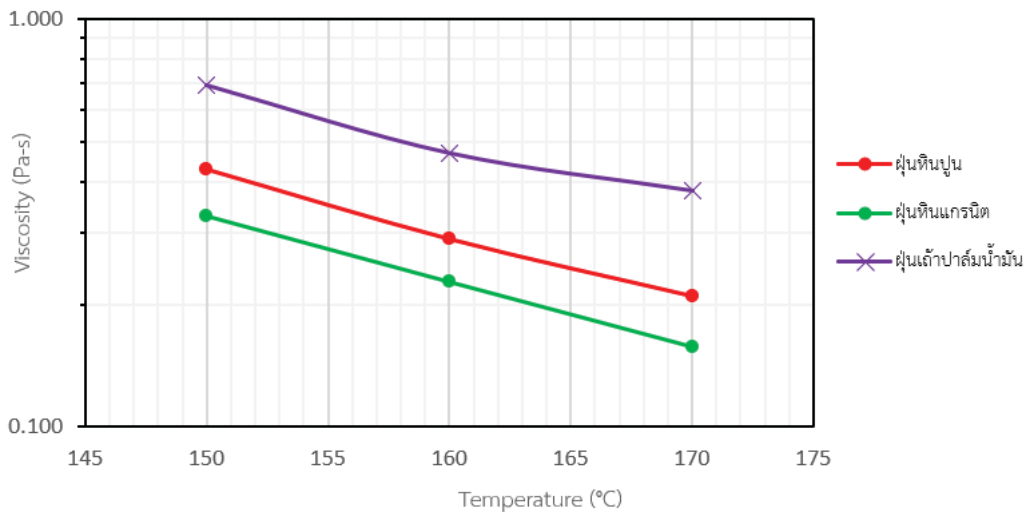


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน 20% และฝุ่นหินแกรนิต 20%



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 15% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน 20% และฝุ่นหินแกรนิต 20%

ฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 20%



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% เปรียบเทียบกับฝุ่นหินปูน 20% และฝุ่นหินแกรนิต 20%

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาสดิกที่ผสมฝุ่นเถ้ากลบ 20% กับอุณหภูมิทดสอบ และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาสดิกที่ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 15% กับอุณหภูมิทดสอบ พบว่า มีค่าความหนืดอยู่ระหว่างแอสฟัลท์มาสดิกที่ผสมฝุ่นหินปูนและฝุ่นหินแกรนิตที่ 20% จึงถือว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด จากการศึกษาวิจัยพบว่าปริมาณของฝุ่นหินที่ผสมลงไป ในแอสฟัลท์สามารถส่งผลถึงค่าความหนืดของแอสฟัลท์ได้ เมื่อความหนืดของแอสฟัลท์เกิดการเปลี่ยนแปลงจึงจำเป็นต้องทำการคำนวณหาอุณหภูมิผสมและบดอัดสำหรับการใช้ฝุ่นเถ้ากลบและฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยสามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาสดิกและอุณหภูมิทดสอบ จากนั้นพิจารณาที่ช่วงค่าความหนืด 0.17 ± 0.02 Pa·s สำหรับอุณหภูมิผสมและที่ช่วงค่าความหนืด 0.28 ± 0.03 Pa·s สำหรับอุณหภูมิบดอัด แสดงค่าของอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงอุณหภูมิผสมและบดอัดของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสม filler แต่ละชนิดตามสัดส่วนที่แตกต่างกัน

Filler	Mixing temperature (°C)	Compaction temperature (°C)
หินแกรนิต 20%	166.38	152.89
หินปูน 20%	175.22	160.96
เถ้ากลบ 20%	176.49	164.20
เถ้าปาล์มน้ำมัน 15%	169.75	159.32

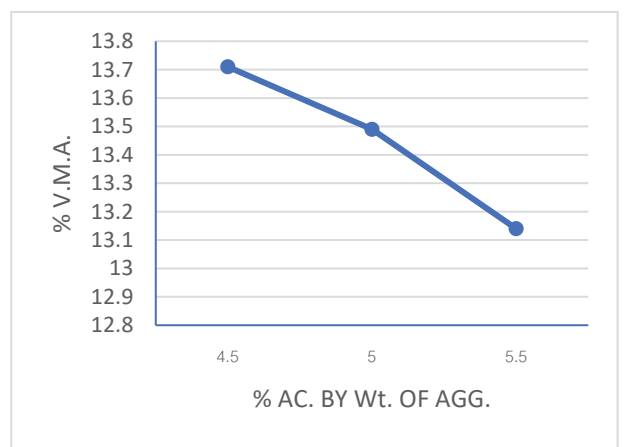
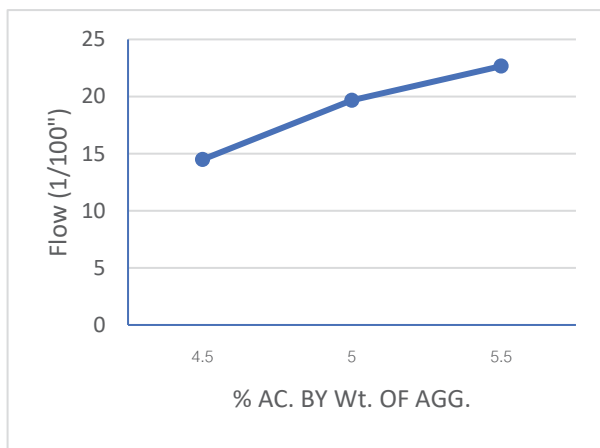
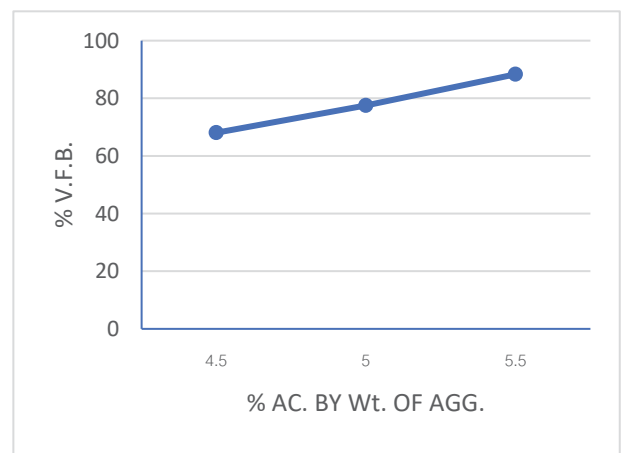
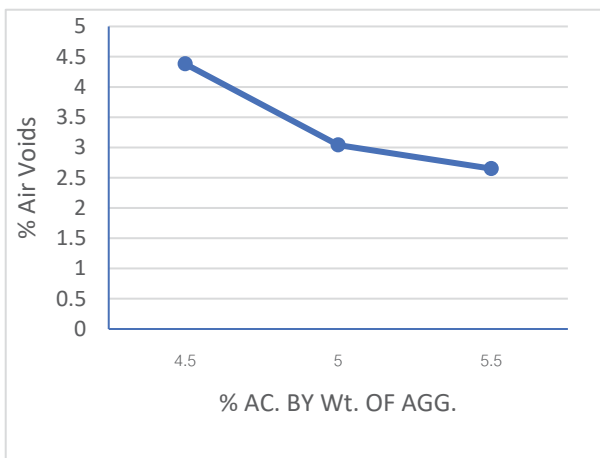
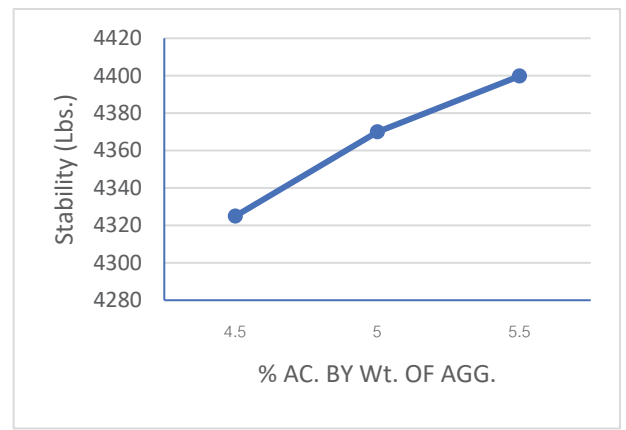
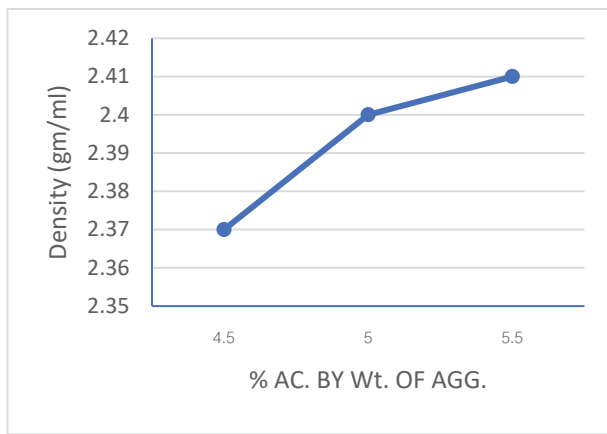
4.2 ผลการทดสอบ Marshall stability และ Flow

การนำค่าอุณหภูมิจากการทดสอบความเหนียวของแอสฟัลท์มาสถิติมาพิจารณาในขั้นตอนการผสมและบดอัด จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่าจะช่วยเพิ่มค่าเสถียรภาพให้แก่แอสฟัลท์คอนกรีต ดังนั้นการผสมและบดอัดแอสฟัลท์คอนกรีตใช้อุณหภูมิจากแอสฟัลท์มาสถิติของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าแกลบ 20% และเถ้าปาล์ม น้ำมัน 15% ที่มีค่าความเหนียวเหมาะสมในการผสมและบดอัดแอสฟัลท์คอนกรีต จึงใช้อุณหภูมิที่ได้จากตารางที่ 4.1 ในการผสมและบดอัดแอสฟัลท์คอนกรีตผสมฝุ่นเถ้าแกลบ 20% คือ 176.49 °C และ 164.20 °C ตามลำดับและการผสมและบดอัดแอสฟัลท์คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน 15% คือ 169.75 °C และ 159.32 °C

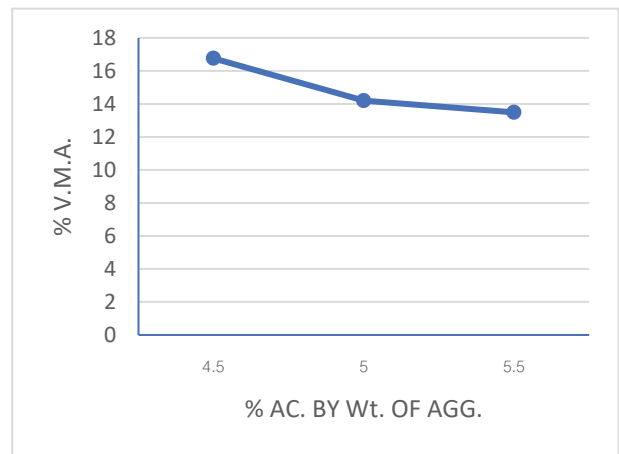
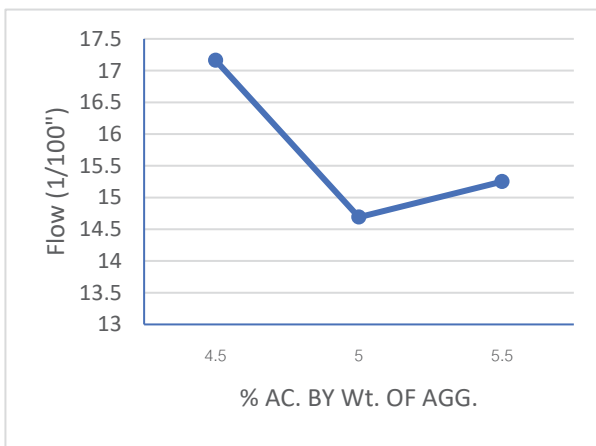
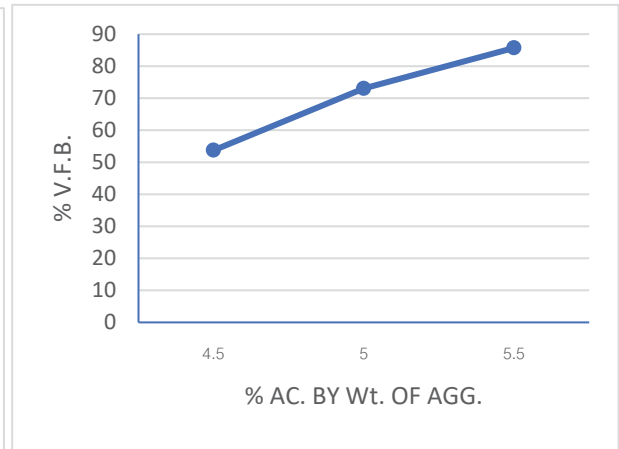
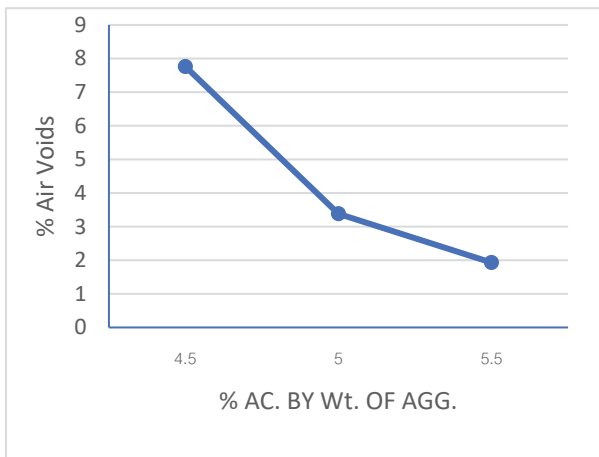
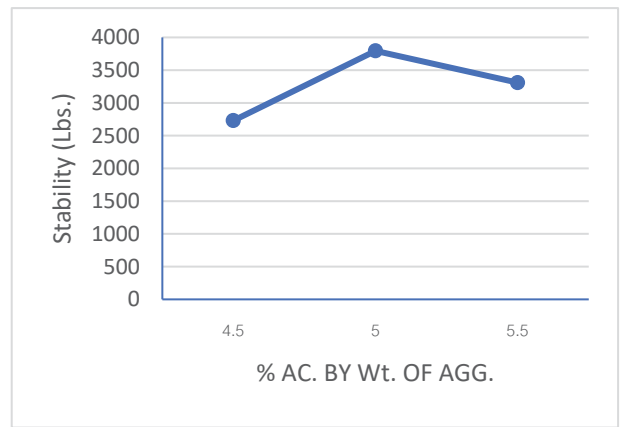
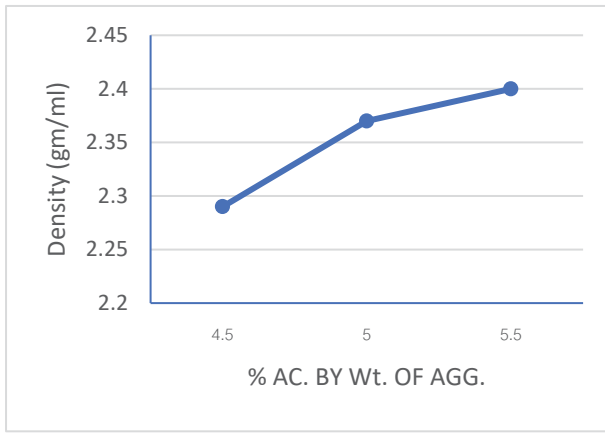
การทดสอบครั้งนี้กำหนดปริมาณยางมะตอยที่ใช้ คือ 4.5%, 5.0% และ 5.5% ต่อปริมาตรของมวลรวม ที่ใช้ 1,200 กรัม และใช้ขนาดคละของมวลรวมสำหรับชั้นพื้นทาง Wearing Course

ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร (นิ้ว)	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19.0 (3/4)	25.0 (1)
สำหรับชั้นทาง		Wearing Course	Wearing Course	Binder Course	Base Course
ความหนา (มิลลิเมตร)		25-35	40-70	40-80	70-100
ขนาดตะแกรง มิลลิเมตร (นิ้ว)		ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล			
37.5	(1 ½)				100
25.0	(1)			100	90-100
19.0	(3/4)		100	90-100	-
12.5	(1/2)	100	80-100	-	56-80
9.5	(3/8)	90-100	-	56-80	-
4.75	(เบอร์ 4)	55-85	44-74	35-65	29-59
2.36	(เบอร์ 8)	32-67	28-58	23-49	19-45
1.18	(เบอร์ 16)	-	-	-	-
0.600	(เบอร์ 30)	-	-	-	-
0.300	(เบอร์ 50)	7-23	5-21	5-19	5-17
0.150	(เบอร์ 100)	-	-	-	-
0.075	(เบอร์ 200)	2-10	2-10	2-8	1-7
ปริมาณแอสฟัลท์ซีเมนต์ ร้อยละ โดยมวลของมวลรวม		4.0-8.0	3.0-7.0	3.0-6.5	3.0-6.0

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดคละของมวลรวม และปริมาณแอสฟัลท์ซีเมนต์ที่ใช้โดยปริมาณของมวลรวม



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า Density, % Air voids, Flow, Stability, % V.F.B, %V.M.A. ของแอสฟัลท์คอนกรีตผสมฝุ่นจากเถ้าแกลบ และใช้ปริมาณยาง 4.5%, 5.0% และ 5.5% ต่อปริมาตรของมวลรวม



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า Density, % Air voids, Flow, Stability, % V.F.B, %V.M.A. ของแอสฟัลท์คอนกรีตผสมฝุ่นจากเถ้าปาล์มน้ำมัน และใช้ปริมาณยาง 4.5%, 5.0% และ 5.5% ต่อปริมาตรของมวลรวม

หลักเกณฑ์ในการพิจารณาอันดับแรก คือ Air Void (%) ค่าที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 3-5% โดยปริมาณยางที่ใช้ คือ 4.5% 5.0% 5.5% ต่อปริมาตรของมวลรวม ผลที่ได้แอสฟัลท์คอนกรีตผสมเถ้าแกลบใช้ปริมาณยางที่เหมาะสมคือ 4.5% ส่วนแอสฟัลท์คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มใช้ปริมาณยางคือ 5.0% เพื่อให้ค่า Air Void ที่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จากนั้นพิจารณา Stability และ Flow

เสถียรภาพ (Stability) ในเกณฑ์ของชั้นทาง Wearing course คือ 1,800 ปอนด์ ผลที่ได้ค่าเฉลี่ยที่ได้จากแอสฟัลท์คอนกรีตผสมเถ้าแกลบคือ 4,324.95 ปอนด์ และค่าเฉลี่ยที่ได้จากแอสฟัลท์คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันคือ 3,794.17 ปอนด์ ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

การไหล (Flow) ค่าที่เหมาะสมคือ 8-16 ในหน่วย 0.25 mm ผลที่ได้จากแอสฟัลท์คอนกรีตผสมเถ้าแกลบคือ 14.49 (0.25 mm) และค่าเฉลี่ยที่ได้จากแอสฟัลท์คอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันคือ 14.69 (0.25 mm) ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ผลการทดสอบ	แอสฟัลท์คอนกรีตผสมฝุ่นเถ้าแกลบ และใช้ปริมาณยาง 4.5%	แอสฟัลท์คอนกรีตผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน และใช้ปริมาณยาง 5.0%
Air Void (%)	4.38	3.83
Stability (lbf)	4,324.95	3,794.17
Flow (0.25 mm)	14.49	14.69

ตารางที่ 4.3 แสดงผล % Air voids, Flow และ Stability ของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสมฝุ่นจากเถ้าแกลบใช้ปริมาณยาง 4.5% และแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันใช้ปริมาณยาง 5.0%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้คณะผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้ฝุ่นจากถ้ำเกลือและถ้ำปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของเกลือและปาล์มน้ำมัน โดยฝุ่นที่นำมาทดลองต้องมีการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เป็นการศึกษาผลกระทบจากการใช้ฝุ่นธรรมชาติต่อประสิทธิภาพของแอสฟัลท์คอนกรีต ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานไว้ว่าสามารถช่วยเพิ่มความหนืดและประสิทธิภาพของแอสฟัลท์คอนกรีตได้ เพื่อให้เป็นวัสดุทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพแอสฟัลท์คอนกรีตนอกจากฝุ่นหินแกรนิตและฝุ่นหินปูน โดยทางผู้วิจัยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวัดความหนืดของแอสฟัลท์มาستيكโดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบหมุน (Rotational Viscometer) และการทดสอบเสถียรภาพของมาร์แชล (Marshall Stability) โดยสรุปได้ ดังนี้

1. ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาستيكที่ผสมฝุ่นที่ได้จากถ้ำเกลือในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตรของแอสฟัลท์ และถ้ำปาล์มน้ำมันในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยปริมาตรของแอสฟัลท์ จะให้ค่าความหนืดอยู่ในช่วงของการใช้ฝุ่นหินปูนและฝุ่นหินแกรนิตที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตรของแอสฟัลท์สำหรับในทุกอุณหภูมิ ซึ่งเป็นช่วงค่าความหนืดที่เหมาะสมที่สุด

2. ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าจากการทดสอบ Marshall Stability ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานชั้นผิวทาง Wearing course โดยเสถียรภาพของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสมฝุ่นธรรมชาติมีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดเมื่อทำการผสมและบดอัดตามค่าอุณหภูมิที่หาได้จากการทดสอบหาค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาستيك

การศึกษารูปลักษณ์ได้ว่า ความหนืดของแอสฟัลท์มีความสำคัญต่อการทำงาน (Workability) ของส่วนผสมแอสฟัลท์ จากการทดสอบหาค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาستيك เมื่อนำฝุ่นจากถ้ำเกลือและถ้ำปาล์มน้ำมันมาผสมกับแอสฟัลท์สามารถช่วยเพิ่มความหนืดให้กับแอสฟัลท์ได้ และเมื่อทำการทดสอบหาเสถียรภาพด้วยวิธีการทดสอบ Marshall Stability มีค่า Flow ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าเสถียรภาพของแอสฟัลท์ที่ผสมกับฝุ่นถ้ำเกลือและฝุ่นถ้ำปาล์มน้ำมันมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานของชั้นทางแบบ Wearing course ซึ่งแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสมกับฝุ่นจากถ้ำเกลือมีค่าเสถียรภาพมากกว่าแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสมกับฝุ่นถ้ำปาล์มน้ำมัน จึงกล่าวได้ว่าฝุ่นที่ได้จากถ้ำปาล์มน้ำมันและถ้ำเกลือเป็นวัสดุที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแอสฟัลท์ได้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำวิจัยครั้งนี้ มีการทดสอบเฉพาะ Viscosity Test และ Marshall Stability ซึ่งในอนาคตควรมีการทดสอบคุณภาพของแอสฟัลท์เพิ่มเติม โดยเฉพาะการศึกษาคุณสมบัติการไหลของยางแอสฟัลท์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร(เถ้าแกลบและเถ้าปาล์มน้ำมัน) เช่น การทดสอบเพนเนทเทรชัน (Penetration), การทดสอบค่าความยืดหยุ่นกลับ (Elastic Recovery), การทดสอบจุดอ่อนตัว (Softening Point), การทดสอบความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature Susceptibility), การทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุภายใต้แรงกระทำ (Stiffness) เป็นต้น รวมถึงควรมีการทดสอบ Long term aging และ Short term aging เพื่อศึกษาระยะเวลาการใช้งานของแอสฟัลท์คอนกรีตที่ผสมกับฝุ่นเถ้าแกลบและฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน เนื่องจากวัสดุที่นำมาผสมกับแอสฟัลท์เป็นวัสดุที่ได้มาจากธรรมชาติ ซึ่งอาจจะเกิดการย่อยสลายได้ในอนาคตจึงควรมีการทดสอบ Long term aging และ Short term aging เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของแอสฟัลท์ต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

Sargin,S. et al. **Evolution of stone mastic asphalt using Rice husk ash (RHA) as filler material.** Construction and Building Materials 48 (2013) 390–397

Kamaluddin,N. **Evolution of stone mastic asphalt using plam oil fuel ash(POFA) as filler material.** Universiti Teknologi Malaysia. 2008.

Bahia HU, Hanson DI, Zeng M. **Characterization of modified asphalt binder in Superpave mix design.** NCHRP report 459. Washington DC (USA): National Academy Press; 2001.

World Road Association (PIARC). **Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in pavement applications.** In: International workshop on modified bitumens, Rome (Italy); 1998.

Brown ER. **Experience with stone matrix asphalt in the United States.** NCAT Report no. 93-04. 1992.

Mallick RB, Kandhal PS, Cooley Jr LA, Watson DE. **Design, construction and performance of new-generation open-graded friction course.** NCAT Report no.2000-01. 2000.

M.Crispino, E.Mariani, E.Toraldo, **Assessment of fiber-reinforced bituminous mixtures' compaction temperatures through mastics viscosity tests,** Construction and Building Materials 38 (2013) 1031–1039

Hensley, J., Palmer, A., **Establishing Hot Mix Asphalt Mixing and Compaction Temperatures at the Project Level,** Asphalt Institute, Vol. 12, 1998.

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์มาستيكจากเครื่องRotational Viscometer

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นหินปูน 20% โดยปริมาตร

Test at	150°C			160°C			170°C		
Speed (rpm)	20			20			20		
Sample	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Viscosity (Pa-s)	0.43	0.43	0.43	0.29	0.29	0.29	0.21	0.21	0.21
Torque	17.1%	17.2%	17.3%	11.6%	11.4%	11.5%	8.2%	8.3%	8.2%
Shear Stress (dyne/cm ²)	79.52	79.98	80.45	5394.00	53.01	53.48	38.13	38.60	38.13
Average Viscosity	0.430			0.290			0.210		
Average Torque	17.20%			11.50%			8.23%		
Average Shear Stress	79.98			83.48			38.29		

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นหินแกรนิต 20% โดยปริมาตร

Test at	150°C			160°C			170°C		
Speed (rpm)	20			20			20		
Sample	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Viscosity (Pa-s)	0.37	0.32	0.30	0.25	0.22	0.21	0.16	0.16	0.15
Torque	14.7%	12.7%	12.1%	9.8%	8.8%	8.2%	6.3%	6.2%	6.1%
Shear Stress (dyne/cm ²)	38.36	59.06	56.27	45.57	40.92	38.13	29.30	28.83	28.36
Average Viscosity	0.330			0.227			0.157		
Average Torque	13.17%			8.93%			6.20%		
Average Shear Stress	61.23			41.54			28.83		

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าแกลบ 20% โดยปริมาตร

Test at (°C)	150			160			170		
Speed (rpm)	20			20			20		
Sample	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Viscosity (Pa-s)	0.42	0.59	0.50	0.27	0.38	0.33	0.18	0.26	0.23
Torque	16.8%	23.5%	19.8%	10.6%	15.2%	13.3%	7.1%	10.5%	9.3%
Shear Stress (dyne/cm ²)	78.12	109.30	92.07	49.29	70.68	61.85	33.02	48.83	43.25
Average Viscosity	0.50			0.33			0.22		
Average Torque	0.20			0.13			0.09		
Average Shear Stress	93.16			60.61			41.70		

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้ากลบ 20% โดยปริมาตร (ต่อ)

Test at (°C)	150			160			170		
Speed (rpm)	20			20			20		
Sample	4	5		4	5		4	5	
Viscosity (Pa-s)	0.58	0.70		0.38	0.44		0.26	0.28	
Torque	23.2%	28.0%		15.0%	17.5%		10.2%	11.2%	
Shear Stress (dyne/cm ²)	107.90	130.20		69.75	81.38		47.43	52.08	
Average Viscosity	0.64			0.41			0.27		
Average Torque	0.26			0.16			0.11		
Average Shear Stress	119.05			75.57			49.76		

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 10% โดยปริมาตร

Test at	150°C			160°C			170°C		
Speed (rpm)	20			20			20		
Sample	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Viscosity (Pa-s)	0.25	0.26	0.25	0.17	0.18	0.17	0.12	0.13	0.12
Torque	10.0%	10.4%	10.0%	6.6%	7.2%	6.7%	4.7%	5.2%	4.8%
Shear Stress (dyne/cm ²)	46.50	48.36	46.65	30.69	33.48	31.16	21.86	24.18	22.32
Average Viscosity	0.25			0.17			0.12		
Average Torque	0.10			0.07			0.05		
Average Shear Stress	47.17			31.78			22.79		

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 15% โดยปริมาตร

Test at	150°C			160°C			170°C		
Speed (rpm)	20			20			20		
Sample	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Viscosity (Pa-s)	0.36	0.43	0.40	0.24	0.32	0.28	0.16	0.20	0.17
Torque	14.2%	17.3%	15.9%	9.4%	11.4%	10.4%	6.5%	7.8%	6.8%
Shear Stress (dyne/cm ²)	66.03	80.45	73.30	43.71	53.01	58.13	30.23	36.27	32.45
Average Viscosity	0.40			0.28			0.18		
Average Torque	0.16			0.10			0.07		
Average Shear Stress	73.26			51.62			32.98		

ตารางบันทึกค่าความหนืดของแอสฟัลท์ผสมฝุ่นเถ้าปาล์มน้ำมัน 20% โดยปริมาตร

Test at	150°C			160°C			170°C		
Speed (rpm)	20			20			20		
Sample	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Viscosity (Pa-s)	0.69	0.71	0.83	0.47	0.47	0.51	0.38	0.32	0.34
Torque	27.5%	28.5%	33.2%	18.6%	18.9%	20.3%	15.1%	12.9%	13.5%
Shear Stress (dyne/cm ²)	127.90	132.50	154.40	86.49	87.88	94.40	70.22	59.98	62.78
Average Viscosity	0.74			0.48			0.35		
Average Torque	0.30			0.19			0.14		
Average Shear Stress	138.27			89.59			64.33		

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกค่าจากการทดสอบ Marshall Stability

Type : ฝ้าแกลลล Rice husk ash (RHA)

Pen.grade : AC 60-70

Avg.Sp.Gr.Agg and Filler (Gag) : 2.63

Sp.Gr.Ac (Gac) : 1.03

Compaction number of blows each end : 75

Bitumen Absorption (x) : 0.266

NO. OF SAMPLE	1	2	3	4	5	6
%AC by weight of agg. (a)	4.50			5.00		
Bitumen (gm)	54.00			60.00		
%AC by weight of Mix. (b)	4.31			4.76		
%Eff.AC by weight of mix (c)	4.051			4.508		
Spec.Hgt (mold) ln(d)	2.50			2.50		
DENSITY						
Wt. in air gm (e)	1233.00	1237.00	1232.00	1244.00	1238.00	
Wt. sat. surface dry gm (f)	1236.00	1242.00	1240.00	1247.00	1242.00	
Wt. in water gm. (g)	717.00	721.00	719.00	728.00	722.00	
Bulk Volume (h)	519.00	521.00	521.00	519.00	520.00	
Bulk Density (i)	2.38	2.37	2.36	2.40	2.38	
AVERAGE DENSITY						
Volume AC %Total (j)	9.34	9.34	9.30	10.49	10.42	
Volume Agg %Total (k)	86.44	86.39	86.04	86.80	86.21	
VMA % (l)	13.56	13.61	13.96	13.20	13.79	
Air void % (m)	4.21	4.27	4.66	2.71	3.37	
VFB % (n)	68.92	68.62	66.63	79.47	75.58	
STABILITY						
Meas. Lbs.	4814.27	4449.23	4215.37	4116.17	4987.87	
Adjust Lbs.	4621.70	4137.78	4215.37	3951.52	4788.36	
AVERAGE STABILITY	4324.95			4369.94		
FLOWS						
Meas. (mm)	3.756	3.228	4.054	4.908	5.083	
Meas. 1/100"	14.787	12.709	15.961	19.323	20.012	
AVERAGE FLOWS	14.486			19.67		

Type : เถ้าปาล์มน้ำมัน Palm oil fuel ash (POFA)

Pen.grade : AC 60-70

Avg.Sp.Gr.Agg and Filler (Gag) : 2.63

Sp.Gr.Ac (Gac) : 1.03

Compaction number of blows each end : 75

Bitumen Absorption (x) : 0.266

NO. OF SAMPLE	1	2	3	4	5	6
%AC by weight of agg. (a)	4.50			5.00		
Bitumen (gm)	54.00			60.00		
%AC by weight of Mix. (b)	4.31			4.76		
%Eff.AC by weight of mix (c)	4.051			4.508		
Spec.Hgt (mold) ln(d)	2.50			2.50		
DENSITY						
Wt. in air gm (e)	1224.00	1226.00	1240.00	1248.00	1243.00	1236.00
Wt. sat. surface dry gm (f)	1231.00	1234.00	1252.00	1256.00	1250.00	1243.00
Wt. in water gm. (g)	692.00	700.00	712.00	731.00	725.00	720.00
Bulk Volume (h)	539.00	534.00	540.00	525.00	525.00	523.00
Bulk Density (i)	2.27	2.30	2.30	2.38	2.37	2.36
AVERAGE DENSITY						
2.29			2.37			
Volume AC %Total (j)	8.93	9.03	9.03	10.40	10.36	10.34
Volume Agg %Total (k)	82.63	83.54	83.55	86.08	85.74	85.58
VMA % (l)	17.37	16.46	16.45	13.92	14.26	14.42
Air void % (m)	8.44	7.43	7.42	3.51	3.90	4.08
VFB % (n)	51.41	54.85	54.91	74.76	72.66	71.73
STABILITY						
Meas. Lbs.	3557.66	2797.64	2846.24	4208.61	4031.95	3862.95
Adjust Lbs.	3166.32	2489.90	2533.15	4040.27	3749.71	3592.54
AVERAGE STABILITY						
2729.79			3794.17			
FLOWS						
Meas. (mm)	4.763	4.125	4.188	3.094	3.596	4.505
Meas. 1/100"	18.752	16.240	16.488	12.181	14.157	17.736
AVERAGE FLOWS						
17.16			14.69			