

การประเมินอิทธิพลของ Rigden Void ของฟิลเลอร์ต่อความต้านทานความเสียหายจากความชื้นของ
ส่วนผสมยางมะตอย

INVESTIGATING THE INFLUENCE OF RIGDEN VOID OF FILLERS ON THE MOISTURE DAMAGE
OF ASPHALT MIXTURES



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATING THE INFLUENCE OF RIGDEN VOID OF FILLERS ON THE MOISTURE DAMAGE
OF ASPHALT MIXTURES

Jirat Wuttisombatjaroen



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินอิทธิพลของ Rigden Void ของฟิลเลอร์ต่อความต้านทาน ความเสียหายจากความชื้นของส่วนผสมยางมะตอย
นักศึกษา	นาย จิรัฐ วุฒิสสมบัติเจริญ
รหัสประจำตัว	64601027
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปรีดา จตุรพงศ์

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงความเสียหายที่เกิดจากความชื้นและการสูญเสียการยึดเกาะเป็นปัจจัยสำคัญในการเสื่อมสภาพของผิวทางของยางมะตอยซึ่งมักจะเกิดจากการสะสมของความชื้นที่มากเกินไปเนื่องจากสภาพอากาศที่แปรปรวนทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างระหว่างผิวทางยางมะตอยและมวลรวมซึ่งส่งผลให้พันธะของแอสฟัลต์อ่อนตัวลงและจากการศึกษาพบว่าค่า Rigden voids(RV) เป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินความไวต่อความเสียหายจากความชื้นของแอสฟัลต์แมสติก (Asphalt mastic) อย่างไรก็ตามได้มีการวิจัยว่าสารตัวเติมจากธรรมชาติมีความสามารถในการใช้ทดแทนได้ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่าการใช้สารตัวเติมแต่ละชนิดที่แตกต่างกันรวมถึงการใช้สารตัวเติมจากวัสดุธรรมชาติเหลือทิ้งเช่นขุยมะพร้าวและกากอ้อยว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์และความเสียหายจากความชื้นอย่างไร จากผลลัพธ์ของการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าค่า Rigden voids(RV) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับขนาดรูพรุน(Pore size) และมีความสัมพันธ์เชิงลบกับพื้นที่ผิว(Surface area) จากการศึกษาพบว่าถ้ามีขนาดของรูพรุนมากจะส่งผลให้ค่า Rigden voids(RV) สูงขึ้นด้วยและในขณะที่พื้นที่ผิว(Surface area)มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Rigden voids(RV) ลดลง จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าหินปูนมีค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden voids(RV) สูงที่สุดเนื่องจากมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่และพื้นที่ผิวดำ ในการวิจัยครั้งนี้ยังได้ศึกษา contact parameters ระหว่างแอสฟัลต์กับสารตัวเติมแต่ละชนิดซึ่งเผยให้เห็นปฏิกิริยาที่ต่างกันอย่างชัดเจนตามประเภทของสารตัวเติมและชนิดของแอสฟัลต์. การทดสอบความเสียหายจากความชื้นแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมทั้งหมดทั้งประเภท Dense Grade และ Porous Grade สามารถต้านทานความเสียหายจากความชื้นได้ดี จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า

Rigden voids(RV) และความเสียหายจากความชื้นส่งผลที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของแอสฟัลต์และการกระจายขนาดของมวลรวม

Thesis	Investigating the Influence of Rigden Void of Fillers on the Moisture Damage of Asphalt Mixtures
Student	Mr. Jirat Wuttisombatjaroen
Student ID.	64601027
Degree	Master of Engineering
Program	Civil Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr Preeda Chaturabong

Abstract

Moisture damage and bond loss are major factors in pavement degradation, often stemming from excessive moisture accumulation due to weather events. Water infiltrates the gap between asphalt binder and aggregate, weakening the asphalt bond. Rigden Void (RV) has emerged as a crucial parameter in assessing the susceptibility of asphalt mastic-aggregate systems to moisture-induced damage. However, numerous waste natural fillers have been researched as potential aggregate filler replacements, yet their role in moisture damage remains unexplored. Therefore, this study aimed to understand how different fillers, including waste natural materials like coconut peat and bagasse, affect asphalt mixture performance and moisture damage. Results showed that Rigden Voids were positively correlated with pore size and negatively correlated with surface area. Larger pores contributed to higher Rigden Voids, while greater surface areas led to lower values. Limestone had the highest Rigden Void percentage due to its larger pore size and lower surface area. The research also explored contact parameters between fillers and asphalt, revealing varying interactions based on filler and asphalt types. Moisture damage testing demonstrated that all mixtures, both dense and porous, displayed good resistance to moisture damage. The correlation analysis between Rigden Voids and moisture damage revealed varying degrees of influence, dependent on asphalt type and aggregate gradation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords: Rigden Void; Moisture Damage; Fillers; Image Processing; Analysis System



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปรีดา จาตุรพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ชี้แจงช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บริษัท ทิปโก้แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน) ที่ได้มอบยางมะตอย เพื่อให้ข้าพเจ้าได้ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ โรงโม่หินเทพศิลา ชลบุรี ที่ได้มอบมวลรวมชนิดหินปูน ให้แก่ข้าพเจ้าเพื่อใช้ในการทดลอง
สุดท้ายต้องขอขอบคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาด้านการเงิน และให้กำลังใจข้าพเจ้าเสมอมา

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จาก กองทุนวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

จิรัฐ วุฒิสมบัติเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	IX
สารบัญ(ต่อ).....	XI
สารบัญ(ต่อ).....	XII
สารบัญภาพ.....	XIII
สารบัญภาพ(ต่อ).....	XIV
สารบัญตาราง.....	XV
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2.....	5
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 นิยามแอสฟัลต์ (Asphalt).....	5
2.1.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement).....	5
2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์ (Asphalt Physical Properties).....	5
2.2.1 ความทนทาน (Durability).....	6
2.2.2 การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปและการไหล (Rheology).....	6
2.2.3 ความปลอดภัย (Safety).....	6
2.2.4 ความบริสุทธิ์ (Purity).....	6
2.3 ระบบการคัดเกรดของแอสฟัลต์ (Grading System).....	6
2.3.1 การคัดเกรดจากผลของการเจาะ (Penetration Grading).....	7
2.3.2 การคัดเกรดจากผลของความหนืด (Viscosity Grading).....	7
2.3.3 ระบบการคัดเกรดแบบ Superpave (Superpave Performance Grading(PG) System).....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4	แอสฟัลต์ที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติ (Asphalt Binder Modifiers).....	8
2.5	แอสฟัลต์รูปแบบอื่นที่ใช้ในการปูพื้น (Other Forms of Asphalt Used in Paving).....	9

สารบัญ(ต่อ)

2.6	Mastic.....	9
2.6.1	คุณสมบัติของส่วนประกอบ mastic (Properties of the mastic constituents).....	10
2.6.1.1	คุณสมบัติทางกายภาพของฟิลเลอร์ (Physical properties of the filler).....	10
2.6.1.2	คุณสมบัติทางเคมีของฟิลเลอร์ (Chemical properties of the filler).....	16
2.6.2	Asphalt mixtures.....	19
2.7	ความไวต่อความชื้น (Moisture Susceptibility).....	19
2.8	ความเสียหายจากความชื้น (Moisture damage).....	20
2.9	อิทธิพลของความชื้นที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของผิวทาง (Moisture Effect on Pavement Performance).....	22
2.10	การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว (Failure).....	22
2.10.1	การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในของแอสฟัลต์ (Loss of Cohesion).....	22
2.10.2	การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแอสฟัลต์กับผิวมวลรวม (Loss of Adhesion).....	23
2.11	การยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวม (Asphalt Binder and Aggregate Adhesion).....	24
2.11.1	เชิงกล (Mechanical).....	24
2.11.2	เชิงเคมี (Chemical).....	24
2.11.3	แรงยึดเกาะ (Adhesion tension).....	24
2.11.4	การวางแนวของโมเลกุล (Molecular orientation).....	25
2.12	ปัจจัยที่มีผลต่อความเสียหายของความชื้น (Factors Influencing Moisture Damage).....	25
2.12.1	ลักษณะของแอสฟัลต์ (Asphalt binder characteristics).....	25
2.12.2	ลักษณะของมวลรวม (Aggregate characteristics).....	25
2.12.2.1	เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry).....	25
2.12.2.2	รูพรุนและขนาดของรูพรุน (Porosity and pore size).....	26
2.12.3	ช่องว่างอากาศ (Air voids).....	26
2.12.4	สภาพอากาศในการก่อสร้าง (Construction weather).....	26
2.12.5	ภูมิอากาศ (Climate).....	27
2.12.6	การจราจร (Traffic).....	27
2.12.6.1	แรงดันน้ำสะสม (Pore pressure buildup).....	27
2.12.6.2	การกัดเซาะของของเหลว (Hydraulic scouring).....	27
2.13	มาตรการการป้องกัน (Preventive Measures).....	27
2.14	การทดสอบการต้านทานความชื้น.....	28
2.14.1	วิธีแรงดึงแบบทางอ้อม (Indirect tensile strength test).....	28
2.15	Image Processing & Analysis System (IPAS).....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16	การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	29
------	---------------------------------------	----

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 3.....	32
วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	32
3.2 การเตรียมตัวอย่างส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต.....	35
3.3 การเตรียมตัวอย่างในการผสมมอดิไฟด์แอสฟัลต์คอนกรีต.....	36
3.4 การหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในการทดสอบ.....	38
3.5 การทดสอบหาค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test).....	40
3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี Image Processing & Analysis System (IPAS) เพื่อวิเคราะห์	
ระยะเชื่อมต่อกันของ aggregate กับผลรวมของระยะเชื่อมของมวลรวม.....	41
3.7 การทดสอบ Rigden Voids.....	43
3.8 การทดสอบ BET (Brunauer-Emmett-Teller).....	45
บทที่ 4.....	47
ผลการทดลอง.....	47
4.1 การทดสอบ Rigden voids.....	47
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง the Percent of Rigden Voids in a Dry-compacted Fillers กับ BET (Brunauer-Emmett-Teller).....	47
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของค่า Rigden Voids in a Dry-compacted Fillers และ Aggregate Contacts.....	49
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids in a Dry-Compacted Fillers และ Moisture Damage Resistance.....	51
บทที่ 5.....	54
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	54
เอกสารอ้างอิง.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ทะเลสาบแอสฟัลต์	3
รูปที่ 2.2 เครื่องทดสอบ PENETRATION.....	5
รูปที่ 2.3 ผลที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการปรับคุณสมบัติด้วยสารปรับปรุงการหลุดร่อน	7
รูปที่ 2.4 RIGDEN VOIDS ของฟิลเลอร์ประเภทต่างๆ (NCHRP PROJECT 9-45, 2010).....	13
รูปที่ 2.5 อนุภาคของฟิลเลอร์ที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์.....	14
รูปที่ 2.6 การแตกหักที่มีสาเหตุมาจากการหลุดร่อน	17
รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง HMA ที่ไม่มีความเสียหายจากความชื้น (ซ้าย) และความเสียหายจากความชื้น (ขวา) สังเกตปริมาณมวลรวมที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวบนตัวอย่างที่เสียหาย	19
รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง HMA ที่ไม่มีความเสียหายจากความชื้น (ซ้าย) และความเสียหายจากความชื้น (ขวา) ตัวอย่างที่ละเอียดยิ่งกว่ารูปที่ 2.5 แต่ยังคงมีมวลรวมที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวที่เห็นได้ชัดเจน.....	19
รูปที่ 2.9 เครื่องมือสำหรับทดสอบ INDIRECT TENSILE STRENGTH.....	26
รูปที่ 3.1 การแบ่งการคละขนาดของมวลรวม.....	32
รูปที่ 3.2 แสดงถึงกากอ้อยและขุยมะพร้าวตามธรรมชาติ 2 ชนิด.....	34
รูปที่ 3.3 แสดงถึงฟิลเลอร์ที่ผ่านการกรองโดยตะแกรงเบอร์ 200.....	34
รูปที่ 3.4 เครื่องเขย่าตะแกรง(Sieve Shaker).....	36
รูปที่ 3.5 เครื่องอบยางมะตอย.....	37
รูปที่ 3.6 เครื่องปั่นยางมะตอยที่มีรอบถึง 1000รอบ/วินาที.....	37
รูปที่ 3.7 การผสมยางมะตอยกับผง Carbon Black.....	37
รูปที่ 3.8 การคำนวณ Digital Image โดยใช้เมทริกในโปรแกรม Matlab.....	42
รูปที่ 3.9 การคำนวณ Digital Image โดยใช้โปรแกรม IPAS.....	42
รูปที่ 3.10 เครื่องมือทดสอบ Rigden Voids.....	44
รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบ Rigden Voids.....	44
รูปที่ 3.12 เครื่องในการทดสอบ Brunauer-Emmett-Teller.....	46
รูปที่ 4.1 แสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids ในการบดอัดแบบแห้ง.....	47
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Rigden voids และจำนวนการสัมผัส.....	48
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Rigden voids และความยาวในการสัมผัส.....	48
รูปที่ 4.4 แสดงถึงค่า TSR ในการคละขนาดแบบ Dense Grade.....	49
รูปที่ 4.5 แสดงถึงค่า TSR ในการคละขนาดแบบ Porous Grade.....	50
รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSR (Tensile Strength Ratio) และค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids ของ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างแอสฟัลต์ชนิด AC 60/70.....	51
รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSR (Tensile Strength Ratio)และค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids ของตัวอย่าง แอสฟัลต์ชนิด AC 60/70.....	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSR (Tensile Strength Ratio)และค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids ของตัวอย่าง แอสฟัลต์ชนิด PMA(Polymer-Modified Asphalt).....	52
--	----



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงถึงชนิดมวลรวมและชนิดสารตัวเติมที่ใช้ในการทดสอบและปริมาณ.....	31
ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของสารตัวเติมแต่ละชนิด.....	31
ตารางที่ 3.3 การขนาดคละของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 416/2556).....	37
ตารางที่ 3.4 ขนาดคละของมวลรวมและปริมาณโพลิเมอร์โมดิไฟด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 414/2542)..	37
ตารางที่ 4.1 แสดงถึงผลการทดสอบ BET ของสารตัวเติมที่ต่างกัน 3 ชนิด.....	46
ตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่าจำนวนการสัมผัสของสารตัวเติมเมื่อเปลี่ยนชนิดของแอสฟัลต์	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ความเสียหายจากความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงสร้างพื้นฐานของทางเท้าเสื่อมสภาพและการเสื่อมสภาพดังกล่าวส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของความชื้นมากเกินไปโดยมักจะเกิดจากเหตุการณ์ฝนตกหรือน้ำท่วม ซึ่งถือเป็นสาเหตุหลักของความเสียหายของทางเท้าภายในโครงสร้างทางเท้า โดยที่น้ำจะซึมผ่านช่องว่างระหว่างสารยึดเกาะแอสฟัลต์และมวลรวม ทำให้มีการเพิ่มมากขึ้นของช่องว่างในอากาศในผิวทางซึ่งสามารถก่อให้เกิดอันตรายสำหรับผู้ใช้งานและรวมถึงงบประมาณในการซ่อมแซมถนนเป็นจำนวนมากดังนั้นปัญหาในด้านความเสียหายของผิวทางเนื่องจากความชื้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการทดสอบหาประสิทธิภาพในด้านต่างๆของชั้นผิวทาง

จากแนวคิดของ Rigden (1947) ได้เสนอการวัดช่องว่างเศษส่วน ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า “Rigden voids test” เป็นแนวคิดของ Rigden ที่เกี่ยวข้องกับการแยกแอสฟัลต์ที่มีช่องว่างในตัวอย่างที่อัดแบบแห้งจากแอสฟัลต์ส่วนเกินที่เรียกว่าแอสฟัลต์อิสระ โดย Rigden ได้เสนอว่าเปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์อิสระเป็นปัจจัยหลักในการสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแอสฟัลต์หรือลักษณะของสารตัวเติมใดๆ ยกเว้นช่องว่างเศษส่วน และการเติมฝุ่นโดยไม่คำนึงถึงคุณสมบัติใดๆได้รับการยอมรับว่าช่วยเพิ่มความแข็งของแอสฟัลต์ และ DeSmedt เป็นผู้ริเริ่มการใช้สารตัวเติมเพื่อจำลองแอสฟัลต์หินในวอชิงตัน ดี.ซี. ในช่วงทศวรรษปี 1870 จากการศึกษาในเวลาต่อมาพบว่าการคละขนาดของสารตัวเติมมีอิทธิพลต่อระดับความแข็งของแอสฟัลต์มาสดิก แม้ว่าจะมีการศึกษามากมายที่สำรวจอิทธิพลของ Rigden Voids ต่อประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์ แต่ยังคงมีช่องว่างในการวิจัยที่สำคัญเกี่ยวกับผลกระทบของ Rigden Voids ต่อความเสียหายจากความชื้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSR (Tensile Strength Ratio) และค่า Rigden Voids ของตัวอย่างแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids ในการอัดแบบแห้งกับจำนวนในการสัมผัส (Number of contact number) และความยาวในการสัมผัส (Number of contact lengths) ของแอสฟัลต์ชนิดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1. แหล่งที่มาของผงคาร์บอน ยางมะตอย และมวลรวม มาจากประเทศไทยเท่านั้น
- 1.3.2. ทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานความเสียหายจากความชื้นใช้เครื่อง indirect tensile strength tester และการทดสอบ Rigden Voids, การทดสอบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) และใช้โปรแกรม Image Processing & Analysis System ในห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 การวิจัยช่วยให้ทราบว่าผงคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการต้านทานความเสียหายจากความชื้นให้กับแอสฟัลต์คอนกรีต
- 1.4.2 การวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Rigden Voids และความไวต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความชื้น
- 1.4.3 การวิจัยนี้มีส่วนช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับโครงสร้างภายในของมวลรวมแบบกระตุกภายในแอสฟัลต์และปฏิกิริยาระหว่างแอสฟัลต์กับฝุ่นชนิดต่างๆ

บทที่ 2

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของแอสฟัลต์ (Asphalt)

ลักษณะของแอสฟัลต์มีสีดำเข้ม เหนียว และเป็นของเหลวที่มีความยืดหยุ่นสูงหากแข็งตัว สามารถหาได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมหรือสามารถพบได้จากแหล่งธรรมชาติ โดยแหล่งยางมะตอยทางธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในโลกมีขนาดจุประมาณ 10 ล้านตัน ซึ่งถูกเรียกว่าทะเลสาบแอสฟัลต์ตั้งอยู่ทางตะวันตกเฉียงใต้ของเวเนซุเอล่า โดยปกติแล้วยางมะตอยจะถูกใช้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของงานถนน ยางมะตอยถูกใช้เป็นเสมือนกาวในการผสมหินให้เข้ากันเพื่อกลายเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต อีกการหนึ่งคือใช้เพื่อกันน้ำในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น หลังคาบ้าน อื่นๆ อีกทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆอีกมากมาย



รูปที่ 2.1 ทะเลสาบแอสฟัลต์

2.1.1 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement)

โดยปกติแล้ว HMA จะใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นหลักในการปูผิวทาง “asphalt binder” ถูกจำกัดความไว้เพื่อให้ทราบว่าเป็นสารยึดหลักใน HMA เพราะ asphalt binder นั้นคือแอสฟัลต์ซีเมนต์ รวมถึงสารเติมแต่งที่นอกเหนือจากนี้ที่ถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อดัดแปลงคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์ (Asphalt Physical Properties)

ลักษณะทางกายภาพของยางมะตอยมีเยอะแยะมากมาย เช่น ความยืดหยุ่น ความไวต่ออุณหภูมิ การกันน้ำ ความหนืด ความเป็นพลาสติก อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ความทนทาน (Durability)

การเปลี่ยนไปทางกายภาพของแอสฟัลต์ตามกาลเวลาสามารถพิจารณาได้จากคุณสมบัติด้านความทนทาน โดยทั่วไปเมื่อแอสฟัลต์มีอายุมากขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้น จะแข็งและเปราะมากขึ้นด้วยเช่นกัน

2.2.2 การศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปและการไหล (Rheology)

เพื่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดี จุดสนใจหลักอยู่ที่คุณสมบัติการยึดเกาะของแอสฟัลต์ ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ ขั้นตอนการประมวลผลและการใช้งานต่างๆ ต้องการความสม่ำเสมอของน้ำมันที่แตกต่างกัน ในงานวิศวกรรมถนน สารผสมแอสฟัลต์คอนกรีตร้อนถูกผลิตและทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิต่างๆ โรงงานแอสฟัลต์ที่ใช้สำหรับการประมวลผลสารผสมเหล่านี้อย่างต่อเนื่องสามารถอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นส่วนผสมจะต้องสามารถบีบและเทได้ ในระหว่างขั้นตอนการทำความเย็นที่ตามมาหลังการใช้งาน ส่วนผสมจะถูกบดอัดอย่างต่อเนื่องบนถนน คุณสมบัติของน้ำมันดินสามารถปรับให้เหมาะสมได้โดยการทดสอบความหนืดและพารามิเตอร์การไหลอื่นๆ ที่อธิบายถึงความแข็งและความสอดคล้อง รูปทรงเรขาคณิตและอุปกรณ์เสริมการวัดที่หลากหลาย เช่น อุปกรณ์ทำความร้อนสำหรับการทดสอบน้ำมันดิน (หรือยางมะตอย) โดยเฉพาะ ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำสูง

2.2.3 ความปลอดภัย (Safety)

การระเหยของแอสฟัลต์จะเกิดขึ้นเมื่อโดนความร้อนที่อุณหภูมิสูงมาก แอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถปล่อยไอน้ำมากพอที่จะเพิ่มความเข้มข้นที่ระเหยได้ทันทีและสามารถเกิดเปลวไฟได้ ความปลอดภัยได้คำนึงถึงจุดวาบไฟเพราะฉะนั้นจุดวาบไฟจำเป็นที่จะต้องได้รับการทดสอบและควบคุม

2.2.4 ความบริสุทธิ์ (Purity)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในการปูผิวทาง HMA สิ่งสกปรกสามารถอยู่ในบิทูเมนส์ได้เพียงเล็กน้อย ถ้าหากในบิทูเมนส์มีสิ่งสกปรกปะปนอยู่มากจะทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของยางมะตอยนั้นๆ

2.3 ระบบการคัดเกรดของแอสฟัลต์ (Grading Systems)

แอสฟัลต์ถูกจัดประเภทตามระบบคัดเกรดตามลักษณะทางกายภาพตามมาตรฐานที่ถูกกำหนดไว้ ระบบนี้มีความง่ายบ้างก็มีความซับซ้อนและแสดงถึงวิวัฒนาการในความสามารถในการระบุลักษณะของแอสฟัลต์ Superpave (PG) กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบันและในประเทศไทยกำลังหันมาใช้ระบบนี้ในการทำถนน การคัดเกรดสามารถแบ่งได้ตามวิธีการดังนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การคัดเกรดจากผลของการเจาะ (Penetration Grading)

การคัดเกรดโดยการเจาะ ขึ้นอยู่กับความลึกเข็มมาตรฐานที่ใช้เจาะตัวอย่างแอสฟัลต์ เมื่อวางไว้น้ำได้ไหลลง 100 กรัมเป็นเวลา 5 วินาที (รูปที่ 2.2) การทดสอบมีความสะดวกในการทดสอบ ไม่จำเป็นต้องวัดพารามิเตอร์ใดๆ และสามารถระบุลักษณะแอสฟัลต์ได้ที่อุณหภูมิ (77 ° F) ค่าของการเจาะจะแสดงเป็นช่วงของหน่วยการเจาะ (หนึ่งหน่วยการเจาะ = 0.1 มม. ของการเจาะโดยเข็มมาตรฐาน) สำหรับแอสฟัลต์ที่ใช้ในไทยโดยทั่วไปคือ 60-70 pen



รูปที่ 2.2 เครื่องทดสอบ Penetration

2.3.2 การคัดเกรดจากผลของความหนืด (Viscosity Grading)

ทำการวัดการเจาะ (เช่นเดียวกับการคัดเกรดจากผลของการเจาะ) แต่จะวัดความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 60 ° C และ 135 ° C การทดสอบสามารถทำได้ AC บริสุทธิ์ หรือแอสฟัลต์ที่มีอายุ (AR) โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้ (cm-g-s = dyne-second / cm²) หรือหารด้วย 10 แอสฟัลต์ทั่วไปที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา คือ AC-10, AC-20, AC-30, AR-4000 และ AR-8000 การคัดเกรดจากผลของความหนืดให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแต่ไม่ได้ทดสอบการไหลของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ระบบการคัดเกรดแบบ Superpave (Superpave Performance Grading (PG) System)

ระบบ Superpave PG ได้รับการพัฒนาขึ้นและเป็นส่วนหนึ่งในการวิจัยนี้ ระบบ PG ขึ้นอยู่กับแนวคิดที่ว่าคุณสมบัติแอสฟัลต์ของ HMA การใช้งานควรถูกตั้งเป็นสิ่งที่คำนึงถึง ระบบ PG ใช้บอกอายุการใช้งานโดยทั่วไปในการทดสอบ(การคัดเกรดจากผลของการเจาะและการคัดเกรดจากผลของความหนืด) แต่ระบุว่าแอสฟัลต์ต้องผ่านการทดสอบเหล่านี้ที่อุณหภูมิเฉพาะที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศเฉพาะในพื้นที่ที่นั้นๆ ดังนั้นพื้นที่ที่มีอุณหภูมิพื้นฐานต่างกันก็ต้องใช้ แอสฟัลต์ที่มีPGต่างกัน

2.4 แอสฟัลต์ที่ได้รับการปรับปรุงคุณสมบัติ (Asphalt Binder Modifiers)

แอสฟัลต์ซีเมนต์บางตัวหากมีความจำเป็นที่ต้องปรับเปลี่ยนเพื่อให้ได้คุณสมบัติตรงตามข้อกำหนด การดัดแปลงแอสฟัลต์ซีเมนต์ประวัติมีมาประมาณครึ่งศตวรรษแต่ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ณ ปัจจุบันมีสารเติมแต่งแอสฟัลต์จำนวนมากอยู่ในตลาด ประโยชน์ของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่แก้ไขได้โดยการเลือกตัวปรับที่เหมาะสม ไม่ใช่ปรับปรุงคุณสมบัติทั้งหมด โดยทั่วไปแอสฟัลต์ซีเมนต์จะถูกปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นดังนี้

- ความแข็งแรงลดลง (หรือความหนืด) ที่อุณหภูมิสูง สิ่งนี้อำนวยความสะดวกในการไหลของแอสฟัลต์เหลวรวมถึงการผสมและการบดอัดของ HMA
- ความแข็งแรงสูงขึ้นที่อุณหภูมิสูง สิ่งนี้จะช่วยลดการ rutting และ shoving
- ความแข็งแรงลดลงและคุณสมบัติการคลายความเครียดที่เร็วขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ สิ่งนี้จะลดการแตกร้าวจากความร้อน
- เพิ่มการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมเมื่อได้รับความชื้น สิ่งนี้จะลดโอกาสในการหลุดร่อน รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างรวมสองตัวอย่างจากแหล่งเดียวกันหลังจากเคลือบด้วยแอสฟัลต์ ซึ่งแอสฟัลต์ที่ใช้กับตัวอย่างทางด้านซ้ายไม่มีตัวต่อต้านการหลุดร่อนซึ่งทำให้ไม่มีการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม สารยึดเกาะแอสฟัลต์ที่ใช้กับตัวอย่างทางด้านขวาประกอบด้วย 0.5% (โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์) ของสารป้องกันการหลุดร่อนซึ่งส่งผลให้เกิดการยึดเกาะของแอสฟัลต์กับมวลรวมที่ดี



รูปที่ 2.3 ผลที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการปรับคุณสมบัติด้วยสารปรับปรุงการหลวกร้อน

2.5 แอสฟัลต์รูปแบบอื่นที่ใช้ในการปูพื้น (Other Forms of Asphalt Used in Paving)

นอกเหนือจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ แอสฟัลต์อีกสามแบบถูกนำมาใช้อย่างเด่นชัดในอุตสาหกรรมการปูพื้น

- Emulsified asphalt แอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารแขวนลอยของแอสฟัลต์ซีเมนต์ขนาดเล็กในน้ำซึ่งมีส่วนผสมจากสารที่ทำให้เกิดการระเหย (เช่นสบู่) แอสฟัลต์อิมัลชันมีความหนืดต่ำกว่าแอสฟัลต์ (ธรรมดา) และสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิต่ำ หลังจากที่ใช้อิมัลชัน น้ำจะระเหยออกไปและเหลือเพียงแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่านั้น อิมัลชันมักถูกใช้เป็น prime coats and tack coats
- Cutback asphalt เป็นยางมะตอยเหลวที่ประกอบด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์และตัวทำละลายปิโตรเลียม เนื่องจากช่วยลดความหนืดของแอสฟัลต์ให้เหลือน้อยที่สุดสำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่า จึงใช้สำหรับ บิโทมินัส การซ่อมแซมหลุม และการทำงานอื่นๆ โดยทั่วไปแล้ว Cutback จะใช้ prime coats and tack coats
- Foamed asphalt โฟมแอสฟัลต์เกิดขึ้นจากการรวมแอสฟัลต์ร้อนกับน้ำเย็นจำนวนเล็กน้อย เมื่อน้ำเย็นสัมผัสกับยางมะตอยร้อนจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำซึ่งกลายเป็นฟองเล็ก ๆ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือโฟมแอสฟัลต์แบบฟิล์มบางในปริมาณสูง สถานะโฟมปริมาณสูงนี้ใช้เวลาเพียงไม่กี่นาทีหลังจากนั้น แอสฟัลต์จะกลับมามีคุณสมบัติเดิม แอสฟัลต์โฟมสามารถใช้เป็นสารยึดเกาะในการรักษาเสถียรภาพของดินหรือฐานราก และมักจะถูกใช้เป็นสารสร้างเสถียรภาพในการรีไซเคิลในสถานที่แบบเย็น (CIPR)

2.6 Mastic

เป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้สำหรับปู มุงหลังคา และปูพื้น คล้ายกับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบดั้งเดิมตรงที่ก่อตัวเป็นวัสดุพื้นผิวแข็งที่มีความหนาแน่นสูงภายใต้สภาวะอุณหภูมิเฉลี่ย เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิสูงมาก แอสฟัลต์สีเหลืองจะก่อตัวเป็นของเหลวชั้นที่สามารถเทหรือเคลือบบนพื้นผิวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากบิทูเมนส์แล้ว masticแอสฟัลต์ยังประกอบด้วยมวลรวมอีกด้วย มวลรวมนี้อาจรวมถึงทราย กรวด หรือผลิตภัณฑ์หินประเภทอื่นๆ อีกมากมาย สารประกอบโพลิเมอร์และผงสีมักถูกเติมเพื่อให้สีของวัสดุ หรือเพิ่มความแข็งแรงทนทาน ผู้ผลิตในยุโรปมักเติมวัสดุที่เรียกว่าแอสฟัลต์ทะเลสาบลงในส่วนผสมของmastic แอสฟัลต์ในทะเลสาบเป็นแร่ธาตุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติซึ่งคล้ายกับน้ำมันดินและช่วยยึดเกาะอนุภาคมวลรวมเข้าด้วยกัน mastic asphaltใช้สำหรับปูถนน ทางเท้า ทางรถวิ่ง และลานจอดรถ มักใช้กับโครงสร้าง หลังคาที่อยู่อาศัยและพาณิชย์กรรมเนื่องจากความสามารถในการกันซึมที่เหนือกว่า วัสดุนี้อาจใช้เคลือบพื้นใน โรงงานและโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่มีการรั่วไหลบ่อยครั้งหรือใช้สารเคมีในปริมาณ มาก นอกจากนี้ยังใช้mastic asphaltเพื่อวางถังเพื่อป้องกันการรั่วไหลเมื่อเวลาผ่านไป

หนึ่งในข้อเสียเปรียบหลักของวัสดุนี้คือมีผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมในรูปของน้ำมันดิน Bitumen ไม่ เพียงแต่มีกลิ่นที่เป็นพิษในหลายกรณีเท่านั้น แต่ยังอาจสร้างควันที่เป็นอันตรายหลังจากติดตั้งเป็นเวลานานอีกด้วย สุดท้าย เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์แอสฟัลต์ทั้งหมด masticอ่อนอาจทำงานได้ยากเนื่องจากอุณหภูมิสูงที่ต้อง รักษาไว้เมื่อพ่นวัสดุนี้

2.6.1 คุณสมบัติของส่วนประกอบ mastic (Properties of the mastic constituents)

2.6.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของฟิลเลอร์ (Physical properties of the filler)

ช่องว่างอากาศคือช่องว่างอากาศขนาดเล็กหรือช่องอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคมวลรวมที่เคลือบ ในส่วนผสมที่อัดแน่นขั้นสุดท้าย เปอร์เซ็นต์ของช่องว่างอากาศเป็นสิ่งจำเป็นในส่วนผสมของทางหลวงที่มีความหนาแน่นสูงทั้งหมด เพื่อให้สามารถบดอัดผิวทางเพิ่มเติมภายใต้การจราจร และเพื่อให้มีช่องว่างที่แอสฟัลต์ จำนวนเล็กน้อยสามารถไหลได้ในระหว่างการบดอัดที่ตามมานี้ เปอร์เซ็นต์ของช่องว่างอากาศที่อนุญาต (ใน ชิ้นงานทดสอบในห้องปฏิบัติการ) อยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 4.0 เปอร์เซ็นต์สำหรับส่วนผสมของพื้นผิวส่วนใหญ่หรือ ตามที่เจ้าของต้องการ ความทนทานของผิวทางแอสฟัลต์เป็นหน้าที่ของเนื้อหาที่เป็นช่องว่างอากาศ เนื่องจาก ยิ่งช่องว่างอากาศต่ำลง ส่วนผสมก็จะซึมผ่านได้น้อยลง ปริมาณอากาศที่เป็นโมฆะสูงเกินไปทำให้เป็นทางผ่าน ของส่วนผสมสำหรับทางเข้าของอากาศและน้ำที่สร้างความเสียหาย ในทางกลับกัน ปริมาณอากาศที่เป็นโมฆะต่ำอาจนำไปสู่การชะล้าง ซึ่งเป็นสถานะที่แอสฟัลต์ส่วนเกินบีบตัวออกจากส่วนผสมไปที่พื้นผิว ความหนาแน่น และเนื้อหาที่เป็นโมฆะเกี่ยวข้องโดยตรง ยิ่งความหนาแน่นสูง เปอร์เซ็นต์ของช่องว่างในการผสมก็จะยิ่งต่ำลง และในทางกลับกัน ข้อกำหนดเฉพาะของงานต้องการทางเท้าที่ช่วยให้มีช่องว่างอากาศต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ คือประมาณ 8.0 เปอร์เซ็นต์

Rigden voids ถูกพบโดยวิธี 14.4282 ในคู่มือ R210 โดย Norwegian Public Road Administration (NPRA) ตัวอย่างฟิลเลอร์ที่รู้ความหนาแน่น ถูกนำไปทำให้แห้งที่ $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ จนกว่าจะมีมวลคงที่ ก่อนที่จะเย็นลงในเครื่องทำให้แห้ง (desiccator) เป็นเวลา 90 นาที นำกระดาษกรองใส่ ในกระบอกเหล็กและชั่งน้ำหนักได้ 0.01 กรัม และมีการวัดความหนาของกระดาษและความสูงของแอสตัมป์ หลังจากนั้นนำฟิลเลอร์ที่หนักประมาณ 10 กรัมใส่ในกระบอกและนำกระดาษกรองและแอสตัมป์ไว้บนสุด แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่ในอุปกรณ์ rigden, ภายในอุปกรณ์ rigden กระบอกและแอสตัมป์ถูกยกให้ไปตาม bar เหล็กที่สูง 100 ± 25 mm และปล่อยให้ตกอย่างอิสระ 100 ครั้ง มีการวัดความสูงและน้ำหนักของฟิลเลอร์ที่ถูกทำให้แน่นและมีกระดาชกรองและแอสตัมป์ โดย rigden void คำนวณโดยสมการ (1)

$$V_R = \left(1 - \frac{1000m}{(h_1 - h_2)A\rho_f}\right) * 100 \quad (1)$$

เมื่อ V_R = ส่วนประกอบ rigden void (%) m = มวลของฟิลเลอร์ที่แน่น (g) h_1 = ความสูงของฟิลเลอร์ที่แน่น แอสตัมป์และกระดาชกรอง (mm) h_2 = ส่วนสูงของแอสตัมป์และกระดาชกรอง (mm) A = ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของกระบอก (mm²), ρ_f = ความหนาแน่นของวัสดุฟิลเลอร์ (g/cm³)

มาตรฐานชาวอเมริกันได้จำเพาะค่าของ 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 เมื่อมีพื้นผิวที่ขอบเคาน์เตอร์ที่เป็นเหล็ก จะสามารถคำนวณค่า rigden void ได้ 36.2% ในขณะที่ฟิลเลอร์ที่เหมือนกันได้ 34.5% เมื่อพื้นผิวเป็นโต๊ะไม้ โดยวางและหนีบอุปกรณ์ rigden บนขาตั้งไม้ที่ติดบนที่ขอบเคาน์เตอร์ ผลลัพธ์ที่ไม่ตรงกันลดลงเรื่อยๆสำหรับพื้นผิวทุกชนิดและระยะที่แตกต่างกันของค่าจากพื้นผิวที่ได้กล่าวถึงลดลงตั้งแต่ 35.3% ถึง 35.7%

การตรวจสอบฟิลเลอร์ของเยอรมันเป็นวิธีที่ใช้วัดปริมาณฟิลเลอร์ที่ใช้เพื่ออุดซิมน้ำมัน hydraulic 15 กรัม โดยใส่น้ำมันในถ้วยแล้วใส่ฟิลเลอร์ในปริมาณน้อย ผสมฟิลเลอร์กับน้ำมันและสามารถนำสารผสมนี้สร้างเป็นบอลได้ ถ้าบอลอยู่ติดกัน จะใส่ฟิลเลอร์น้ำและจะทำกระบวนการซ้ำจนกว่าสารผสมจะแยกออกจากกัน และไม่สามารถอยู่ในรูปร่างบอลได้อีก โดยปริมาณฟิลเลอร์น้ำที่ใส่ จะเป็นค่าทดสอบ โดยการทดสอบนี้จะสัมพันธ์กับ rigden voids เมื่อค่า rigden void ในฟิลเลอร์น้ำที่สูงจะเท่ากับค่าทดสอบฟิลเลอร์เยอรมันที่น้อย เพราะน้ำมัน hydraulic ที่ถูกยึดใน void และใช้ฟิลเลอร์น้อยในการทำให้สารผสมแยกออกจากกัน

อีกคุณสมบัติของฟิลเลอร์คือความหนาแน่น ปกติแล้วความหนาแน่นสามารถบ่งบอกถึงมวลของสารที่มีค่าปริมาตรที่จำเพาะของวัสดุชนิดหนึ่งที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง (NPRA R210) ในงานเขียนวิชาการของอเมริกา ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านของความถ่วงจำเพาะได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อแทนที่ความหนาแน่น โดยความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นสามารถดูได้จากสมการ (2)

$$\rho_f = G_m \rho_w \quad (2)$$

เมื่อ ρ_f = ความหนาแน่นของฟิลเลอร์ (g/cm^3) G_m = ค่าแรงโน้มถ่วง) ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง (g/cm^3)

ความหนาแน่นที่จำเพาะของฟิลเลอร์สามารถหาได้จากวิธี 14.427 (NPRA R210) โดยใช้ pycnometer น้ำหนักของ pycnometer ที่มีตัวหยุดแก้ว แล้วเติมน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 25 C ในการเติมตัวอย่างวัสดุฟิลเลอร์ที่แห้งจะใช้กรวยในการเติมลงใน pycnometer ก่อนที่จะนำไปชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม เติมน้ำกลั่นไปจนกว่าวัสดุฟิลเลอร์ที่ท่วมออกมาและนำไปชั่งน้ำหนัก เครื่อง pycnometer ถูกนำไปวางไว้ในเครื่องที่ทำให้แห้งสุญญากาศซึ่งสามารถเอาอากาศออกจากฟิลเลอร์ได้ หลังจากนั้นจึงนำเครื่อง pycnometer ออกแล้วไปใส่ในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 25 C อย่างน้อย 1 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก โดยหาความหนาแน่นของฟิลเลอร์จากสมการ (3)

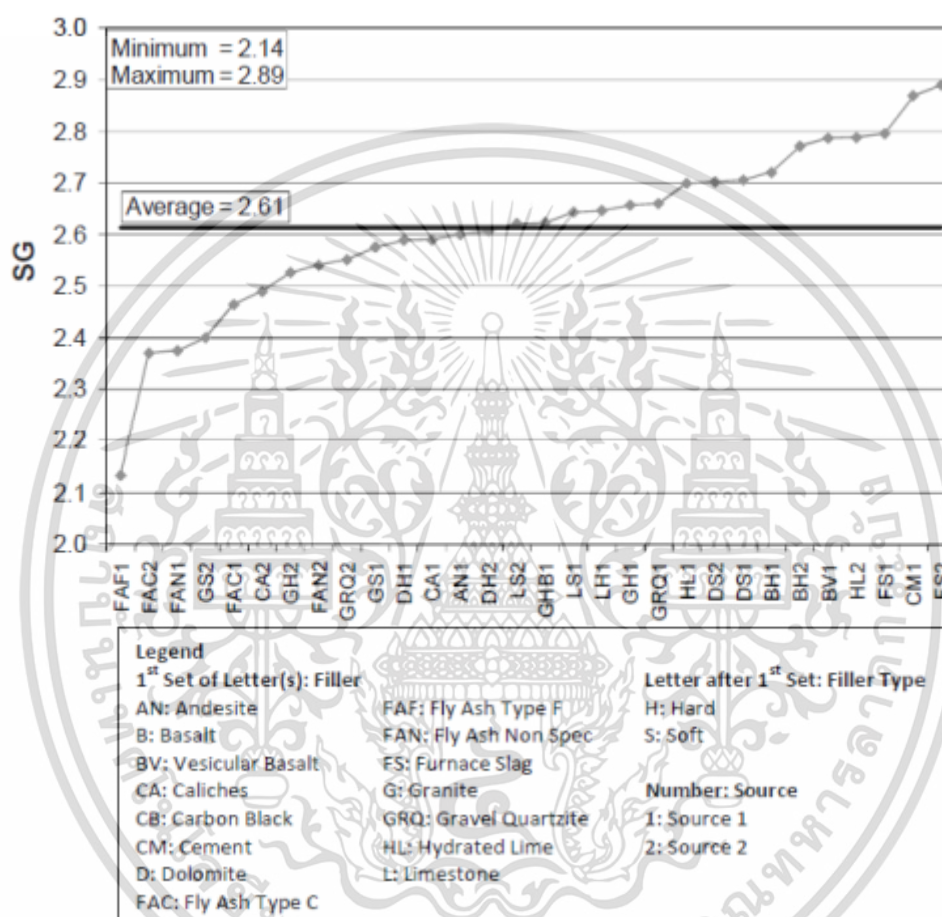
$$\rho_f = \frac{(m_4 - m_1)\rho_w}{m_2 - m_1 - m_5 + m_4} \quad (3)$$

เมื่อ ρ_f = ความหนาแน่นของฟิลเลอร์ (g/cm^3) ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ (g/cm^3) m_1 = มวลของ pycnometer และตัวหยุดแก้ว (g) m_2 = มวลของ pycnometer และตัวหยุดแก้วที่มีน้ำกลั่น (g) m_4 = มวลของ pycnometer และตัวหยุดแก้วที่มีฟิลเลอร์ (g) m_5 = มวลของ pycnometer และตัวหยุดแก้วที่มีน้ำ (g)

อุณหภูมิของน้ำต้องมีความค่าที่เพราะความหนาแน่นของน้ำสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ น้ำสามารถขยายตัวได้ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าที่กำหนด น้ำจะสามารถเติมเต็ม void ได้น้อยลง เป็นผลให้ความหนาแน่นของฟิลเลอร์สูงขึ้น ในหนังสือเคมีและฟิสิกส์ ดัดแปลงครั้งที่ 95th โดย Haynes et al (2014) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของน้ำและอุณหภูมิของน้ำในตาราง B1 ในดัชนี B

ในสารผสม asphalt ปริมาณของฟิลเลอร์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมวลของส่วนประกอบทั้งหมด เมื่อมีความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันในแต่ละชนิดฟิลเลอร์ ปริมาตรของฟิลเลอร์ที่เติมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

asphalt mastic ก็จะต้องแตกต่างกันเช่นเดียวกัน ผลจากอัตราส่วนระหว่างฟิลเลอร์และตัวผสมใน mastic จะถูกพูดถึงต่อไป ผลการทดลองจากโปรเจ็ค NCHRP 9-45 (2010) แสดงให้เห็นว่าฟิลเลอร์ที่ถูกผลิตมา ในกรณีนี้คือถั่วลันเตาและตะกรันเตาถลุงเหล็กซึ่งมีความถ่วงจำเพาะที่น้อยที่สุดและมากที่สุดตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละฟิลเลอร์สามารถดูได้จากรูป 2.4 จากในรูป มีประเภทของฟิลเลอร์ 2 ประเภทที่คล้ายกัน จะมีค่าความถ่วงจำเพาะขึ้นอยู่กับแหล่งดั้งเดิม เช่น ฟิลเลอร์ soft granite จากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันมีค่าความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันระหว่าง 2.40 และ 2.58



รูปที่ 2.4 ความถ่วงจำเพาะของฟิลเลอร์ประเภทต่างๆ (NCHRP Project 9-45, 2010)

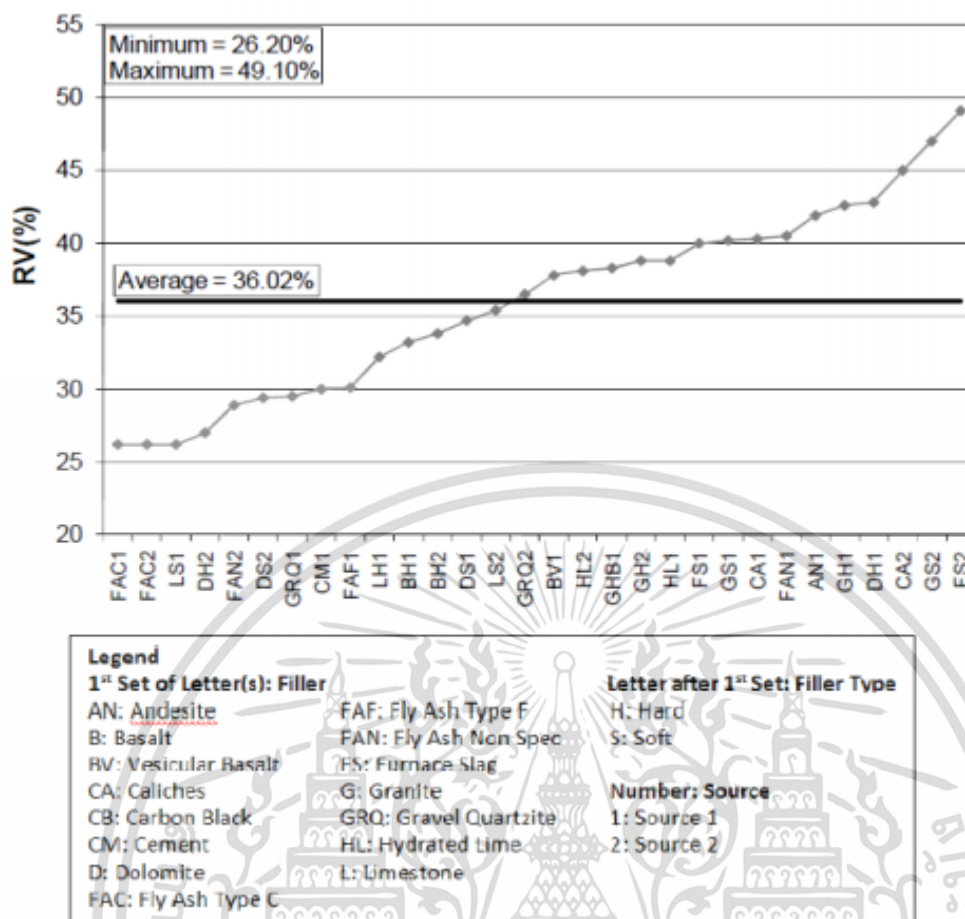
ความหนาแน่นของฟิลเลอร์ส่งผลต่อปัจจัยทางกายภาพต่างๆ เช่น รูปร่างทางเรขาคณิตของอนุภาค ขนาดของอนุภาค การกระจายตัว และลักษณะทางกายภาพ รูปร่างของอนุภาค ขนาดของมุม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยกล้องจุลทรรศน์และ software ในการวิเคราะห์ภาพ (โปรเจ็ค NCHRP 9-45, 2010) ในการศึกษาโดย Lerfald (2000) พบว่ารูปร่างของปูนขาวจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจาก ผุ่นไปจนและหินปูน ในขณะที่หินปูนมีลักษณะเป็นทรงกลม และผุ่นจะยาวกว่านิดหน่อย ปูนขาวมีอนุภาคที่พรุน และมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอและมีพื้นที่ผิวสูง รูปร่างของฟิลเลอร์ที่ผลิตออกมาจะขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต และปูนขาวเป็นผลจาก calcium carbonate ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำไปเป็น calcium oxide (Lerfald, 2000) ในงานวิจัย Buttlar และคณะ (1999) ใช้เครื่องวิเคราะห์การดูดซึมน้ำในโตรเจนในการศึกษาพื้นที่ผิวของอนุภาคฟิลเลอร์ โดยวัดการดูดซึมน้ำ isotherm ของแก๊สไนโตรเจนที่บริเวณชั้นผิว โดยวิธี Brunauer-Emmett-Teller (BET) ที่มีการพัฒนามา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ 1930s (Sing,1998) งานวิจัยของ Geber และ Gomse (2010) พบว่าแร่หินภูเขาไฟเพิ่มพื้นที่ผิว ดังนั้นฟิลเลอร์หินแอนไดไซต์มีพื้นที่ผิวมากในขณะที่หินปูนมีน้อย

Buttlar และคณะ (1999) พบว่ามีกระจายของขนาดของอนุภาคในวัสดุฟิลเลอร์โดยหลักการ liquid phase photosedimentation วิธีการนี้ใช้สารแขวนลอยกับสารลดแรงตึงผิวเป็นตัวกระจาย และผลลัพธ์คือการกระจายของขนาดอนุภาคและมีการทดสอบกับขนาดอนุภาคที่มีขนาดกลาง (Buttlar และคณะ, 1999) วิธีอื่นในการศึกษาการกระจายของขนาดในวัสดุฟิลเลอร์ต้องมีการร่อนออกมาหรือใช้เลเซอร์ในการแยก Harris และ Stuart (1995) ได้สรุปงานวิจัยของเขาว่า ในวิธีนี้อนุภาคของฟิลเลอร์ในการกระจายในน้ำ แสงจากเลเซอร์กระจายในทุกทิศทาง ลักษณะการกระจายของแสงจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคฟิลเลอร์ และลักษณะจะถูกวิเคราะห์เพื่อออกแบบการกระจายของขนาดอนุภาคในวัสดุฟิลเลอร์ (โปรเจก NCHRP 9-45,2010) การอภิปรายเพิ่มเติมของวิธีเหล่านี้สามารถอ่านได้จากงานเขียนต่างๆ (Harris และ Stuart,1995; Sing,1998; Tayebali และคณะ,1998)

ลักษณะทางเรขาคณิตมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งที่มาของวัสดุฟิลเลอร์ Rigden void จะมีผลกระทบมาจากรูปร่าง ขนาด และลักษณะของฟิลเลอร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวกำหนดรูปร่างทางเรขาคณิตของอนุภาคได้ การศึกษาที่ร่วมกับโปรเจก NCHRP 9-45 ได้แสดงให้เห็นถึงความกว้างของข้อมูล Rigden void โดยค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดพบได้ในฟิลเลอร์ที่ถูกผลิต ซึ่งถ้าล้อยมีปริมาณ Rigden void น้อย เท่ากับ 26.2% และตะกรันเตาถลุงเหล็ก มี 49.1% ฟิลเลอร์หินอ่อนมีค่าประมาณ 30% แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณ Rigden void สมบัติของแร่และแหล่งของฟิลเลอร์ (โปรเจก NCHRP 9-45,2010) การแสดงทางกราฟฟิก ได้แสดงในรูปที่ 2.5 ค่าปริมาณ Rigden void ที่น้อยที่สุดและมากที่สุด พบในงานวิจัยต่อเนื่องโดยทำร่วมกับชาวโนร์เวย์ ต้องการ 28% และ 55% พบใน NPRA N200



รูปที่ 2.4 Rigden voids ของฟิลเลอร์ประเภทต่างๆ (NCHRP Project 9-45, 2010)

คุณสมบัติอื่นถูกใช้เพื่อแยกฟิลเลอร์คือ โมดูลัสความละเอียด (fineness modulus; FM) โดยที่ค่าเอมพิริคอลคำนวณได้จากสมการ (4) ซึ่งมีค่าใกล้ 0.01 Wang และคณะ (2011) ได้มีการทดสอบ FM ของวัสดุที่ใช้ตะแกรงร่อนขนาด 75, 50, 30, 20, 10, 5, 3 และ 1 μm ซึ่งวิธีการจะกล่าวถึงใน ASTM C 125 และ ยิว (% yield) ของวัสดุที่มีค่าน้อยกว่าค่า FM โดยที่ค่า FM จะถูกใช้เป็นอินดิเคเตอร์ของรูปร่างและลักษณะพื้นผิวของฟิลเลอร์ และค่าจะถูกพิจารณาเป็นปัจจัยสำคัญของฟิลเลอร์ ที่เป็นตัวกำหนดภาพลักษณ์ของลักษณะเรขาคณิตของฟิลเลอร์ควบคู่ไปกับปริมาณ Rigden void ที่บ่งบอกถึงการกระจายของขนาดและพื้นที่ผิว (โปรเจกต์ NCHRP 9-45, 2010) โดยสมการข้างล่าง

$$FM = \frac{\sum \text{Cumulative percentages retained on the specified sieves}}{100} \quad (4)$$

โดยที่ FM คือค่าโมดูลัสความละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของฟิลเลอร์ (Chemical properties of the filler)

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้น ตัวผสมใน asphalt mastic ที่หึงยึดไว้หรืออิสระ ตัวผสมที่ยึดสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วนซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนแรกจะติดกับวัสดุฟิลเลอร์ และทำหน้าที่เป็นส่วนหนึ่งของอนุภาค ในขณะที่ส่วนที่ 2 จะไม่ถูกดูดซึมแต่จะส่งผลต่อการดูดซึมของส่วนภายใน (Faheem และ Bahia, 2010) ตัวผสมที่ยึดและฟิลเลอร์จะมีปฏิสัมพันธ์กันและเกิดพันธะเคมี ความแข็งแรงของพันธะเคมีจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาบนพื้นผิวและคุณสมบัติของแร่ธาตุของฟิลเลอร์ โดย Ishai และ Craus (1996) พบว่ายิ่งรูปร่างของฟิลเลอร์ยิ่งแปลก จะยิ่งมีความสามารถในการดูดซึม ซึ่งผลนี้เป็นผลให้พันธะระหว่างตัวผสมและฟิลเลอร์แข็งแรงมากขึ้น และยังส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณตัวผสมที่ยึดติด อีกทั้ง mastic จะมีความแน่นหนาและความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น (Ishai และ Craus, 1996)



รูปที่ 2.5 อนุภาคของฟิลเลอร์ที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์

Tunnicliff (1962) ยืนยันว่าผลของการทำให้แข็งขึ้นบริเวณพื้นผิวของฟิลเลอร์และความแข็งแรงลดลงตามระยะทางจากพื้นผิว และในระดับของแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับสารเคมีของฟิลเลอร์ ซึ่งเป็นสิ่งที่อธิบายว่าทำไมฟิลเลอร์ถึงมีรูปร่างคล้ายกัน ปริมาณ Rigden void และลักษณะพื้นผิวมีความแข็งแรงที่แตกต่างทางคุณสมบัติของแร่ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีบนพื้นผิว

ปริมาณโคลนในวัสดุฟิลเลอร์ก็เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ Woodward และคณะ (2002) ได้กล่าวไว้ว่าลักษณะพิเศษของโคลนในสารผสม asphalt เป็นปัจจัยที่สำคัญโดยลักษณะพิเศษแรกคือพื้นที่ผิวของโคลนที่มีขนาดกว้าง ที่ต้องการแอสฟัลต์มากขึ้นในการเคลือบ ลักษณะพิเศษอีกอย่างคือโคลนเมื่อเจอกับน้ำจะมีความยืดหยุ่นเหมือนพลาสติก (plastic) มากไปกว่านั้น โคลนจากกลุ่ม smectite และ montmorillonite ที่มีความอันตรายเนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเก็บความชื้นไว้ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อวัฏจักรการแช่แข็งหลอมเหลว (freezing-thawing cycle) (Woodward และคณะ, 2002) ปริมาณความชื้นที่มากในฟิลเลอร์จะลดพันธะระหว่างตัวผสมกับฟิลเลอร์ ซึ่งเกิดมาจากประจุของน้ำบริเวณผิว และการดูดซึมน้ำจะส่งผลต่อการต้านความเย็นของสารผสม asphalt มากไปกว่านั้น โคลนและอนุภาคที่เปราะมีแนวโน้มที่จะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนและแตกออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกันในระหว่วที่เกิดความเครียด ปริมาณเล็กน้อยของโคลนที่ขยายตัวในพื้นที่ที่คับแคบก็ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของ mastic

การทดสอบโดยเมทิลีนบลู (methylene blue value ;MBV) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบปริมาณโคลนในสถานะที่เป็นของเหลว เมทิลีนบลู จะเป็นสีที่เป็น cation ที่จะดูดซึมพื้นที่ผิวของโคลนที่มีประจุลบ วิธีนี้จะใช้การไตเตรท และฟिलเลอร์แห้ง 2 กรัมจะถูกผสมกับน้ำกลั่นหรือน้ำ deionized 200 mL สารละลายเมทิลีนบลูจะถูกเติมและเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนที่จะนำไปพักจนกว่าจะถึงจุดสมมูลของการดูดซึม หลังจากนั้นนำสารผสม 5 mL ไปปั่นเหวี่ยงและวิเคราะห์โดยเครื่อง spectrophotometer เพื่อหาปริมาณเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่และปริมาณที่ถูกดูดซึมโดย mineral ฟिलเลอร์ (Santanarina และคณะ,2002) ผลการทดลองจากโปรเจก NCHRP 9-45 แสดงให้เห็นว่าฟिलเลอร์ที่ถูกผลิตขึ้นเช่น แก้วลอย ตะกรันเตาหลอมพื้นดิน ที่มีค่า MBV ต่ำเช่นเดียวกันกับหินปูนและหินอ่อนในขณะที่ฟिलเลอร์บะซอลต์และแอนดีไซต์มีค่าสูง

อีกวิธีในการตรวจวัดปริมาณโคลน ทำโดยการตรวจวัดความเป็นพลาสติก (plasticity) โดยความเป็นพลาสติกของวัสดุคือความแตกต่างระหว่างจุดขอบเขตของพลาสติกและขอบเขตของของเหลวของวัสดุที่บางกว่า 0.4 mm (NPRA R210) ขั้นตอนในการหาขอบเขตของพลาสติกจะอธิบายอยู่ในวิธี 14.442 ใน NPRA R210 และตรวจวัดโดยการแยกฟिलเลอร์ที่เพิ่มความชุ่มชื้น 20 กรัมขอบเขตของพลาสติก คือปริมาณน้ำที่ทำให้แยกชั้นส่วนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm ขอบเขตของของเหลวคือปริมาณน้ำในฟिलเลอร์ที่ทำให้ร่องของโคน (cone) กลายเป็น 10 mm เมื่อโคนถูกปล่อยจากพื้นผิวของฟिलเลอร์ กระบวนการนี้ได้ถูกอธิบายเพิ่มเติมในวิธี 14.441 ใน NPRA R210 การวัดทั้งสองใช้ในการหาดัชนีความเป็นพลาสติก (plasticity index) โดยสมการ (5)

$$PI = LL - PL \quad (5)$$

เมื่อ PI = plasticity index , PL = ขอบเขตความเป็นพลาสติก, LL= ขอบเขตของของเหลว

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

ปริมาณสารอินทรีย์ในวัสดุฟิลเลอร์ ในงานวิจัยได้พิจารณาถึงอันตรายจากการแตกหักและการแยกชิ้นส่วนที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการทางชีวเคมี (Kandhal และคณะ, 1998; Hintz และคณะ, 2010; Melotti และคณะ, 2013) การแยกชิ้นส่วนส่งผลต่อโครงสร้างของดิน ซึ่งนำไปสู่การเป็นรูพรุนสูงและทำให้น้ำสามารถเข้าไปแทรกซึมได้ง่าย ฟิลเลอร์ที่มีปริมาณสารอินทรีย์จะมีความชื้นสูง อุ่มน้ำได้ดี และมีแรงยึดติดระหว่างฟิลเลอร์และตัวประสานต่ำ ซึ่งหมายความว่าปริมาณสารอินทรีย์ในฟิลเลอร์ควรจะน้อย โดยการวัดปริมาณสารอินทรีย์วัดได้จากน้ำหนักที่หายไปจากการเผา (the loss of ignition test; LOI test) ตามวิธีการที่ระบุในวิธี 14.445 ใน NPRA R210 และใน AASHTO T267 ในการทดสอบ LOI ฟิลเลอร์จะนำไปอบแห้งที่ 110°C 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปไว้ในเตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace) ที่ $455 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 6 ชั่วโมง เป็นอุณหภูมิที่สามารถเผาสารอินทรีย์หมด ความแตกต่างของน้ำหนักของตัวอย่างก่อนและหลังเผาจะรายงานเป็นค่า LOI NPRA N200 ต้องการให้ฟิลเลอร์ที่ใช้ไม่ประกอบด้วยสารอินทรีย์

ในการศึกษาลักษณะของแร่ธาตุของวัสดุฟิลเลอร์ที่มีผลต่อการทำงานของ mastic พื้นระของตัวประสาน asphalt จะเน้นหาตามประเภทของแร่ธาตุ เพราะแรงยึดติดของฟิลเลอร์ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูด ฟิสิกส์และปฏิกิริยาเคมีที่มีปริมาณแคลเซียมสูงจะเป็น hydrophobic และมีแนวโน้มที่จะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับยางมะตอย ฟิลเลอร์ที่เป็นซิลิกอนเช่นฟิลเลอร์จาก ควอตซ์และแกรนิต จะมีคุณสมบัติเป็น hydrophilic และจะจับกับน้ำได้ดีกว่ายางมะตอย ฟิล์มที่เคลือบฟิลเลอร์ที่ชอบน้ำจะกลายเป็นแถบเมื่อเจอกับน้ำ วัสดุพวกแคลเซียมซึ่งเป็น hydrophobic จะมีประจุบวกเมื่อสัมผัสกับน้ำ ในขณะที่ฟิลเลอร์ซิลิกอนจะเป็นประจุลบ โดยประจุเหล่านี้จะส่งผลต่อการยึดติด ในการเพิ่มการยึดติดควรเติมเอมีนเพื่อเป็นสารเพิ่มพันธะระหว่างธาตุ hydrophobic และยางมะตอย (Robert และคณะ, 1996)

จากที่ฟิลเลอร์หลายๆชนิดประกอบไปด้วยธาตุต่างๆที่แตกต่างกัน ทำให้ฟิลเลอร์มีลักษณะที่เป็นทั้ง hydrophilic และ hydrophobic แต่ในการเกิดปฏิกิริยาของฟิลเลอร์จะสามารถดูได้จากปริมาณแคลเซียม ซึ่งวิธี X-ray fluorescence spectrometry เป็นวิธีที่สามารถบอกปริมาณแคลเซียมออกไซด์ได้ (CaO) (Hintz และคณะ, 2010) ในการทดสอบนี้จะปล่อยรังสี fluorescent X-ray จากฟิลเลอร์แล้วตรวจวัดความเข้มแสง การศึกษานี้ทำให้เห็นว่าฟิลเลอร์ที่เป็นตะกั่วซึ่งมีปริมาณ CaO สูง ในขณะที่ฟิลเลอร์จากแกรนิตมีปริมาณ CaO ต่ำ นอกจากนี้พบว่าฟิลเลอร์หินปูนประกอบไปด้วย CaCO_3 ในขณะที่ปูนขาวประกอบไปด้วย Ca(OH)_2 (Lerfeld, 2000; NCHRP Project 9-45, 2010) ปริมาณแคลเซียมสำคัญต่อความแข็งแรงของฟิลเลอร์ เช่นเดียวกับความแข็งแรงของ mastic (Anderson, 1979) Wang และคณะ (2011) พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CaO และความเป็นร่องลึกใน asphalt โดยปริมาณ CaO สูงจะมีร่องน้อย

2.6.2 Asphalt mixtures

Filler ทำให้ความสม่ำเสมอและความแข็งแรงกับ mastic และทำให้ asphalt mixture เกิดความเสถียรโดยการเติมเต็มช่องว่างของส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งเป็นตัวเพิ่มความหนาแน่นให้กับ mixture ขึ้นตอนในแลบในการหาความถ่วงจำเพาะสูงสุดตามทฤษฎีของ asphalt mixture ถูกพัฒนาโดย James Rice ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงเรียกกันว่าความหนาแน่น Rice ในตำราอเมริกัน วิธีทั่วไปในการแทนค่าความหนาแน่นสูงสุดจากความถ่วงจำเพาะสูงสุดตามทฤษฎีคือใช้สัญลักษณ์ Gmm. สัญลักษณ์นี้อาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดได้เนื่องจากค่าที่คำนวณออกมาได้นั้นเป็นค่าของความหนาแน่นไม่ใช่ความถ่วง

2.7 ความไวต่อความชื้น (Moisture Susceptibility)

ความไวต่อความชื้นเป็นสาเหตุหลักของความเสียหายในผิวทางแบบ HMA และ HMA อาจถูกพิจารณาว่าไวต่อความชื้น หากการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมอ่อนตัวในที่ที่มีน้ำ การอ่อนตัวนี้หากรุนแรงเพียงพออาจส่งผลให้เกิดการหลุดร่อน (รูปที่ 2.7) ในการวัดว่าโอกาสที่จะเกิดความเสียหายต่อความชื้นของสารผสม HMA สามารถทำการทดสอบความไวต่อความชื้นได้ ผลจากการทดสอบความไวต่อความชื้นอาจใช้ในการทำนายศักยภาพในการหลุดร่อนในระยะยาวและประเมินสารป้องกันการหลุดร่อนซึ่งเพิ่มลงในแอสฟัลต์รวมหรือ HMA เพื่อป้องกันการหลุดร่อน



รูปที่ 2.6 การแตกล้าที่มีสาเหตุมาจากการหลุดร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ความเสียหายจากความชื้น (Moisture damage)

เป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่าอัตราการเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์อาจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อน้ำสามารถเข้าสู่ผิวทางได้ ในบางกรณีการเสียหายนั้นรวมถึงแยกออกจากกันของส่วนผสมแอสฟัลต์ภายในเวลาไม่กี่ปีหลังจากการก่อสร้าง (Parr 1958, Sha 1999)

ความเสียหายจากความชื้นเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์โดยการสูญเสียการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และพื้นผิวมวลรวมและ / หรือการสูญเสียการเกาะกลุ่มกันภายในตัวแอสฟัลต์เนื่องจากการกระทำของน้ำ ความเสียหายจากความชื้นมักส่งผลกระทบต่อความสมบูรณ์ของการผสม ดังนั้นจึงสามารถลดอายุการใช้งานของผิวทางได้โดยการเร่งความเร็วทุกปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบผิวทาง รวมถึง การแตกร้าว การล้า การเปลี่ยนรูปแบบถาวร และการแตกร้าวด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีตแอสฟัลต์ ในบางกรณีความชื้นอาจทำให้ส่วนผสมของแอสฟัลต์อ่อนตัวลงโดยการทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์อ่อนตัวลงหรืออ่อนตัวลงบางส่วนโดยไม่ได้หลุดร่อนออกจากพื้นผิวของมวลรวม การสูญเสียความแข็งหรือความแข็งแรงที่เกิดขึ้นนั้นสามารถย้อนกลับได้เมื่อน้ำถูกนำออกจากส่วนผสม (Santucci 2002). อย่างไรก็ตามถ้าผิวทางได้รับแรงกระทำในขณะที่อ่อนตัวอาจทำให้ไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

ความเสียหายจากความชื้นในถนนคอนกรีตแอสฟัลต์เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนได้รับผลกระทบจากปัจจัยหลายประการรวมถึงคุณสมบัติของวัสดุองค์ประกอบของส่วนผสม สภาพการระบายน้ำของผิวทาง แรงกระทำเนื่องจากการจราจรและลักษณะสภาพแวดล้อม เงื่อนไขที่จำเป็นอันดับแรกสำหรับความเสียหายจากความชื้นคือการเข้าสู่คอนกรีตแอสฟัลต์ของความชื้น หากความชื้นไม่สามารถซึมผ่านของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ ความเสียหายจากความชื้นจะเกิดขึ้นน้อยมากยกเว้นพื้นผิวที่ขรุขระ ในความเป็นจริงแล้วช่องว่างอากาศนั้นมีอยู่ในทุกพื้นผิวแอสฟัลต์แม้กระทั่งส่วนผสมที่สร้างด้วยส่วนผสมพิเศษเช่น Gussasphalt (Huang และ Qian 2001) ความคิดรวบยอดคือต้องมีช่องว่างหรืออย่างน้อยก็หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับการผสมที่จะไม่มีการเสียรูปถาวรที่ยอมรับไม่ได้ภายใต้การจราจรที่อุณหภูมิสูงและไม่ให้เกิดการ “ เยิ้ม ” ขึ้นที่พื้นผิว ซึ่งทั้งสองอย่างนี้ทำให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัย (Terrel et al. 1994) สำหรับส่วนผสมแบบทั่วไปจะมีการเกิดร่องและการเยิ้มของแอสฟัลต์ หากปริมาณช่องว่างอากาศน้อยกว่าร้อยละสาม

ในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปส่วนผสมที่จะถูกออกแบบที่ปริมาณช่องว่างในอากาศ 4 % แต่ปริมาณช่องว่างในอากาศจริงมักจะอยู่ในช่วงระหว่าง 6 และ 12 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ที่แนะนำโดย Terrel et al (1994). เนื่องจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการชี้ให้เห็นว่าในช่วงนี้ช่องว่างอากาศจะกลายเป็นช่องว่างระหว่างกันและความชื้นสามารถไหลออกมาได้ง่าย ในขณะที่ปริมาณอากาศช่วงที่ต่ำกว่านี้ช่องอากาศจะถูกตัดการเชื่อมต่อทำให้ไม่สามารถเข้าสู่ช่องว่าง แต่ไม่สามารถหลบหนีได้อย่างอิสระ ช่องว่างเหล่านี้เป็นช่องทางสำคัญในการเข้าถึงน้ำซึ่งอาจมาจาก น้ำฝน น้ำซังหรือน้ำใต้ดินเพื่อเข้าสู่แอสฟัลต์คอนกรีต ช่องว่างในมวลรวมอาจดักจับความชื้นบางส่วนในระหว่างการก่อสร้างเนื่องจากการอบแห้งที่ไม่สมบูรณ์โดยเฉพาะในโรงงานที่ใช้เครื่องผสมแบบดรัม นอกจากนี้ น้ำบางส่วนอาจสามารถซึมผ่านเข้าไปในแอสฟัลต์ได้ (Nguyen et al. 1996)

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียหายจากความชื้นเป็นผลมาจากการมีปฏิกิริยาของการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมภายในส่วนผสม HMA ปฏิกิริยานี้สามารถทำให้การยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวมลดลง (รูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9) เรียกว่าการหลุดร่อนซึ่งจะนำไปสู่รูปแบบต่างๆของความเสียหายบนผิวทาง HMA รวมถึงรอยแตกและความล้า

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีการใช้การทดสอบหลายแบบเพื่อประเมินความเสี่ยงต่อความชื้นที่เกิดจากส่วนผสมของ HMA การทดสอบเหล่านี้มีตั้งแต่แบบง่าย ๆ (เช่น boiling test) จนถึงการทดสอบที่ซับซ้อนมากขึ้น (เช่น Hamburg wheel tracking test) การทดสอบความไวต่อความชื้นที่ระบุโดยการออกแบบผสม Superpave เรียกว่า modified lottman test



รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง HMA ที่ไม่มีความเสียหายจากความชื้น (ซ้าย) และความเสียหายจากความชื้น (ขวา) สังเกตปริมาณมวลรวมที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวบนตัวอย่างที่เสียหาย



รูปที่ 2.8 ตัวอย่าง HMA ที่ไม่มีความเสียหายจากความชื้น (ซ้าย) และความเสียหายจากความชื้น (ขวา) ตัวอย่างที่ละเอียดยิ่งกว่ารูปที่ 2.5 แต่ยังคงมีมวลรวมที่ไม่ได้รับการเคลือบผิวที่เห็นได้ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 อิทธิพลของความชื้นที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของผิวทาง (Moisture Effect on Pavement Performance)

ผลโดยตรงของความชื้นคือการอ่อนตัวหรือสูญเสียความแข็งแรงของพันธะภายในแอสฟัลต์และความแข็งแรงของส่วนผสม ซึ่งเป็นพื้นฐานของประสิทธิภาพที่ต้องการมากที่สุดในการปูผิวทาง ความเสียหายจำนวนมากจะเกิดขึ้นเนื่องจากความชื้น เช่น fatigue cracking, rutting และ raveling เป็นต้น

Rutting ที่เกิดขึ้นในแอสฟัลต์คอนกรีตส่วนใหญ่เกิดที่ผิวด้านบน ในกรณีที่มีแรงเฉือนเนื่องจากการรับโหลดที่สูงจากล้อ เนื่องจากชั้นผิวมีโอกาสสูงที่จะอิ่มตัวด้วยน้ำ การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในของแอสฟัลต์ที่มีสาเหตุมาจากน้ำนั้น ไปลดแรงเฉือนของแอสฟัลต์คอนกรีตและเร่งให้เกิด Rutting โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อส่วนผสมนั้นไวต่อความชื้น ปริมาณน้ำฝนที่มากและการจราจรที่หนาแน่น โดยการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในของแอสฟัลต์ในชั้นผิวด้านบนนั้นอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายจากบนลงล่าง

Raveling เกิดขึ้นที่ผิวทาง ซึ่งความเครียดที่เกิดจากการจราจร เป็นการรวมกันของความเค้นแนวตั้งที่ไม่สม่ำเสมอและแรงแนวระนาบแนวนอน และด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงดึงในแนวระนาบ น้ำจะลดความต้านทานแรงดึงของพื้นผิวส่วนผสมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้รอยร้าวและการแยกตัวเกิดขึ้นภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกของการจราจร

บางครั้งแอสฟัลต์ที่ลอกออกจากพื้นผิวมวลรวมภายในแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถโยกย้ายไปยังพื้นผิวถนนได้เนื่องจากการจราจร แอสฟัลต์มักเกินไปที่ผิวหน้าหรือที่เรียกว่า“เยิ้ม” ช่วยลดแรงเสียดทานของพื้นผิวและเพิ่มความเสี่ยงในการจราจร

2.10 การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว (Failure)

การมีอยู่ของน้ำในแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถนำไปสู่กลไกความเสียหายอย่างน้อยหนึ่งอย่างดังต่อไปนี้

2.10.1 การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวภายในของแอสฟัลต์ (Loss of Cohesion)

ในแอสฟัลต์คอนกรีต แรงยึดเหนี่ยวภายในของแอสฟัลต์ ถูกอธิบายว่าเป็นความสมบูรณ์โดยรวมของวัสดุเมื่ออยู่ภายใต้ภาระหรือความเครียด และได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ เช่นความหนืดของฟิล์มแอสฟัลต์

ความชื้นสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการเสียรูปและการไหลของแอสฟัลต์และลดแรงยึดเหนี่ยวภายในของแอสฟัลต์ สิ่งนี้ได้ถูกสังเกตโดยนักวิจัยหลายคน (Williams 1998) ได้ทำการทดลองโดย แช่ตัวอย่างแอสฟัลต์ในน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 และ 27 สัปดาห์และสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ESEM) ซึ่งความลึกที่น้ำแทรกซึมเพิ่มขึ้นจาก 183 ไมครอนเป็น 278 ไมครอนตลอดระยะเวลา 21 สัปดาห์ (Robertson 1991) คาดการณ์ว่า คาดการณ์ว่าแอสฟัลต์มีความสามารถในการรวมและลำเลียงน้ำ โดยอาศัยแรงดึงดูดของโมเลกุลของน้ำที่มีขั้วกับองค์ประกอบที่มีขั้วของแอสฟัลต์ Nguyen et al. (1996) ยังชี้ให้เห็นอีกว่าส่วนผสมที่มีขั้วสูงและสิ่งเจือปนที่ละลายน้ำได้ (เช่นไอออนและเกลือ) ในแอสฟัลต์ ทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดขึ้นในบริเวณนั้น ดังนั้นการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านแอสฟัลต์ไปยัง

ผิวสัมผัสระหว่างระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ ไม่ใช่การแพร่กระจายที่สม่ำเสมอ แต่เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ที่คาดเคลื่อนผ่านทางรูอากาศ

2.10.2 การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแอสฟัลต์กับผิวมวลรวม (Loss of Adhesion)

สำหรับการผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น มีวัตถุประสงค์ของการออกแบบเพื่อเคลือบพื้นผิวของมวลรวมทั้งหมดด้วยฟิล์มแอสฟัลต์ แรงดึงดูดระหว่างฟิล์มแอสฟัลต์และพื้นผิวมวลรวมถูกกำหนดให้เป็นการยึดเกาะแบบ adhesion น้ำสามารถทำลายการยึดเกาะได้ด้วยสองกลไกคือ detachment และ displacement

Detachment คือการแยกแอสฟัลต์ออกจากพื้นผิวของมวลรวมด้วยฟิล์มบาง ๆ ของน้ำโดยปราศจากการต่อต้านของฟิล์มแอสฟัลต์ ในขณะที่น้ำเคลื่อนที่เข้าแทรกบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมนั้น อาจอธิบายได้โดยทฤษฎีพลังงานรูปแบบคลื่นและ / หรือทฤษฎีปฏิกิริยาเคมี

แอสฟัลต์ซึ่งเป็นส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีส่วนน้อยที่เป็นเฮเทอโรอะตอม (เช่นไนโตรเจนออกซิเจนและกำมะถัน) และโลหะ (เช่นวานาเดียม นิกเกิล และเหล็ก) ส่งผลให้คุณสมบัติมีขั้วเล็กน้อย ในทางกลับกัน น้ำมีขั้วที่สูงมาก ดังนั้นในระบบของ มวลรวม แอสฟัลต์และน้ำนั้น น้ำสามารถเข้าแทนที่แอสฟัลต์โดยส่วนใหญ่จะอาศัยพื้นผิวของมวลรวม เพราะจะสามารถลดพลังงานอิสระของระบบเพื่อให้เกิดสภาพเสถียรทางอุณหพลศาสตร์ (Stuart 1990.) งานวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของแอสฟัลต์และมวลรวมแสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองนี้อาจก่อพันธะทางเคมีเช่นพันธะโคเวเลนต์ (Plancher et al. 1977) เมื่อน้ำสัมผัสกับพื้นผิวของมวลรวมจะทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสและกระบวนการสลายตัวเริ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งส่งผลให้น้ำโดยรอบมีการเปลี่ยนแปลงค่า pH เกิดขึ้น (Scott 1978, Nguyen et al. 1996) การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำสามารถเปลี่ยนประเภทย่อยของกลุ่มขั้วโลกที่ถูกดูดซับโดยมวลรวม นำไปสู่การเกิดประจุลบขึ้นที่ผิวของแอสฟัลต์แล้วผิวของมวลรวมจึงทำให้เกิดการแยกออกจากกันของมวลรวมและแอสฟัลต์ (Scott 1978, Tarrer 1986)

สำหรับการแยกออกหรือการเข้าแทนที่ที่จะเกิดขึ้นนั้นจำเป็นต้องมีความชื้นอยู่ระหว่างผิวสัมผัสระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวม นอกจากนี้การเกิดอิมัลชันโดยธรรมชาติ การอบแห้งที่ไม่เพียงพอ การเคลือบผิวมวลรวมที่ไม่สมบูรณ์จนกระทั่งระหว่างกระบวนการก่อสร้าง ซึ่งทำให้น้ำสามารถซึมผ่านไปยังผิวของมวลรวมได้หลายวิธี เช่น การรั่วของแผ่นแอสฟัลต์ การออสโมซิส เป็นต้น

กลไกความเสียหายของความชื้นที่กล่าวถึงข้างต้นเป็นที่รู้จักกันมานานหลายปี แต่เป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปหรือในระดับแนวคิดและแสดงให้เห็นในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เนื่องจากความซับซ้อนขององค์ประกอบส่วนผสมและโครงสร้างและปัจจัยที่มีอิทธิพลจำนวนมากในสนาม จึงเป็นเรื่องยากที่จะประเมินการมีส่วนร่วมของแต่ละกลไกในสนาม อาจเป็นไปได้ว่าปัจจัยเหล่านั้นอาจแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญภายใต้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพสนามที่แตกต่างกัน ข้อบ่งชี้ประการหนึ่งจากกลไกคือความเสียหายที่เกิดจากความชื้นจำนวนหนึ่งเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้สำหรับส่วนผสม อย่างไรก็ตามอัตราและความรุนแรงของความเสียหายอาจลดลงได้โดยการปรับการออกแบบส่วนผสมหรือการใช้สารลดแรงตึงผิว

2.11 การยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวม (Asphalt Binder and Aggregate Adhesion)

ความเสียหายจากความชื้นคือการลดการยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และพื้นผิวของมวลรวมในส่วนผสม HMA เพื่อให้เข้าใจถึงสาเหตุและมาตรการป้องกันจะมีการนำเสนอการอภิปรายสั้น ๆ เกี่ยวกับกลไกการยึดเกาะ มี 4 วิธีหลักของการยึดเกาะขมะตอยและมวลรวม

2.11.1 เชิงกล (Mechanical)

แอสฟัลต์เข้าสู่พื้นผิวและรูของมวลรวมจะแข็งตัวแล้วทำให้เกิดการล็อกทางกล ความชื้นในมวลรวมสามารถรบกวนการแทรกซึมของแอสฟัลต์ที่เข้าไปในมวลรวมและลดการล็อกทางกลซึ่งจะเป็นการเพิ่มความไวต่อการหลุดร่อน

2.11.2 เชิงเคมี (Chemical)

ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแอสฟัลต์และพื้นผิวมวลรวมเกิดการยึดเกาะทางเคมี โดยทั่วไปมวลรวมกับพื้นผิวที่เป็นกรดจะไม่ทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับขมะตอย ปฏิกิริยาที่อ่อนแอกว่านี้อาจไม่แข็งแรงพอที่จะตอบโต้ปัจจัยความเสียหายจากความชื้น

2.11.3 แรงยึดเกาะ (Adhesion tension)

แรงยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมที่ โดยทั่วไปแล้วจะน้อยกว่าแรงยึดเกาะระหว่างน้ำกับมวลรวม ดังนั้นหากทั้งสามสิ่งนี้สัมผัสกันน้ำจะมีแนวโน้มที่จะแทนที่แอสฟัลต์ จึงอาจส่งผลให้เกิดการเปียกของพื้นผิวมวลและทำให้แอสฟัลต์เกิดการหลุดร่อน แรงยึดเกาะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมนั้นแปรผันตามชนิดของแอสฟัลต์ ประเภทมวลรวมและความหยาบผิวมวลรวม

2.11.4 การวางแนวของโมเลกุล (Molecular orientation)

เมื่อมีการสัมผัสกันระหว่างแอสฟัลต์กับมวลรวม โมเลกุลแอสฟัลต์มีแนวโน้มที่จะปรับทิศทางตัวเองให้สัมพันธ์กับไอออนบนพื้นผิวมวลรวมซึ่งสร้างแรงดึงดูดที่อ่อนแอแอสฟัลต์และพื้นผิวมวลรวม หากโมเลกุลของน้ำซึ่งเป็น dipolar มีจำนวนมากกว่าโมเลกุลแอสฟัลต์ อาจทำให้เกิดการตอบสนองความต้องการพลังงานของพื้นผิวมวลรวม ทำให้การรวมตัวกันแอสฟัลต์ที่อ่อนแอส่งผลให้เกิดการหลุดร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสียหายของความชื้น (Factors Influencing Moisture Damage)

ความไวต่อความชื้นเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับกลไกที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ ธรรมชาติของกลไกเหล่านี้และปฏิกิริยาของสิ่งเหล่านั้นทำให้ยากต่อการทำนายด้วยความแน่นอนว่าลักษณะเฉพาะนั้นจะเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาความไวต่อความชื้นหรือไม่ โดยทั่วไปความไวต่อความชื้นจะเพิ่มขึ้นตามปัจจัยใดก็ตามที่เพิ่มความชื้นใน HMA ลดการยึดเกาะของแอสฟัลต์ไปยังพื้นผิวมวลรวมหรือการเกาะตัวของแอสฟัลต์ ปัจจัยต่างๆที่ระบุไว้ด้านล่างนี้มีอิทธิพลต่อความไวต่อความชื้นในระดับหนึ่ง แต่ปัจจัยใดเป็นมาตรฐานสำหรับการทำนายความไวต่อความชื้น

2.12.1 ลักษณะของแอสฟัลต์ (Asphalt binder characteristics)

ความเหนียวมีความสำคัญเนื่องจากอาจบ่งบอกถึงความเข้มข้นของ asphaltenes ที่สูงขึ้น (โมเลกุลมีขนาดใหญ่) โมเลกุลมีขี้สามารถสร้างแรงยึดเกาะที่มากขึ้นและการยึดเกาะในแนวโมเลกุล ดังนั้นความเหนียวที่ต่ำกว่าซึ่งอาจแสดงถึงความเข้มข้นต่ำกว่าของ asphaltenes โดยทั่วไปมีความไวต่อการหลุดร่อนองค์ประกอบแอสฟัลต์เช่น ซัลฟอกไซด์ กรดคาร์บอกซิลิกฟีนอลและสารประกอบไนโตรเจน ก็อาจส่งผลกระทบต่อศักยภาพในการหลุดร่อน

2.12.2 ลักษณะของมวลรวม (Aggregate characteristics)

โดยทั่วไปมวลรวมที่ชอบน้ำ มีแนวโน้มที่หลุดร่อนออกมามากกว่ามวลรวมที่ไม่ชอบน้ำ เราสามารถหลีกเลี่ยงการรวมตัวที่ไวต่อการหลุดร่อนหรือตัวปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์เพื่อป้องกันการหลุดร่อน การสรุปที่สำคัญที่กำหนดคุณสมบัติการชอบน้ำและไม่ชอบน้ำนี้

2.12.2.1 เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry)

พื้นผิวที่สามารถสร้างพันธะได้ง่ายขึ้นโดยแอสฟัลต์และมีโอกาสน้อยที่จะเกิดการหลุดร่อน โดยทั่วไปแล้วพื้นผิวมวลรวมที่เป็นกรดมากกว่าจะไวต่อการหลุดร่อน เหล็กแมกนีเซียมแคลเซียมและอลูมิเนียมอาจมีประโยชน์ในกรณีที่โซเดียมและโพแทสเซียมถือว่าเป็นอันตรายต่อการสร้างพันธะ (Hicks, 1991)

2.12.2.2 รูพรุนและขนาดของรูพรุน (Porosity and pore size)

ขนาดรูพรุนเป็นปัจจัยสำคัญ หากรูพรุนใหญ่พอที่จะยอมให้แอสฟัลต์เข้ายึดเกาะ ความพรุนสูงจะส่งผลให้มีการดูดซับสูงซึ่งหมายความว่าต้องใช้แอสฟัลต์มากขึ้นเพื่อให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพตามที่ต้องการ ในทางกลับกันหากมีความพรุนในปริมาณไม่สูงที่ แอสฟัลต์จะมีการดูดซับน้ำน้อยลง เพื่อสร้างแผ่นฟิล์มแอสฟัลต์รอบอนุภาควรรวมที่ก่อให้เกิดการหลุดร่อนเร็วขึ้น

2.12.3 ช่องว่างอากาศ (Air voids)

การดูดซับแอสฟัลต์ของมวลรวมมีผลต่อปริมาณของช่องว่างอากาศในส่วนผสม HMA เมื่อช่องว่างอากาศของ HMA เกินกว่าร้อยละ 8 โดยปริมาตรอาจเชื่อมต่อกันได้และปล่อยให้ น้ำซึมผ่าน HMA ได้ง่ายและทำให้เกิดความเสียหายต่อความชื้นจากแรงดันน้ำหรือการขยายตัวของน้ำแข็ง ในการแก้ไขปัญหา นี้การออกแบบส่วนผสม HMA จะปรับปริมาณแอสฟัลต์และการกละของมวลรวมเพื่อทำให้เกิดช่องว่างอากาศประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างอากาศที่มากเกินไปอาจเกิดมาจากการออกแบบส่วนผสมหรือปัญหาจากการก่อสร้างและในที่นี้จะเน้นเฉพาะปัญหาการออกแบบผสม

พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (Porous Asphalt Concrete) พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตคือการนำวัสดุผสมร้อนระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ที่โรงงานผสมโดยควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิตามที่กำหนด โดยพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตมีลักษณะผิวหน้าหยาบ มีรูพรุน น้ำซึมผ่านได้ดี และค่าความฝืดของผิวทางสูง และเพื่อใช้ในการก่อสร้างเป็นผิวทาง โดยการปูและบดทับบนชั้นรองผิวทาง (Binder Course) หรือชั้นผิวทางเดิมที่ได้ระดับความลาดซึ่งน้ำซึมผ่านไม่ได้ โดยก่อนปูผิวทางต้องทำการแทคโคท (Tack Coat)

และการแบ่งการกละขนาดนี้เรียกว่า Open-Graded Friction Course (OGFC) การที่มีปริมาณรูพรุนค่อนข้างมากเกิดจากการใช้วัสดุมวลรวมขนาดใหญ่ในปริมาณมากโดยปกติจะใช้วัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ไม่เกิน 20% ทั้งนี้การผลิตพอร์สแอสฟัลต์ มีขั้นตอนไม่แตกต่างจากการผลิตแอสฟัลต์ทั่วไป โดยที่ความแตกต่างที่สำคัญอย่าง เดียวคือ การคัดขนาดมวลรวม (Gradation) ที่มีวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่กว่าปกติ

2.12.4 สภาพอากาศในการก่อสร้าง (Construction weather)

การก่อสร้างในสภาพอากาศที่เย็นสามารถนำไปสู่การบดอัดไม่เพียงพอส่งผลให้เกิดช่องว่างอากาศสูงและพื้นผิว HMA ที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ สิ่งนี้มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มปริมาณของน้ำในโครงสร้างของผิวทางและทำให้เกิดความเสียหายจากชื้น สภาพอากาศที่เปียกยังสามารถเพิ่มความชื้นใน HMA ที่สร้างขึ้นอีกด้วย

2.12.5 ภูมิอากาศ (Climate)

สภาพภูมิอากาศที่ชื้น วัฏจักรการแช่แข็งและละลายของน้ำและความผันผวนของอุณหภูมิ สิ่งเหล่านี้สามารถทำให้ความชื้นเข้าสู่โครงสร้าง HMA ได้มากขึ้นซึ่งจะเป็นการเพิ่มโอกาสที่จะถูกทำลายจากความชื้น

2.12.6 การจราจร (Traffic)

หากมีน้ำอยู่ในโครงสร้าง HMA ปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นสามารถเร่งให้เกิดความเสียหายจากความชื้นได้ด้วยเหตุผล 2 ประการ

2.12.6.1 แรงดันน้ำสะสม (Pore pressure buildup)

หากน้ำอยู่ในรูมวลรวมและไม่สามารถออกมาได้ การจราจรมีแนวโน้มที่จะบีบอัดรูเหล่านี้และก่อให้เกิดการสะสมของแรงดันซึ่งสามารถผลักแอสฟัลต์ออกจากพื้นผิวของมวลรวม

2.12.6.2 การกัดเซาะของของเหลว (Hydraulic scouring)

ล้อเคลื่อนที่บนผิวทาง HMA มีแนวโน้มที่จะทำให้ น้ำในผิวทางเกิดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่นี้ทำให้เกิดการกัดเซาะบนพื้นผิวซึ่งสามารถกัดเซาะแอสฟัลต์ออกจากพื้นผิวมวลรวม

2.13 มาตรการการป้องกัน (Preventive Measures)

มาตรการต่าง ๆ สามารถนำมาใช้เพื่อป้องกันหรืออย่างน้อยก็ลดความเสียหายจากความชื้น มาตรการเหล่านี้มีตั้งแต่การเลือกใช้วัสดุไปจนถึงการปฏิบัติงานก่อสร้างการออกแบบผิวทางและสารเติมแต่ง HMA:

- การเลือกมวลรวม เลือกมวลรวมความพรุนต่ำมีพื้นผิวที่ขรุขระและสะอาด
- ป้องกันการซึมผ่านของความชื้นสู่ผิวทาง HMA ลดความสามารถในการซึมผ่านของโครงสร้างผิวทางโดยจัดการกับปริมาณอากาศ โดยการเพิ่มขนาดและการกระจายของมวลรวม นอกจากนี้การปรับสภาพพื้นผิวเช่น fog seals, slurry seals หรือการเคลือบผิวบิทูมินัส (BSTs) สามารถกันน้ำที่พื้นผิว HMA
- ปรับเปลี่ยนคุณสมบัติพื้นผิวมวลรวมเพื่อแทนที่ไอออนที่มีแนวโน้มว่าจะมีผลต่อการยึดเกาะของแอสฟัลต์และมวลรวม

2.14 การทดสอบการต้านทานความชื้น

2.14.1 วิธีแรงดึงแบบทางอ้อม (Indirect tensile strength test)

การทดสอบแรงดึงแบบทางอ้อม ที่ระบุใน AASHTO T283 หรือที่เรียกว่า TSR (Tensile strength Ratio) เป็นการทดสอบที่ใช้กันมากที่สุดในการประเมินความเสียหายเนื่องจากความชื้นของแอสฟัลต์คอนกรีต การทดสอบมีด้วยกัน 2 สภาวะคือ สภาวะแห้ง คือเก็บตัวอย่างไว้ 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และ สภาวะความชื้น คือ แช่ตัวอย่างในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 60 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากนั้นนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องอีกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง การทดสอบนี้ถูกนำมาใช้ในระบบ Superpave ตามการทดสอบที่จำเป็นเพื่อตรวจสอบความไวต่อความชื้น นอกจากนี้การทดสอบนี้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการพิจารณาความเสียหายเนื่องจาก ผลของค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของตัวอย่างแบบขึ้น และค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของตัวอย่างแบบแห้งสามารถระบุได้ว่าเป็น อัตราส่วนความต้านทานแรงดึง (TSR)



รูปที่ 2.9 เครื่องมือสำหรับทดสอบ Indirect tensile strength

2.15 Image Processing & Analysis System (IPAS)

Sefidmazgi et al. (2012) และคณะได้พัฒนาซอฟต์แวร์การวิเคราะห์เฉพาะทางซึ่งมีดัชนีเพิ่มเติมที่ออกแบบมาเพื่อการหาปริมาณของโครงสร้างภายในของมวลรวม [45]. โดย Sefidmazgi et al. เชื่อว่าดัชนีโครงสร้างภายในของมวลรวมนั้นมีบทบาทสำคัญในการกำหนดความต้านทานการแตกร้าวของส่วนผสมแอสฟัลต์. และในบรรดาดัชนีเหล่านี้ ดัชนีหนึ่งที่เกี่ยวข้องเป็นพิเศษกับความต้านทานการเกิดร่องคือ The total proximity zone length (TPL) ซึ่งแสดงถึงจำนวนความยาวที่สัมผัสกันภายในโครงสร้างของมวลรวมและเชื่อมต่อกันภายในส่วนผสมแอสฟัลต์และแสดงถึงจำนวนความยาวสัมผัสที่เชื่อมต่อกันในส่วนผสมแอสฟัลต์. ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า TPL สามารถบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของการเชื่อมต่อภายในมวลรวม. จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ได้มีการใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลและวิเคราะห์ภาพ IPAS2 ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในแบบโครงกระดูกของมวลรวมและถือว่าเป็นแนวทางสำหรับการตรวจสอบการกระจายตัวของฝุ่นภายในแอสฟัลต์คอนกรีตและมวลรวมทั้งหมด. ความพยายามในการวิจัยในอดีตมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการซึมผ่านและความยาวในการสัมผัสภายในของมวลรวม และจำนวนการสัมผัสโดยใช้วิธี IPAS2. จากผลการศึกษาครั้งนี้ได้เผยให้เห็นถึงผลกระทบที่สำคัญของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งจำนวนในการสัมผัสและความยาวในการสัมผัสภายในมวลรวมและยังรวมถึงการซึมผ่านของส่วนผสมของแอสฟัลต์อีกด้วย [46]. จากงานวิจัยนี้มีส่วนช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับโครงสร้างภายในของมวลรวมแบบกระดูกภายในแอสฟัลต์และปฏิกริยาระหว่างแอสฟัลต์กับฝุ่น

IPAS2 โปรแกรมจะทำงานโดยจับความเข้มของสีตามลำดับในแต่ละพิกเซล เพื่อเริ่มต้นการวิเคราะห์และรูปภาพตัวอย่างจะถูกแปลงเป็นสีเทาในตอนแรก เพื่อให้สามารถแยกความแตกต่างระหว่างช่วงที่เป็นมวลรวม แอสฟัลต์และช่วงที่เป็นช่องว่างได้หลังจากนั้น รูปภาพตัวอย่างสีเทาจะถูกประมวลผลเป็นรูปแบบไบนารีซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างขนาดจุลภาคโดยการเลือกหลักเกณฑ์ที่เหมาะสม. และยังใช้เทคนิคการกรองภาพหลายชุดเพื่อปรับปรุงคุณภาพของรูปภาพตัวอย่างและมีการแยกเฟสวัสดุต่างๆที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ. เพื่อให้การวิเคราะห์ที่แม่นยำซอฟต์แวร์จำเป็นต้องมีข้อมูลอินพุตที่เกี่ยวข้องกับการคละกั้นของมวลรวมตามจริงซึ่งจากนั้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับคละกั้นที่ดึงออกมาจากภาพ. นอกจากนี้ข้อมูลปริมาตร รวมถึงเปอร์เซ็นต์ของช่องว่างในอากาศ ปริมาณของแอสฟัลต์ และความถ่วงจำเพาะของทั้งมวลรวมและแอสฟัลต์ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์. ข้อมูลเหล่านี้ใช้สำหรับการคำนวณพื้นฐานตามความสัมพันธ์เชิงปริมาตรและส่งผลให้มีการกำหนดเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตรของมวลรวม (P_{sv}). เปอร์เซ็นต์ระนาบสองมิติ (2D) ของพื้นที่รวมถูกคำนวณโดยใช้ค่า P_{sv} ในการคำนวณ. การคำนวณเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการยืนยันการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการระบุขอบเขตของมวลรวม [46]

2.17 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

และจากการวิจัยก่อนหน้านี้ Cheng et al. (2002) และคณะได้ศึกษาปรากฏการณ์การสูญเสียการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวแอสฟัลต์และมวลรวม โดยใช้หลักฐานของความสามารถในการคาดการณ์การลดความแข็งแรงภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวและจากการศึกษาครั้งนี้ยังรวมถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างความแข็งแรงของพันธะในกรณีที่ไม่มีความชื้นและความแข็งแรงของพันธะเมื่อได้รับความชื้นระหว่างแอสฟัลต์กับพื้นผิวของมวลรวม [1]

นอกจากนี้จากการศึกษาของ Chaturabong & Bahia (2016) เสนอแนะว่าการทดสอบ Binder Bond Strength(BBS) ถูกใช้เป็นการทดสอบการประเมินกลไกการสูญเสียการยึดเกาะของแมสติก [2]. จากการศึกษาครั้งนี้เน้นถึงอิทธิพลที่สำคัญของมวลกับฝุ่นต่อความไวต่อความเสียหายที่เกิดจากความชื้นของส่วนผสมแอสฟัลต์. โดยการศึกษานี้จะหาความสัมพันธ์ของ Rigden void กับปัจจัยอื่นๆ เช่น ช่องว่างอากาศ, การเชื่อมกันของมวลรวม เป็นต้น โดยใช้ซอฟต์แวร์การประมวลผลและวิเคราะห์ภาพ (IPAS2) เพื่อวิเคราะห์ผลรวมของระยะเชื่อมกันของมวลรวมแต่ละชนิดว่ามีความสัมพันธ์กับ Rigden void กับ การเชื่อมกันของมวลรวมในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแนวคิด Rigden voids(RV) เป็นวิธีในการทดสอบการตรวจสอบคุณลักษณะของฝุ่นแต่ละชนิด และพฤติกรรมกรไหลของฝุ่นซึ่งปริมาณเศษส่วนของช่องว่างในฝุ่นที่ถูกบดอัดแบบแห้งได้ง่ายและจากแนวคิด Rigden voids ที่ได้รับการดัดแปลงโดย Harris & Stuart (1995) [3] ได้กล่าวไว้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณเศษส่วนของช่องว่างระหว่างการบดอัดแบบแห้งและผลของการแข็งตัวของฝุ่นในแอสฟัลต์โดยที่ แนวคิดนี้กลายเป็นวิธีอิสระที่สามารถแยกฝุ่นที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกเหนือจากนี้ Romeo et al. (2016) และคณะได้ตรวจสอบการใช้งานของ Rigden Voids เพื่อเป็นตัวบ่งชี้การแข็งตัวของฝุ่นในแอสฟัลต์ [4] จากการศึกษาของพวกเขาได้เน้นถึงฝุ่นที่มีค่า Rigden Voids สูงซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับและการกระจายตัวของแอสฟัลต์แบบอิสระเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้ลักษณะการเสียดทานของอนุภาคของ ฝุ่นดีขึ้นตามที่ Zhang et al. (2019) [5] ได้ศึกษาไว้. และนอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า Rigden Voids กระ บวว่าเป็นปัจจัยสำคัญต่อความไวที่ส่งผลต่อความเสียหายที่เกิดจากความชื้นภายในแอสฟัลต์แมสติก (Asphalt mastic) [6].

Rigden (1947) ได้เสนอว่าการหาปริมาณเศษส่วนของช่องว่างเรียกว่า การทดสอบ Rigden Voids Test [7-9]. และวิธีการของ Rigden เกี่ยวข้องกับการแยกยางมะตอยที่แข็งตัว โดยการเติมช่องว่างในตัวอย่าง ที่ถูกบดอัดแบบแห้งจากแอสฟัลต์ส่วนเกินที่ถูกเรียกว่า แอสฟัลต์อิสระ(Free asphalt) [7]. และยังได้เสนอว่า เปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์อิสระเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดความสอดคล้องของการเติมเต็มช่องว่าง และสังเกตการ เปลี่ยนแปลงในความหนืดไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแอสฟัลต์หรือคุณสมบัติของฝุ่นใดๆ ยกเว้นปริมาณ เศษส่วนของช่องว่าง. การเติมฝุ่นลงไปโดยไม่คำนึงถึงคุณสมบัติที่แท้จริงได้รับการยอมรับเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของ แอสฟัลต์. DeSmedt เป็นผู้บุกเบิกการใช้ฝุ่นเติมลงไปเพื่อจำลองแอสฟัลต์ที่เป็นหินใน Washington, D.C., during the 1870s [10]. จากการศึกษาครั้งต่อมาพบว่า การกระจายขนาดอนุภาคของฝุ่นส่งผลต่อขอบเขตการ แข็งตัวของแอสฟัลต์แมสติก (Asphalt mastic) [11–13]. และแนวคิดของแอสฟัลต์อิสระเป็นคำอธิบายที่ ครอบคลุมเกี่ยวกับผลกระทบของการแข็งตัวของฝุ่นในแอสฟัลต์ [14]. จากการศึกษาหลายครั้งสรุปได้ว่า คุณลักษณะทางเรขาคณิตของฝุ่น รวมถึงขนาด รูปร่าง ความเป็นมุม และพื้นผิวส่งผลต่อค่า Rigden voids ดังนั้นปริมาณเศษส่วนของช่องว่างจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของความแข็งแรงของ แอสฟัลต์ [15–28].

Faheem et al. (2012) และคณะได้กล่าวถึงปริมาณเศษส่วนของช่องว่างของฝุ่นนั้นมีอิทธิพลต่อ ความหนืดของแมสติกและการคืนตัวอย่างไม่สมบูรณ์โดยมีความสัมพันธ์กันอย่างมากระหว่างคุณสมบัติของแม สติกกับการวัดประสิทธิภาพของส่วนผสม [29]. โดยค่า Rigden Voids ของมวลรวมได้รับอิทธิพลจากปัจจัย หลายประการ รวมถึงขนาดอนุภาค รูปร่าง การกระจายตัว ประเภท และปริมาณของฝุ่น และความหนืดของ แอสฟัลต์. ซึ่งการพิจารณาค่า Rigden Void จำเป็นต้องบดอัดตัวอย่างส่วนผสมภายใต้สภาวะควบคุม ตามด้วย การทดสอบต่างๆ เพื่อวัดความหนาแน่น ความพรุน และความสามารถในการซึมผ่านของตัวอย่าง ซึ่งการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการรับรองว่าส่วนผสมตรงตามข้อกำหนดที่กำหนดไว้และทำงานได้ตามที่คาดหวังในภาคสนาม. และพบว่าค่า Rigden Voids มีอิทธิพลที่เป็นไปได้ที่สำคัญที่สุดต่อการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีต [30, 31] ดังนั้นค่า Rigden Voids จึงถือเป็นการวัดความแข็งของส่วนผสมระหว่างฝุ่นและแอสฟัลต์ [30, 32]. นอกจากนี้พบว่าฝุ่นที่มีค่า Rigden Voids สูงจะส่งผลให้เกิดส่วนผสมที่แข็ง [33].

พื้นที่ผิวที่กว้างของปริมาณเศษส่วนของช่องว่างของฝุ่นเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมแบบหยาบภายในส่วนผสมเน้นย้ำถึงความเป็นไปได้ของปฏิกิริยากายภาพและปฏิกิริยาเคมีระหว่างแอสฟัลต์และฝุ่น ทำให้เป็นตัวบ่งชี้สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของส่วนผสม. การใช้ฝุ่นเติมลงไปในส่วนผสมของแอสฟัลต์เริ่มมีขึ้นตั้งแต่ทศวรรษที่ 1870 [34].และนักวิจัยคนต่อได้พูดถึงการใช้ฝุ่นเป็นตัวเสริมความแข็งของแอสฟัลต์ โดยตระหนักว่าสิ่งเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญ[35–37]. จากคุณลักษณะของฝุ่นเหล่านี้ ซึ่งครอบคลุมด้านต่างๆ เช่น รูปร่างของฝุ่น ขนาด การกระจายตัว พื้นที่ผิว ความเข้มข้นของการดูดซับ และองค์ประกอบทางเคมี ล้วนเป็นปัจจัยกำหนดที่สำคัญของประสิทธิภาพของส่วนผสมอย่างมาะตอยในระยะยาว [38–41]. นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเชิงประจักษ์หลายครั้งได้แสดงให้เห็นว่าค่า Rigden Voids มีอิทธิพลต่อลักษณะทางเรขาคณิตของฝุ่นนั้นๆ

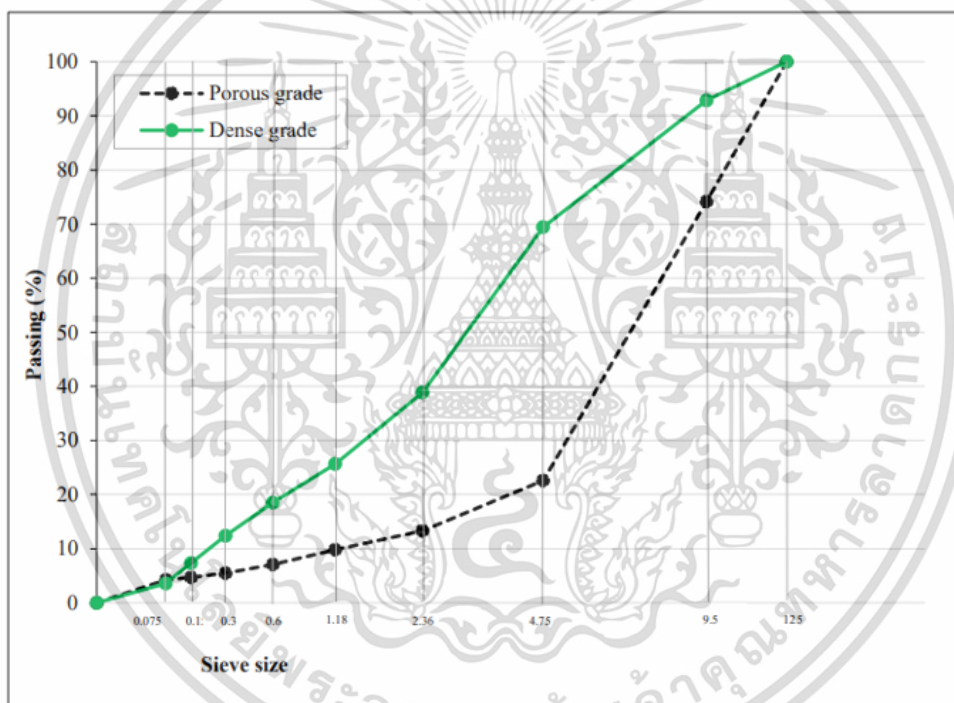
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในส่วน of วัสดุและวิธีการในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบส่วนผสมสองแบบที่ใช้กันทั่วไปในการก่อสร้างถนน ซึ่งเป็นส่วนผสมที่มีความหนาแน่น(Dense Grade)และมีรูพรุน (Porous Grade). ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดปริมาณช่องว่างอากาศสำหรับส่วนผสมที่มีความหนาแน่น(dense)ไว้ที่ 4% ในขณะที่ส่วนผสมที่มีรูพรุน(Porous Grade) ได้ถูกออกแบบให้มีปริมาณช่องว่างอากาศที่ 20% โดยที่การคละขนาดของมวลรวมแสดงในรูปที่ 1 โดยได้เลือกมวลรวมที่เป็นหินปูนมาจาก จ.ชลบุรี เป็นวัสดุสำหรับการผสมทั้งหมด



รูปที่ 3.1 การแบ่งการคละขนาดของมวลรวม

งานวิจัยนี้ได้ใช้ฝุ่นทั้งหมด 3 ชนิดได้แก่ หินปูน กากอ้อย ชุยมะพร้าว โดยที่ใช้ปริมาณของฝุ่นคิดเป็น 20% โดยปริมาตรของยางมะตอย. การตรวจสอบก่อนหน้านี้ [43, 44] ได้ยืนยันความเป็นไปได้และความเหมาะสมของปริมาณของฝุ่นโดยเฉพาะในการศึกษาก่อนหน้านี้. จากการศึกษาครั้งนี้ตรวจสอบการใช้ฝุ่นทั้ง 4 ชนิดได้แก่ หินปูน กากอ้อย และชุยมะพร้าว ซึ่งได้มาจากเหมืองหินและการเกษตรในประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปร	รายละเอียด
ชนิดมวลรวม	หินปูน
ชนิดฝุ่น	ฝุ่นกากอ้อย ฝุ่นขุยมะพร้าว ฝุ่นหินปูน
ปริมาณฝุ่น	20% โดยปริมาตรของแอสฟัลต์

ตารางที่ 1 แสดงถึงชนิดมวลรวมและชนิดฝุ่นที่ใช้ในการทดสอบและปริมาณฝุ่น

ชนิดของฝุ่น	ความหนาแน่น (g/cm ³)
ฝุ่นหินปูน	2.62
ฝุ่นกากอ้อย	0.38
ฝุ่นขุยมะพร้าว	0.29

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของฝุ่นแต่ละชนิด

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของฝุ่นที่มาจากธรรมชาติ คือ กากอ้อยและขุยมะพร้าว มีความหนาแน่นต่ำกว่าความหนาแน่นของฝุ่นแร่ คือ หินปูน ซึ่งความหนาแน่นต่ำของฝุ่นจากธรรมชาติ สามารถบ่งชี้ได้ว่าต้องใช้ฝุ่นเหล่านี้น้อยลงตามน้ำหนักในส่วนผสมแอสฟัลต์เมื่อเปรียบเทียบกับฝุ่นชนิดหินแร่

เพื่อให้ได้ฝุ่นจากธรรมชาติที่ต้องการในการทดลอง ต้องนำกากอ้อยและขุยมะพร้าวไปบดโดยใช้เครื่องบดและกรองด้วยตะแกรงเบอร์ 200 ที่ใช้ในส่วนผสมคือหินปูน และการคละกั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนด Superpave สำหรับปริมาณการจราจรสูง และอัตราส่วนของฝุ่นต่อแอสฟัลต์ (F/A) มักจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของฝุ่นแร่ ซึ่งอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 1.6 อย่างไรก็ตาม ในกรณีของฝุ่นจากธรรมชาติ คาดว่าอัตราส่วน F/A จะลดลงเนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำกว่า และความหนืดของแอสฟัลต์ถูกกำหนดเพื่อระบุปริมาณที่เหมาะสมและผลกระทบของฝุ่นตามธรรมชาติกับแอสฟัลต์

ในการหาปริมาณของฟิลเลอร์ที่เหมาะสมจำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของแต่ละฟิลเลอร์แต่ละชนิด ฝุ่นกากอ้อยและขุยมะพร้าวมีความหนาแน่นประมาณ 0.379 g / cm³ และ 0.289 g / cm³ ตามลำดับ ในขณะที่ฟิลเลอร์หินปูน 2.62 g / cm³ ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าฟิลเลอร์จากธรรมชาติ(กากอ้อยและขุยมะพร้าว) มีความหนาแน่นน้อยกว่าฟิลเลอร์ชนิดแร่(หินปูน) ประมาณ 7-10 เท่า ดังนั้นหากใช้ฟิลเลอร์ในปริมาตรเท่ากันจะทำให้ฟิลเลอร์จากธรรมชาติน้อยกว่าฟิลเลอร์ ชนิดแร่ในแง่ของน้ำหนัก ในข้อกำหนดของ AASHTO ซึ่งเป็นข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมชี้ให้เห็นว่า หน่วยงานต่าง พิจารณาข้อจำกัด ของอัตราส่วนฝุ่นต่อแอสฟัลต์ (D / B) สำหรับส่วนผสมที่มีมวลรวมหยาบ เป็น 0.8 ถึง 1.6 โดยน้ำหนัก เป็นผลให้ฟิลเลอร์ที่เพิ่มขึ้น 20% โดยปริมาตรถูกกำหนดขึ้นเพื่อรักษาอัตราส่วน ฝุ่นต่อแอสฟัลต์เป็นค่าขั้นต่ำสำหรับสารเติมแร่ โดยการเลือกปริมาณฟิลเลอร์ที่สูงขึ้นสำหรับฟิลเลอร์จาก ธรรมชาติอัตราส่วน D / B มากที่สุดสำหรับฟิลเลอร์ชนิดแร่ถูกกำหนดไว้ที่ 40% โดยปริมาตร อย่างไรก็ตาม ปริมาณ 40% ไม่เหมาะสมสำหรับ

ส่วนผสมของยางมะตอยเนื่องจากความสามารถในการใช้งานได้ไม่ดีผู้วิจัยจึง เลือกใช้ปริมาณ 20%โดยปริมาตร เป็นเกณฑ์สูงสุดสำหรับการเติมฟิลเลอร์



รูปที่ 3.2 แสดงถึงกากอ้อยและขุยมะพร้าวตามธรรมชาติ 2 ชนิด (รูปที่ 3.2 ซ้าย) และ (รูปที่ 3.2 ขวา)

จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงกากอ้อยและขุยมะพร้าวตามธรรมชาติ 2 ชนิด (รูปที่ 3.2 ซ้าย) และ (รูปที่ 3.2 ขวา) ถูกปั่นด้วยเครื่องปั่น จากนั้นนำตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.) มากรองเพื่อให้ได้ฟิลเลอร์ที่ผ่านตะแกรง ดังแสดงใน รูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงถึงฟิลเลอร์ที่ผ่านการกรองโดยตะแกรงเบอร์ 200 (0.075 มม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมตัวอย่างส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ตัวอย่างมวลรวมถูกผสมและบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D 6926 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408 หลังจากที่ทำหาน้ำหนักของขนาดมวลรวมตามออกแบบไว้ จึงทำการร่อนมวลรวมซึ่งเป็นหินปูนผ่านตะแกรงมาตรฐานอเมริกัน (U.S. Sieve) เป็นตะแกรงซึ่งมีตาเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตะแกรงที่ใช้วัดขนาดของหินเริ่มจากเบอร์ 1/2” , 3/8” สำหรับ ตะแกรงคัดขนาดทรายมีขนาดเรียงกันคือ เบอร์ 4, 8, 16, 30, 50 100 และ 200 ตัวเลขเบอร์บอกถึง จำนวนตาของตะแกรงต่อความยาว 1 นิ้ว เช่น ตะแกรงเบอร์ 30 หมายความว่า 1 นิ้ว แบ่งออกเป็น 30 ช่อง ดังนั้นใน 1 ตารางนิ้วจะมีจำนวนช่องทั้งสิ้น 900 ช่อง

วัสดุอุปกรณ์

1. หินปูน (Limestone)
2. ตะแกรงเบอร์ 1/2” , 3/8” , 4, 8, 16, 30, 50 100 และ 200
3. เครื่องเขย่าตะแกรง (SIEVE SHAKER)
4. ภาชนะไว้ใส่หินแต่ละขนาด
5. แปรงและเครื่องเป่าลมเพื่อทำความสะอาดตะแกรง

วิธีทำ

1. จัดวางตะแกรงดังนี้ 1/2” , 3/8” , 4, 8, 16, 30, 50 100 200 และฐานรองโดยวางตะแกรงจาก บน ไปล่างตามลำดับ
2. นำหินปูนที่เตรียมไว้ไปใส่ในตะแกรงบนสุดจากนั้นก็นำตะแกรงไปวางบนเครื่องเขย่าตะแกรง
3. เปิดเครื่องเขย่าตะแกรง แล้วตั้งเวลาเขย่า 15 นาที
4. หลังจากเครื่องเขย่าเสร็จแล้ว นำหินที่ค้างแต่ละตะแกรงไปใส่ภาชนะเพื่อแยกหินแต่ละขนาด
5. ทำตามขั้นตอนที่ 2 3 4 เรื่อย ๆ เพื่อให้ได้ปริมาณหินพอต่อการทดลอง



รูปที่ 3.4 เครื่องเขย่าตะแกรง (SIEVE SHAKER)

3.3 การเตรียมตัวอย่างในการผสมมอดิไฟด์แอสฟัลต์คอนกรีต

คือยางแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดพิเศษ ที่ได้จากการผสมกันระหว่างโพลีเมอร์ (Polymer) กับแอสฟัลต์ซีเมนต์รวมถึง Additive ต่างๆภายใต้กระบวนการผสมที่ดำเนินการในโรงงานผลิตที่ออกแบบโดยเฉพาะและควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิ ตามที่กำหนด มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานก่อสร้างงานบурณะและงานบำรุงทาง ที่มีปริมาณการจราจรสูง โดยปูหรือเกลี่ยแต่งและบดอัดตามแนว ระดับ ความลาด ขนาด รูปตัด ที่ได้แสดงไว้ในแบบ บน ชั้นทางใดๆ ที่ได้เตรียมไว้และผ่านการตรวจสอบแล้ว มาตรฐานที่ ทล.-ม. 409/2549

วัสดุอุปกรณ์

1. น้ำยางมะตอยชนิด AC60-70
2. ผง carbon black
3. เครื่องปั่นและเตาให้ความร้อนพร้อมไม้สแตนเลสในการคนสำหรับการผสม
4. Thermometer และ ขาจับ เพื่ออุณหภูมิ
5. ภาชนะไวใส่ยางมะตอยที่แบ่งละพร้อมปั่น

การเตรียมตัวอย่างมอดิไฟด์แอสฟัลต์คอนกรีต

1. แบ่งยางมะตอย ชนิด AC60/70 ใส่กระป๋องเหล็ก 3 ใบ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักให้ได้น้ำหนักเท่ากัน

2. นำกระป๋องที่บรรจุยางมะตอยไปเข้าตู้อบเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 160 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

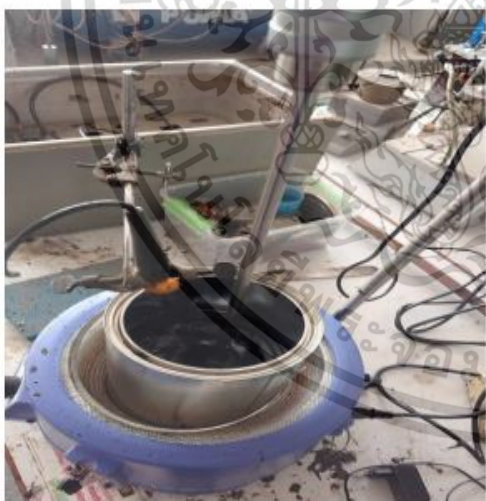
3. เตรียมเครื่องปั่นตั้งค่าหัวปั่นให้หมุน 1000 รอบ/นาทีและเตาให้ความร้อน (hot plate)
4. นำกระป๋องยางมะตอยที่อบเสร็จแล้วมาตั้งบนเตาให้ความร้อน ใช้เทอร์โมมิเตอร์ดิจิตอลวัดอุณหภูมิยางมะตอยให้ได้ 160 °C จากนั้นค่อยๆ ใส่ผง carbon black 5% ของน้ำหนักยางมะตอย หลังจากนั้นรออีกปั่นอีก 120 นาทีเพื่อผสมให้เข้ากับยางมะตอย



รูปที่ 3.5 ตู้อบยางมะตอย



รูปที่ 3.6 เครื่องปั่นที่ใช้ในการผสมยาง



รูปที่ 3.7 การผสมยางมะตอยกับผงCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมในการทดสอบ

เพื่อตรวจสอบปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมของส่วนผสมชนิด Dense Graded โดยที่มีค่าช่องว่างในอากาศ (Percent air voids) อยู่ที่ 4-6 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐานกรมทางหลวงและปริมาณที่เหมาะสมของส่วนผสมชนิด Open Graded โดยที่มีค่าช่องว่างในอากาศ (Percent air voids) อยู่ที่ 18-24 เปอร์เซ็นต์

วิธีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบได้มีการผสมและบดอัดตามมาตรฐาน ASTM D 6926 ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานของ กรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408/2532 ดังขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังนี้

1. ออกแบบขนาดกะของมวลรวม ตามมาตรฐานกรมทางหลวง
2. นำยางมะตอย, ฝุ่นและมวลรวมที่ได้จากการออกหนัก 1,200 กรัมนำไปใส่ในภาชนะแล้วนำไปอบในเตาอบให้ได้อุณหภูมิสูงถึง 160 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง
3. นำภาชนะใส่มวลรวม ออกจากเตาอบแล้วเทลงในภาชนะโลหะสำหรับผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใช้เกรียงผสมให้มวลรวมคลุกกันให้ทั่ว แล้วเทยางมะตอยที่เตรียมไว้ใน ข้อ 2 ตาม ปริมาณที่ได้คำนวณไว้ลงในภาชนะดังกล่าวแล้วใช้เกรียงผสมให้เข้ากันโดยเร็วที่สุดโดยใช้เวลา ประมาณ 1-2 นาที
4. เทแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมไว้ในแบบบดอัดจากนั้นนำไปเข้าเตาอบที่ อุณหภูมิ 147 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง
5. นำตัวอย่างออกจากเตาอบ นำไปวางบนแท่นรองสำหรับบดอัด
6. วางค้อนลงบนตัวอย่างซึ่งได้เตรียมไว้จากนั้นทำการบดอัด ซึ่งออกแบบไว้ที่ 75 ครั้งทำการกลับด้านและบดอัดอีก 75 ครั้ง
8. ทิ้งตัวอย่างไว้ในอากาศให้เย็นลง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การทดสอบการประเมินการ ใช้ฝุ่นจากกากอ้อยและขุยมะพร้าวเพื่อเพิ่มการต้านทานความเสียหายจากความชื้นโดยที่การศึกษานี้ใช้ฝุ่นทั้ง 3 ชนิด คือ ฝุ่นกากอ้อย, ฝุ่นขุยมะพร้าว, ฝุ่นหินปูนร่วมกับมวลรวมคือ หินปูนโดยควบคุมชนิดของแอสฟัลต์คือ Modified(CB5), Unmodified(PMA) การออกแบบการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4

ชั้นทาง		Wearing Course		Binder Course	Base Course
ขนาดที่ใช้เรียก	มิลลิเมตร	9.5	12.5	19.0	25.0
	นิ้ว	3/8	1/2	3/4	1
ความหนา (มิลลิเมตร)		25 - 35	40 - 70	40 - 80	70 - 100
ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล			
มิลลิเมตร	นิ้ว				
37.5	1 1/2			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	No.4	55 - 85	44 - 74	35 - 65	29 - 59
2.36	No.8	32 - 67	28 - 58	23 - 49	19 - 45
1.18	No.16	-	-	-	-
0.600	No.30	-	-	-	-
0.300	No.50	7 - 23	5 - 21	5 - 19	5 - 17
0.150	No.100	-	-	-	-
0.075	No.200	2 - 10	2 - 10	2 - 8	1 - 7
ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ร้อยละโดยมวลรวม)		4.0 - 8.0	3.0 - 7.0	3.0 - 6.5	3.0 - 6.0

ตารางที่ 3.3 การขนาดคละของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 416/2556)

ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
มิลลิเมตร	นิ้ว	
19.0	3/4	100
12.5	1/2	70 - 100
9.5	3/8	50 - 80
4.75	เบอร์ 4	15 - 30
2.36	เบอร์ 8	10 - 22
0.600	เบอร์ 30	6 - 13
0.075	เบอร์ 200	3 - 6
ปริมาณโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ ร้อยละโดยมวลของ มวลรวม		4.0 - 6.0
ความหนา	มิลลิเมตร	35 - 50

ตารางที่ 3.4 ขนาดคละของมวลรวมและปริมาณโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ (มาตรฐานที่ ทล.-ม. 414/2542)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็น ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบหาค่าแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test)

การประเมินความเสียหายจากความชื้นในแอสฟัลต์คอนกรีตโดยดำเนินการผ่านการทดสอบ Indirect Tensile Strength (ITS) ที่ใช้กันทั่วไปตามข้อกำหนดของ the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) T283 specification. โดยขั้นตอนการทดสอบมีสภาวะในการทดสอบคือ สภาวะแห้งและเปียก โดยการเตรียมตัวอย่างในสภาวะแห้งจะเตรียมตัวอย่างแอสฟัลต์ในเตาอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและก่อนนำไปทดสอบจะต้องพักตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องก่อนทดสอบ และในการเตรียมตัวอย่างในสภาวะเปียกเตรียมตัวอย่างในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 60 ± 1 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและหลังจากนั้นตามด้วยการแช่ในอ่างน้ำที่อุณหภูมิห้องอีก 2 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ และในระหว่างการทดสอบ ตัวอย่างชิ้นงานจะถูกทดสอบด้วยอัตราโหลดคงที่ และวัดแรงที่กระทำต่อการแตกหักของชิ้นงานและซึ่งระดับความเสียหายจากความชื้นได้รับการประเมินโดยการคำนวณอัตราส่วนความต้านทานแรงดึง (TSR) ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบความต้านทานแรงดึงโดยเฉลี่ยของชิ้นงานในสภาวะเปียกกับชิ้นงานในสภาวะแห้ง

ขั้นตอนการทดสอบสำหรับการทดสอบ ITS นั้นทำการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T283 ซึ่งเป็นการประเมินความต้านทานของส่วนผสมแอสฟัลต์ต่อความเสียหายที่เกิดจากความชื้น. โดยในการทดสอบชิ้นงานจะถูกทดสอบโดยมีอัตราการรับแรงที่ 50 มม./ นาที และคำนวณค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดโดยใช้ปัจจัยทางเรขาคณิต แสดงในสมการที่ 1. การทดสอบ ITS เป็นวิธีที่น่าเชื่อถือในการประเมินความเสียหายจากความชื้นในส่วนผสมของแอสฟัลต์ โดยให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความต้านทานแรงดึง และความเสียหายที่เกิดจากความชื้น. โดยที่ผลการทดสอบนี้เป็นจำเป็นในการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์ และการเลือกวัสดุที่สามารถต้านทานความเสียหายที่เกิดจากความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

$$S_t = \frac{2000P}{\pi tD}$$

โดยที่ S_t = ความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (kPa), P = น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (N), t = ความสูงของชิ้นงานทดสอบทันทีก่อนการทดสอบ (มม.) และ D = เส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน (มม.)

ความไวต่อความชื้นของส่วนผสมแอสฟัลต์ได้รับการประเมินโดยให้ตัวอย่างชิ้นงานที่ทดสอบอยู่ในสภาวะแตกต่างกัน. โดยขั้นตอนการทดสอบมีสภาวะในการทดสอบคือ สภาวะแห้งและเปียก โดยการเตรียมชิ้นงานที่จะทดสอบภายใต้สภาวะแห้งโดยเตรียมชิ้นงานที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและหลังจากทดสอบโดยไม่มีการปรับสภาพความชื้น และในการเตรียมตัวอย่างในสภาวะเปียกโดยเตรียมในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 60 ± 1 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและหลังจากนั้นตามด้วยการแช่ในอ่างน้ำที่อุณหภูมิห้องอีก 2 ชั่วโมง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนการทดสอบ และในระหว่างการทดสอบ. และความไวต่อความชื้นของส่วนผสมแอสฟัลต์ได้จากการทดสอบ Indirect Tensile Strength (ITS) ตามมาตรฐาน Superpave โดยมีการใช้เครื่องทดสอบ ITS ในการทดสอบและความต้านทานแรงดึงสำหรับตัวอย่างภายใต้สภาวะเปียกและสภาวะแห้ง

การประเมินความต้านทานต่อความชื้นสามารถคำนวณโดยใช้อัตราส่วนความต้านทานแรงดึง (TSR) โดยใช้สมการที่ 2. ค่า TSR ทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้ความไวของส่วนผสมแอสฟัลต์ต่อความเสียหายจากความชื้น และโดยที่ค่า TSR ต่ำนั้นสามารถบ่งบอกได้ถึงความเสี่ยงที่สูงกว่าต่อความเสียหายที่เกิดจากความชื้น. จากมาตรฐานระบบ Superpave ได้แนะนำค่า TSR ขั้นต่ำ 80% สำหรับส่วนผสมของแอสฟัลต์เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถต้านทานความชื้นได้เพียงพอ. ความต้านทานความชื้นของส่วนผสมแอสฟัลต์ถูกคำนวณจากผลลัพธ์ของค่า ITS ที่ได้รับจากตัวอย่างที่ถูกทดสอบทั้งสองสภาวะ

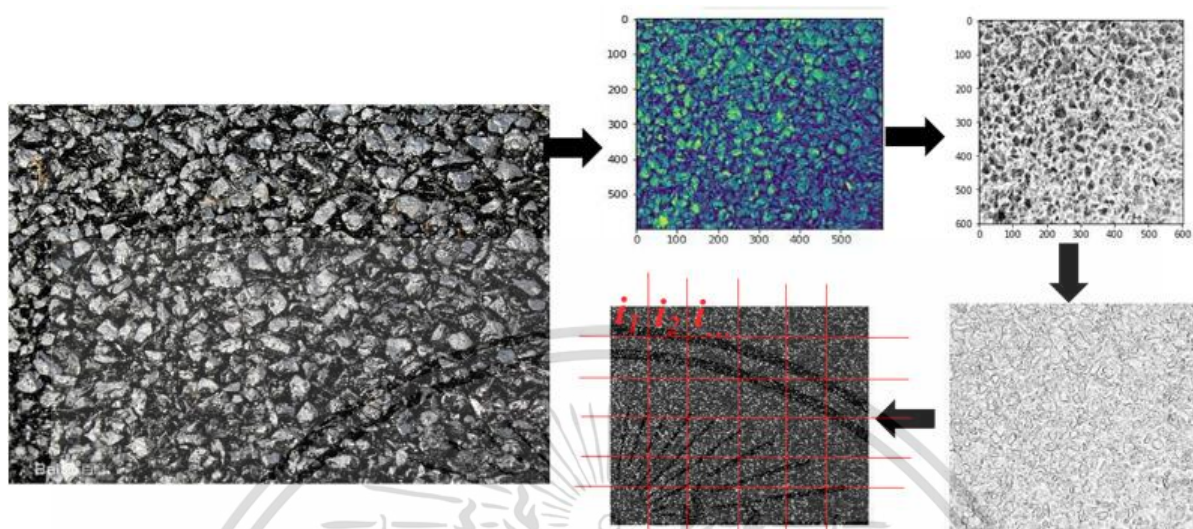
$$TSR = \frac{\text{ค่าแรงดึงในสภาวะความชื้น}}{\text{ค่าแรงดึงในสภาวะแห้ง}} \times 100$$

3.6 การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธี Image Processing & Analysis System (IPAS) เพื่อวิเคราะห์ระยะเชื่อมต่อกันของ aggregate กับผลรวมของระยะเชื่อมของมวลรวม

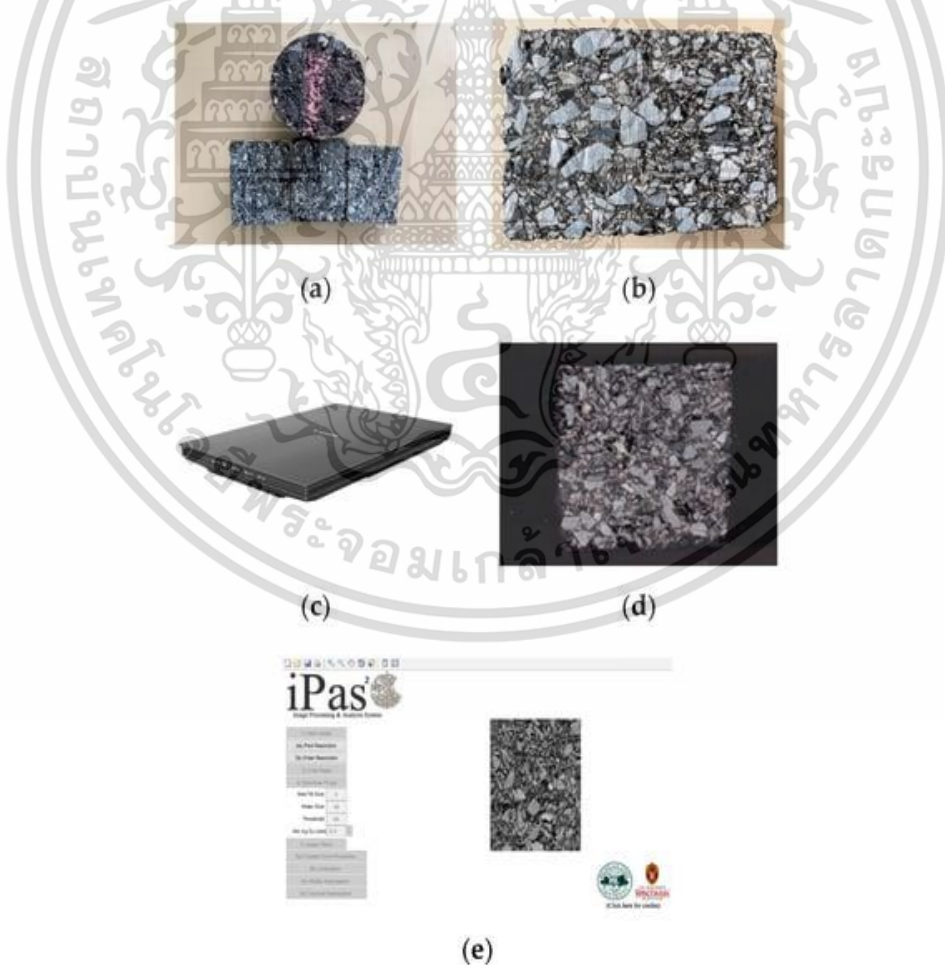
Image Processing & Analysis System เป็นวิธีการวิเคราะห์การเชื่อมต่อกันของมวลรวมและความยาวในการเชื่อมต่อ ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างที่ถูกการตัด เพื่อสแกนภาพของตัวอย่างตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ถูกตัดแล้วซึ่งนำมาประมวลผลด้วย Digital Image Processing Algorithm Image Processing เพื่อแปลงจากภาพตัวอย่างเป็นภาพสี (RGB (แดง-เขียว-น้ำเงิน)) และแปลงเป็นภาพไบนารี (ขาวดำ) จากนั้นนำภาพไบนารีนำมาคำนวณเป็นเมทริกซ์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาพารามิเตอร์โครงสร้าง ภายในแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น จำนวนหน้าสัมผัสและการแยกมวลรวม (Coenen 2011, Coenen et al. 2011) สีของภาพที่สแกนคือสี RGB ซึ่งถือเป็นเมทริกซ์สามมิติใน MATLAB แต่ละสีที่พิกเซลเฉพาะอย่างใดก็ตาม จำเป็นต้องกำหนดรูปร่างเรขาคณิตของแต่ละเฟสซึ่งคือ มวลรวมและแอสฟัลต์แมสติก เพื่อนำภาพระดับสีเทาถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์และแยกความแตกต่างของมวลรวมและยางมะตอยแมสติก เนื่องจากสีของทั้งสองช่วงมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนในด้านความเข้ม เมทริกซ์ระดับสีเทาเป็น เมทริกซ์สองมิติใน MATLAB (รูปที่ 2) สุดท้าย ภาพระดับสีเทาจะถูกแปลงเป็นสีไบนารีที่ใช้สำหรับการ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค มีตัวกรองบางตัวที่จำเป็นในการปรับปรุงคุณภาพของภาพเพื่อแยกส่วนต่างๆ ของวัสดุ ฟิเตอร์รูปภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วย 1. ค่ามัธยฐาน 2. ภูมิภาคสูงสุด (เช่น Hmax) 3. Watershed 4. Threshold และ 5. เทคนิคการกัดเซาะเพื่อให้ได้ภาพไบนารีที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับภาพจริง



รูปที่ 3.8 แสดงถึงภาพตัวอย่างที่ถูกแปลงสีจากสีRGB(แดง-เขียว-น้ำเงิน)เป็นสีไบนารี(ขาว-ดำ)(Roohi,2012)



รูปที่ 3.9 การคำนวณ Digital image โดยใช้โปรแกรม IPAS

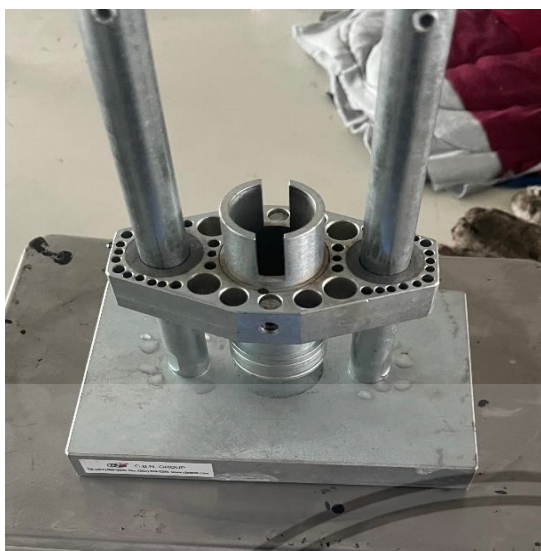
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การทดสอบ Rigden Voids

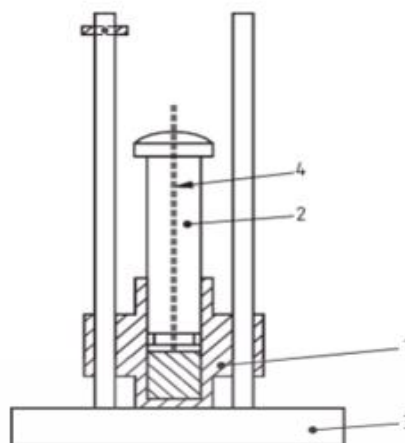
การทดสอบ Rigden Voids ทดสอบตามมาตรฐาน EN 1097-4 ของ European Norms เป็นเทคนิคในการทดสอบหาปริมาตรช่องว่างภายในดินโดยการบดอัดแบบแห้ง. โดยวิธีการทดสอบนี้ทดสอบภายใต้สมมติฐานว่าการบดอัดที่หนาแน่นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ได้ความหนาแน่นรวมสูงสุดของอนุภาคนั้นๆ. ทดสอบโดยการบดอัดอนุภาคนั้นแบบแห้งลงในแม่พิมพ์. โดยที่ความหนาแน่นรวมของการบดอัดถูกคำนวณจากน้ำหนักแบบแห้งหารด้วยปริมาตรรวมของความหนาแน่นรวมและในการทดสอบนี้แต่ละชนิดของดินทดสอบชนิดละ 3 ครั้งแล้วจึงนำผลที่ได้มาเฉลี่ย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เตาอบที่สามารถให้อุณหภูมิถึง 150 องศาเซลเซียส
2. ไม้พาย
3. Dropping block ประกอบด้วยแท่งทรงกระบอกกลวงที่มีฝาปิดท้ายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 ± 1 มิลลิเมตร และความสูงด้านใน 65 ± 1 มิลลิเมตรดังรูปที่ 1
4. Plunger มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 16 ± 1 มิลลิเมตรและมีความยาวจากด้านล่างจนถึงด้านบนเท่ากับ 10 มิลลิเมตรและมีความกว้างเท่ากันทั้งด้ามดังรูปที่ 1
5. Base Plate มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดความยาว 150 มิลลิเมตรและความกว้าง 100 มิลลิเมตร และมีแท่งสองแท่งเป็นแท่งนำร่องตั้งตรงกลางระหว่างแผ่นเพื่อยึดให้ Dropping block ตกได้อย่างอิสระโดยที่ความสูงจากการตกสูงสุดคือ 102 ± 1 มิลลิเมตร
6. Vernier depth calliper ใช้เพื่อวัดความสูงของฟิลเลอร์ที่ถูกอัดแน่น
7. เครื่องชั่งสามารถชั่งน้ำหนักที่สามารถชั่งน้ำหนัก 0.01 กรัมได้
8. กระดาษกรองโดยมีน้ำหนัก 20 ± 5 g/m² และความสูงเท่ากับ 25 ± 1 มิลลิเมตร
9. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 0.125 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 เครื่องมือทดสอบ Rigden voids



รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบเครื่องมือทดสอบ Rigden Voids

วิธีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

1. นำตัวอย่างฟิลเลอร์กรองผ่านตะแกรงเบอร์ 200 โดยใส่เครื่องเขย่าตะแกรง
2. นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วจำนวน 150 กรัมเข้าเตาอบที่ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ เพื่อปรับให้มวลคงที่
3. ปลอ่ยให้เย็นและนำตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงทั้งหมดนำไปทดสอบ

วิธีการทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนักของplungerโดยที่ใส่กระดาศกรองและนำPlunger ใส่ใน Dropping block
2. หลังจากนั้นนำฟิลเลอร์ที่หนักประมาณ 10 กรัมใส่ใน Dropping block และนำกระดาศกรองใส่ไว้บนplunger
3. แล้วนำใส่ในอุปกรณ์ Rigden หลังจากนั้นอุปกรณ์ Rigden ยกเหล็กที่สูง 100 ± 25 มิลลิเมตรและปลอ่ยให้ตกอย่างอิสระ 100 ครั้ง และวัดความสูงและน้ำหนักของฟิลเลอร์ที่ถูกทำให้แน่นและโดยมีกระดาศกรองและPlunger อยู่ด้วยซึ่งถูกคำนวณด้วยสมการดังนี้

$$v = \left(1 - \frac{4 \times 10^3 \times m_2}{\pi \times \alpha^2 \times \rho_f \times h} \right) \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

V คือ เปอร์เซ็นต์ Rigid Void (%)

M2 คือ มวลของฟิลเลอร์ที่ถูกบดอัด (g)

α คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของ Dropping block (mm)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของฟิลเลอร์แต่ละชนิด (kg/m^3)

h คือ ความสูงของฟิลเลอร์ที่ถูกบีบอัด

3.8 การทดสอบ Brunauer-Emmett-Teller (BET) เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาด การกระจายตัว และปริมาตรของรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร (Mesopores) และเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร (Micropores) โดยวิธีการทดสอบนำตัวอย่างที่มีก๊าซนำมาดูดซับหรือคายก๊าซออกมาเพื่อวิเคราะห์เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน. พื้นที่ผิวของฝุ่นตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับหลักการการดูดซับก๊าซเชิงปริมาตรโดยใช้ก๊าซที่ไม่มีการกักร่อนเช่น N_2 , Ar_2 , CO_2 , และ H_2 . การทดสอบ BET สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้สูงสุดสามตัวอย่างพร้อมกันและแยกออกจากกันทั้งสามตัวอย่างซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์. การวิเคราะห์ใช้วิธีการ AFSM ซึ่งให้ความแม่นยำและความสามารถในการทดสอบซ้ำ

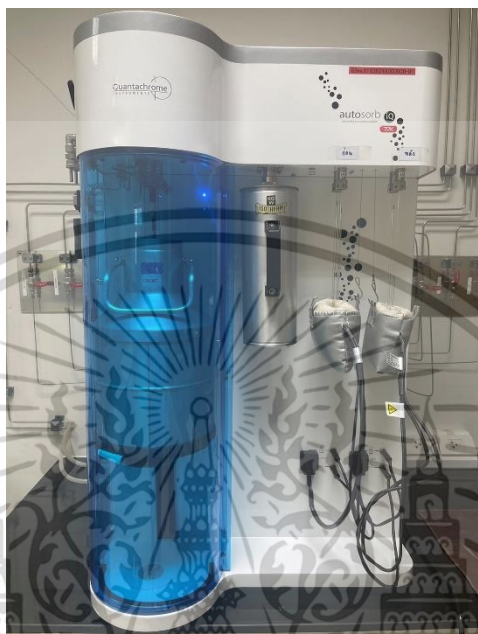
วิธีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

โดยที่ก่อนการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดพื้นที่ผิวนั้น จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุเพื่อไล่ความชื้นและโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับชนิดอื่นให้ออกจากผิวหน้าของวัสดุที่ต้องการทดสอบ

วิธีการทดสอบ

นำเอาตัวอย่างแบ่งใส่เซลล์จำนวน 2 เซลล์ และทำให้เซลล์ทั้งสองเป็นสุญญากาศเพื่อให้ภายในเซลล์ไม่มีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่น และก่อนจุ่มเซลล์ทั้ง 2 ลงในภาชนะที่บรรจุไนโตรเจนเหลวเพื่อให้เซลล์ทั้งสองอยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำเซลล์ทั้ง 2 เซลล์มาปล่อยแก๊สไนโตรเจนให้เข้ามาในเซลล์ทั้ง 2 โดยแก๊สไนโตรเจนที่เข้ามาในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างจะถูกดูดซับบนผิวของวัสดุทำให้ความดันภายในเซลล์ที่บรรจุลดลงจนคงที่ ในขณะที่เซลล์ที่ไม่มีความดัน วัสดุตัวอย่างจะมีความดันของแก๊สไนโตรเจนจะคงที่ และข้อมูลที่เครื่องบันทึกผลคือค่าความดันสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับโดยวัสดุตัวอย่าง จากนั้นเครื่องจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยแก๊สไนโตรเจนเข้ามาอีกเช่นเดียวกับครั้งแรก และแก๊สไนโตรเจนถูกดูดซับจนความดันคงที่อีกจนกระทั่งความดันภายในเซลล์ที่มีวัสดุตัวอย่างไม่ลดลงแสดงว่า จะไม่เกิดการดูดซับแก๊สไนโตรเจน จากข้อมูลค่าความดัน ส่งผลให้ค่าสัมพัทธ์และปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ได้ และจากนั้นเครื่องจะทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรมตามสมการของ BET แสดงผล ออกมาเป็น ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน



รูปที่ 3.12 เครื่องในการทดสอบ Brunauer-Emmett-Teller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1. การทดสอบ Rigden Voids

- จากการทดสอบ Rigden Voids ตามมาตรฐาน BS EN1097-4:2008 เพื่อประเมินอิทธิพลของฝุ่นที่มีต่อความต้านทานความเสียหายจากความชื้นของแอสฟัลต์คอนกรีต และเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของฝุ่นแต่ละชนิด. จากในรูปที่ 4.1 แสดงถึงค่าเฉลี่ยของค่า Rigden voids ที่ได้จากฝุ่นทั้งสามชนิดที่มีความหนาแน่นต่างกันโดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ของ Rigden Voids พบว่าอยู่ที่ 30.24%, 9.51% และ 6.03% สำหรับฝุ่นหินปูน ฝุ่นจากกากอ้อย และฝุ่นจากขุยมะพร้าวตามลำดับ. และเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างค่า rigden void และความหนาแน่น พบว่าค่า rigden voids ของฝุ่นกับความหนาแน่นแปรผันตรงกัน ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นของฝุ่นแต่ละชนิดนั้นสูงจะส่งผลให้ค่า Rigden Voids สูงตามไปด้วย เนื่องด้วยการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นคาดการณ์ผลได้ว่าอาจเป็นเพราะ Particle size ของฝุ่นที่ใหญ่ขึ้นส่งผลต่อค่า Rigden Voids โดยตรง

	ฝุ่นหินปูน	ฝุ่นกากอ้อย	ฝุ่นขุยมะพร้าว
Rigden Voids ครั้งที่ 1	30.990	10.451	5.195
Rigden Voids ครั้งที่ 2	31.375	9.385	6.050
Rigden Voids ครั้งที่ 3	28.349	8.684	6.841
ค่าเฉลี่ย % Rigden Voids	30.240	9.510	6.030

รูปที่ 4.1 แสดงถึงค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids ในการทดสอบ

4.2. ความสัมพันธ์ระหว่าง The Percent of Rigden Voids in a Dry-compacted Fillers กับ BET

- การทดสอบ BET (Brunauer-Emmett-Teller) เป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดการกระจายตัว และปริมาตรของรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร (Mesopores) และเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร (Micropores) โดยหลักการของเครื่องนี้เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน

จากตารางที่ 1 นำเสนอในส่วนนี้แสดงถึงผลการวิเคราะห์จากการทดสอบ BET ที่ดำเนินการทดสอบกับฝุ่นที่แตกต่างกันสามประเภทซึ่งได้แก่ ฝุ่นหินปูน ฝุ่นกากอ้อย และฝุ่นขุยมะพร้าว จากขั้นตอนการวิเคราะห์ BET ใช้เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของฝุ่นแต่ละชนิดและจากผลการทดสอบพบว่าฝุ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มะพร้าวมีขนาดรูพรุน 3.93 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิว 3.56 ตร.ม./กรัม ผุ่นกากอ้อยมีขนาดรูพรุน 4.28 นาโนเมตร และพื้นที่ผิว 5.13 ตร.ม./กรัม ผุ่นหินปูนมีรูพรุน ขนาด 4.68 นาโนเมตร และพื้นที่ผิว 3.65 ตร.ม./กรัม และผลลัพธ์เหล่านี้สามารถบ่งชี้ว่าผุ่นกากอ้อยมีพื้นที่ผิวสูงสุด ผุ่นมะพร้าว และผุ่นหินปูน และยังสามารถสังเกตว่าขนาดรูพรุนของผุ่นทั้ง 3 ชนิดนี้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ผุ่นกากอ้อยที่มีขนาดรูพรุนเล็กที่สุดและผุ่นหินปูนมีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุด

จากการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของผุ่นกับเปอร์เซ็นต์ของช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีตและสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 2 และในจากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างค่า Rigden Voids และคุณลักษณะทางกายภาพของผุ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างเปอร์เซ็นต์ของ Rigden Voids และขนาดรูพรุนของผุ่น ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าขนาดของรูพรุนสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ของ Rigden Voids นอกจากนี้ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างค่า Rigden Voids และพื้นที่ผิวของผุ่น ซึ่งบ่งชี้ว่าพื้นที่ผิวที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของ Rigden Voids ต่ำลงและจากผุ่นตัวอย่างทั้งสี่ชนิดที่ถูกทดสอบพบว่าผุ่นหินปูนมีค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids สูงที่สุด(30.24%) ซึ่งอาจเนื่องมาจากขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่และพื้นที่ผิวน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับผุ่นอีกสองชนิด ได้แก่ ผุ่นขุยมะพร้าวและกากอ้อย

Type of Filler	Pore Size (nm)	Surface Area (m ² /g)
Coconut	3.93	3.56
Bagasse	4.28	5.13
Limestone	4.68	3.65

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงผลการทดสอบ BET ของผุ่นที่ต่างกันทั้ง 3 ชนิด

4.3. ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids in a Dry-compacted Fillers และ Aggregate Contacts

The Image Processing & Analysis System (IPAS) ถูกใช้ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อแสดงรายละเอียดของความเข้มของสีในแต่ละพิกเซล. จากภาพที่ถ่ายจะถูกแปลงเป็นสีเทาในตอนแรกเพื่อช่วยแยกความแตกต่างระหว่างจำนวนความยาวที่สัมผัสกันภายในโครงสร้างของมวลรวมและเชื่อมต่อกันภายในส่วนผสมแอสฟัลต์ และแสดงถึงจำนวนความยาวสัมผัสที่เชื่อมต่อกันภายในส่วนผสมแอสฟัลต์หลังจากนั้นภาพตัวอย่างที่เป็นสีเทาจะถูกแปลงเป็นภาพไบนารีโดยการเลือกค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพของภาพและทำให้สามารถแยกเฟสของวัสดุต่างๆได้จึงมีการใช้เทคนิคการกรองภาพหลายๆครั้ง และเพื่อประเมินประสิทธิภาพของผุ่นต่างๆ ได้แก่ ผุ่นขุยมะพร้าว ผุ่นกากอ้อย และผุ่นหินปูน และแอสฟัลต์ 3 ชนิด ได้แก่ AC60/70 และ AC60/70+Carbon Black (CB) ในคละขนาดแบบหนาแน่น(Dense Gradation) และ Polymer Modified

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Asphalt (PMA) ในลักษณะแบบเปิด (Open Gradation) และจากปริมาณฝุ่นในส่วนผสมแอสฟัลต์ยังคงอยู่ที่ 20% ของปริมาณแอสฟัลต์ทั้งหมด ด้วยขั้นตอนการทดลองเหล่านี้ ทำให้ได้รับผลการทดสอบที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของฝุ่นและแอสฟัลต์ชนิดต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์ได้อย่างครอบคลุม

ผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะการสัมผัสระหว่างฝุ่นและแอสฟัลต์แสดงไว้ในตารางที่ 3 และจำนวนการสัมผัสและรวมถึงความยาวการสัมผัสได้รับการประเมินสำหรับแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน 3 ประเภท ได้แก่ AC60/70, CB และ PMA เมื่อรวมกับฝุ่นที่แตกต่างกัน 3 ตัว ได้แก่ ขุยมะพร้าว กากอ้อย หินปูน

Table 3. Contact Parameters of Different Fillers in AC60/70, CB, and PMA Asphalt Mixtures

Type of Asphalt	AC60/70		CB		PMA	
Filler	Contact No.	Contact length	Contact No.	Contact length	Contact No.	Contact length
Coconut peat	39,746	27,807	21,084	11,320	15,045	11,583
Bagasse	32,462	19,587	19,856	10,056	10,995	8,471
Limestone	34,585	22,752	16,597	7,224	11,610	7,095

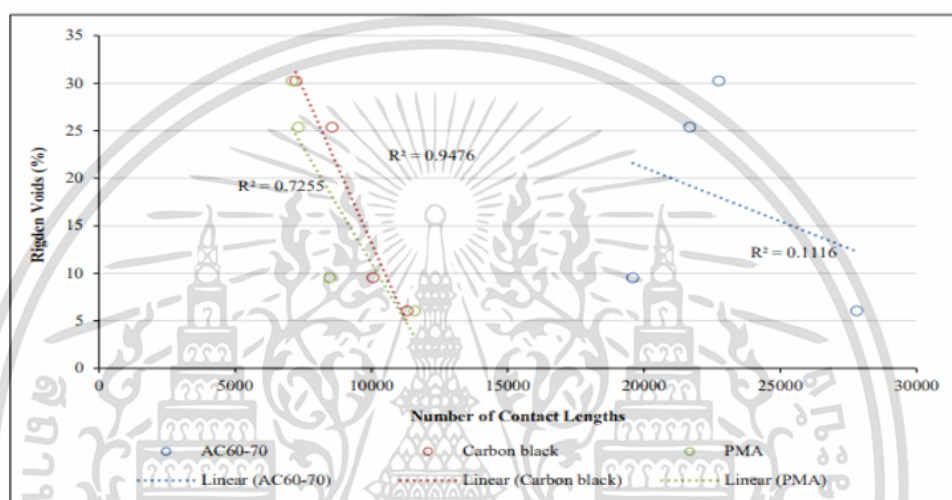
ตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่าจำนวนการสัมผัสเมื่อใช้ฝุ่นแต่ละชนิดโดยใช้แอสฟัลต์ทั้ง 3 ชนิด

จากฝุ่นทั้งหมดที่ถูกทดสอบพบว่า ฝุ่นของขุยมะพร้าวมีจำนวนการสัมผัสสูงสุด เมื่อทดสอบกับแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 โดยบันทึกค่าได้ 39,746 และในทางตรงกันข้าม ฝุ่นของกากอ้อยแสดงจำนวนการสัมผัสต่ำสุดที่ใช้ขุยมะตอย AC60/70 โดยบันทึกได้ 32,462 และ จำนวนการสัมผัสสำหรับแอสฟัลต์ชนิดด้วย CB ค่อนข้างต่ำกว่า โดยมีค่าสูงสุดที่ตรวจพบสำหรับขุยมะพร้าว 21,084 และค่าต่ำสุดสำหรับหินปูน 16,597 ในทำนองเดียวกัน สำหรับแอสฟัลต์ชนิด PMA แอสฟัลต์ที่ใช้ขุยมะพร้าวมีจำนวนการสัมผัสสูงสุด 15,045 ในขณะที่กากอ้อยแสดงถึงจำนวนสัมผัสต่ำสุดคือ 10,995

ในส่วนของความยาวสัมผัส ฝุ่นขุยมะพร้าวมีความยาวสัมผัสที่ยาวที่สุดเมื่อทดสอบกับแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 ซึ่งวัดได้ 27,807 หน่วยในทางกลับกัน ฝุ่นกากอ้อยมีระยะสัมผัสสั้นที่สุดกับขุยมะตอย AC60/70 ซึ่งวัดได้ 19,587 หน่วยและสำหรับแอสฟัลต์ชนิด CB ฝุ่นขุยมะพร้าวให้ความยาวสัมผัสที่ยาวที่สุด 11,320 หน่วย ในขณะที่หินปูนมีความยาวสัมผัสที่สั้นที่สุด 7,224 หน่วย ในแอสฟัลต์ชนิด PMA ขุยมะพร้าวมีความยาวสัมผัสสูงสุด 11,583 หน่วย และกากอ้อยมีความยาวสัมผัสต่ำสุด 8,471 หน่วย นอกจากนี้ประเภทของแอสฟัลต์มีผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดต่อลักษณะการสัมผัสกับฝุ่นต่างๆ ตัวอย่างเช่น แอสฟัลต์ AC60/70 แสดงให้เห็นจำนวนการสัมผัสที่สูงกว่าและความยาวการสัมผัสที่ยาวกว่าอย่างต่อเนื่องกับฝุ่นที่ถูกทดสอบทั้งหมดเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ที่ถูกดัดแปลงด้วย CB และ PMA ผลลัพธ์เหล่านี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญเกี่ยวกับพฤติกรรมของฝุ่นต่างๆ ในแอสฟัลต์ต่างๆ รวมถึงจำนวนการสัมผัสและความยาวของการสัมผัส ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับคุณลักษณะการเชื่อมกันและการยึดเกาะระหว่างฝุ่นชนิดต่างๆ และแอสฟัลต์

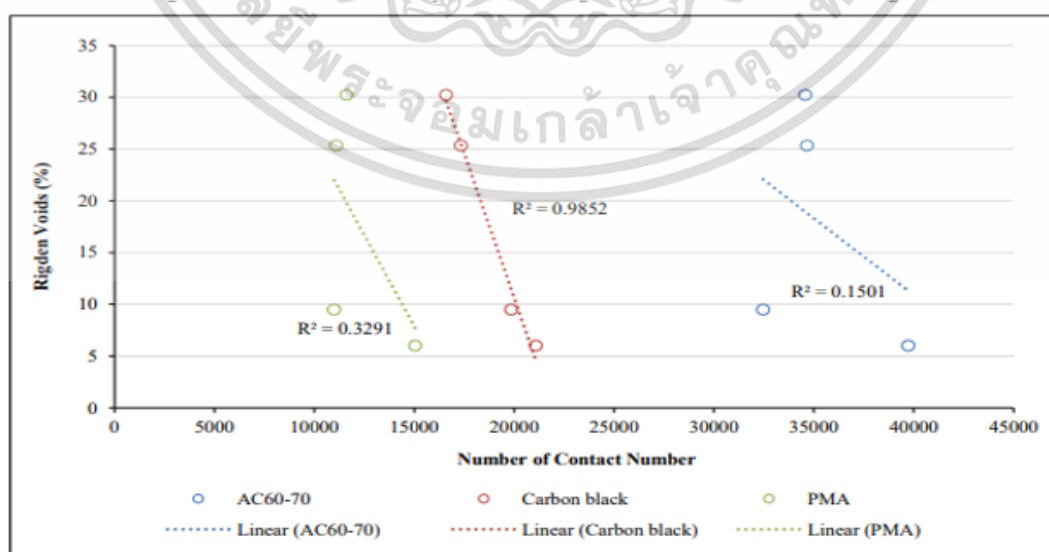
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Rigden Void และจำนวนการสัมผัสตลอดจนความยาวของการสัมผัสสำหรับแอสฟัลต์ประเภทต่างๆ (AC60/70, CB และ PMA) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Rigden Void และพารามิเตอร์การสัมผัสที่แตกต่างกันไปตามประเภทของแอสฟัลต์ที่แตกต่างกัน สำหรับแอสฟัลต์ AC60/70 พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงบวกเล็กน้อยระหว่าง Rigden Void และทั้งจำนวนการสัมผัสและความยาวของหน้าสัมผัส ในทางตรงกันข้ามแอสฟัลต์ดัดแปลงโดย CB มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมากระหว่าง Rigden Void กับทั้งจำนวนการสัมผัสและความยาวสัมผัส แอสฟัลต์ดัดแปลงโดย PMA มีความสัมพันธ์เชิงบวกปานกลางระหว่าง Rigden Void และจำนวนการสัมผัส



รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rigden voids และความยาวในการสัมผัส

ในขณะที่ความสัมพันธ์กับความยาวสัมผัสต่ำ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าอิทธิพลของพารามิเตอร์ของการสัมผัสที่มีต่อ Rigden Void นั้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของแอสฟัลต์



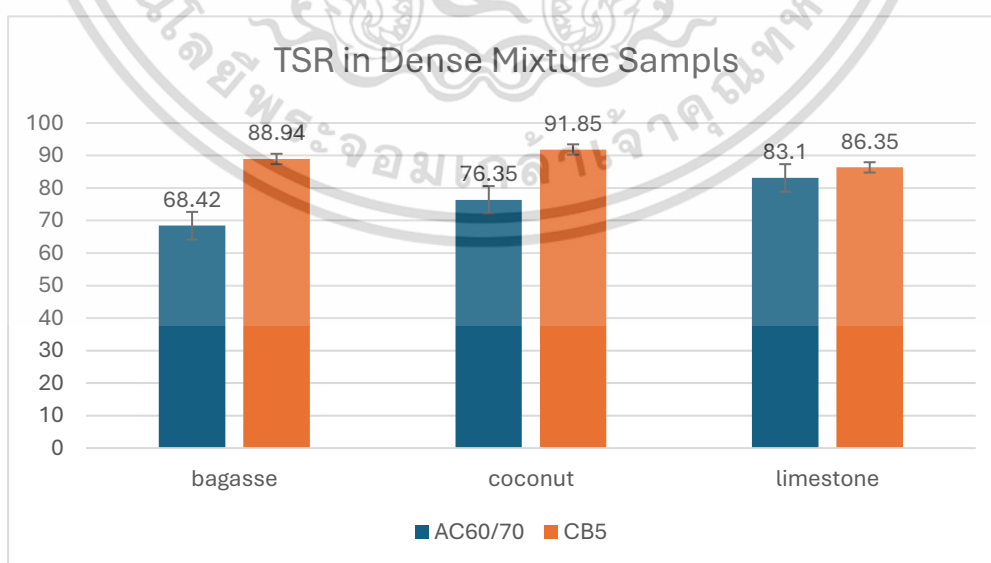
รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Rigden voids และจำนวนการสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4. ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids in a Dry-Compacted Fillers และ Moisture Damage Resistance

การศึกษาก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการเลือกฝุ่นแร่ที่ใช้ในส่วนผสมแอสฟัลต์อาจส่งผลต่อความสามารถในการทนต่อความเสียหายที่เกิดจากความชื้น [36] อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการยืนยันว่าฝุ่นที่แตกต่างกันส่งผลถึงความสามารถในการซึมผ่านของน้ำที่แตกต่างกัน ในขณะที่การทำให้ปริมาณช่องของอากาศให้คงที่ อาจส่งผลต่อความต้านทานต่อความเสียหายที่เกิดจากความชื้นหรือไม่. ซึ่งความชื้นที่แทรกซึมเข้าไปในส่วนผสมของแอสฟัลต์อาจส่งผลให้เกิดกลไกหลักสองประการ: adhesive failure คือเกิดการที่พันธะระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมอ่อนตัวลง cohesive failure คือเกิดจากความชื้นมีปฏิกิริยากับแอสฟัลต์

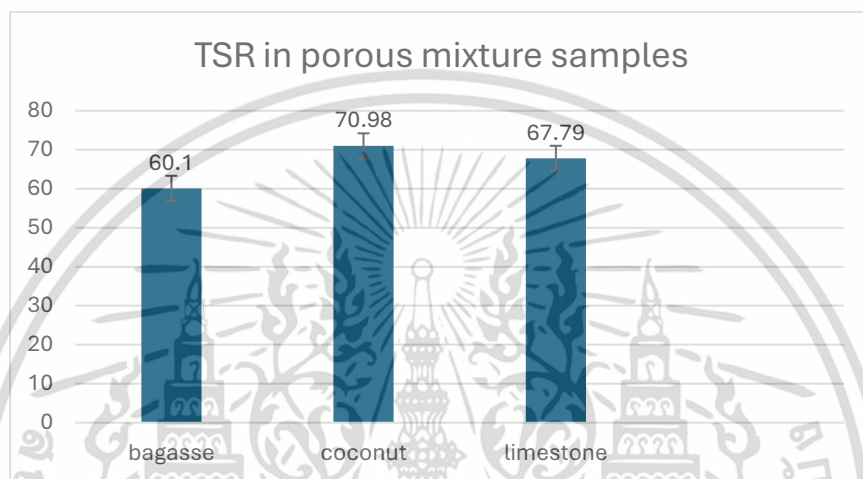
เพื่อตรวจสอบอิทธิพลที่เป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการซึมผ่านที่มีต่อความต้านทานต่อความเสียหายจากความชื้น นักวิจัยใช้การทดสอบ Indirect Tensile Strength (ITS) เพื่อคำนวณอัตราส่วนความต้านทานแรงดึง (TSR) ดังรูปที่ 4.3 แสดงถึงค่า TSR ที่ได้จากการผสมแอสฟัลต์ด้วยหินปูนรวมตัวไปจนถึงการปรับสภาพแบบเปียกสำหรับฝุ่นประเภทต่างๆ ในการคละแบบหนาแน่น(Dense Gradation) ทำให้ค่า TSR ที่สอดคล้องกันที่ 0.83 และ 0.86 ถูกส่งเกตสำหรับแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 และ CB ตามลำดับ โดยทั้งสองค่าใช้ฝุ่นหินปูน ซึ่งค่าทั้งสองนี้เกินเกณฑ์ขั้นต่ำ 0.7 ที่ระบุไว้ในมาตรฐาน TSR ในทำนองเดียวกัน AC60/70 ที่มีฝุ่นขุยมะพร้าวก็มากกว่าเกณฑ์เช่นกัน โดยมีค่า TSR 0.76 และ 0.92 สำหรับแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 และ CB ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม AC60/70 ที่มีตัวเติมกากอ้อยแสดงถึงค่า TSR ที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมาตรฐาน ในขณะที่ CB ที่มีฝุ่นกากอ้อยแสดงให้เห็นถึงความต้านทานที่ดีต่อความเสียหายจากความชื้น ด้วยค่า TSR ที่ 0.89 ค่า TSR นี้ได้รับการวิเคราะห์โดยสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน



รูปที่ 4.4 แสดงถึงค่า TSR ในการคละขนาดแบบ Dense Grade

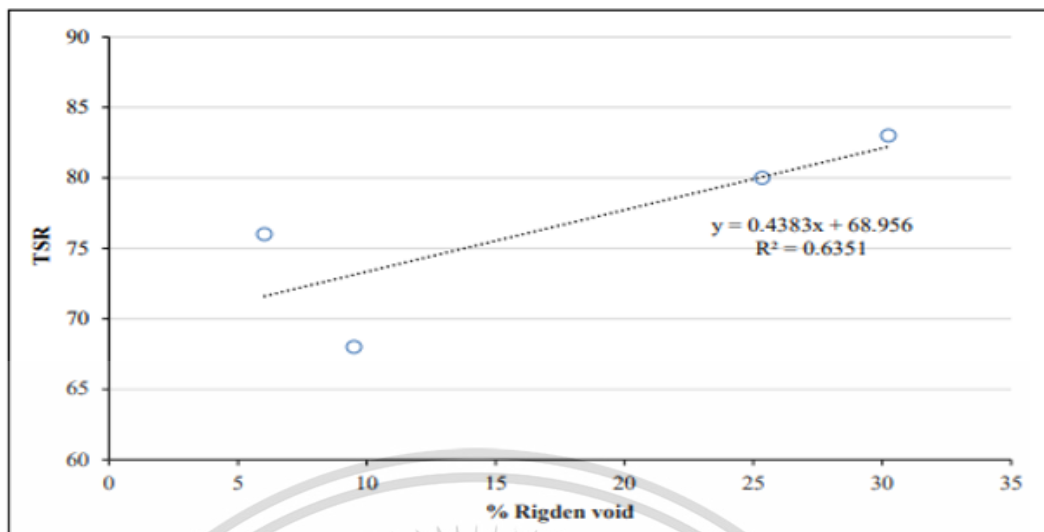
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนผสมแอสฟัลต์ที่มีรูพรุนมาก(Porous Asphalt)ซึ่งมีช่องว่างอากาศสูงกว่า ซึ่งจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการแทรกซึมของน้ำได้มากกว่า อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ของการทดสอบ TSR ได้ให้ผลลัพธ์ที่ส่งผลต่อความต้านทานต่อความเสียหายจากความชื้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างสำหรับแอสฟัลต์ที่ถูกดัดแปลงด้วย PMA และฝุ่นขุยมะพร้าวได้ผลลัพธ์ของค่า TSR เท่ากับ 0.71 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความต้านทานค่อนข้างสูงผลมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ AC60/70 ที่ใช้ฝุ่นของกากอ้อยและหินปูน ดังแสดงในรูปที่ 4.4

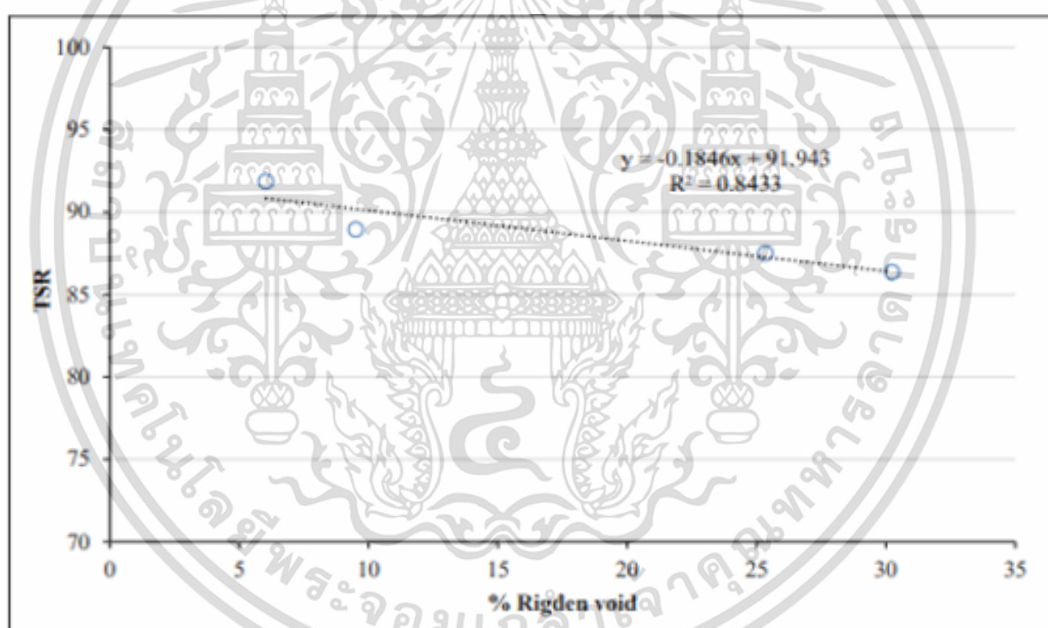


รูปที่ 4.5 แสดงถึงค่า TSR ในการคละขนาดแบบ Porous Grade

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ต่างกัันระหว่างตัวแปรนี้ในการคละขนาดต่างๆ ดังที่แสดงในรูปภาพที่เกี่ยวข้อง สำหรับการคละขนาดแบบหนาแน่น (Dense Gradation) และโดยแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 ซึ่งได้ทราบผลลัพธ์จากความสัมพันธ์ระหว่าง TSR และ Rigden Void ซึ่งแสดงค่า R^2 เท่ากับ 0.64 (รูปที่ 4.5). และแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในระดับปานกลางระหว่างตัวแปรทั้งสองในการคละขนาดนี้ ในกรณีของคละขนาดแบบหนาแน่น(Dense Gradation) ของแอสฟัลต์ชนิด CB จะพบว่ามีความสัมพันธ์กันมากขึ้น โดยมีค่า R^2 อยู่ที่ 0.84 (รูปที่ 4.6) ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่าง TSR และ Rigden Void อย่างไรก็ตาม สำหรับการคละขนาดแบบเปิด (Open Gradation) โดยใช้แอสฟัลต์ชนิด PMA พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง TSR และ Rigden Void นั้นส่งผลน้อยมาก โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.08 (รูปที่ 4.7)

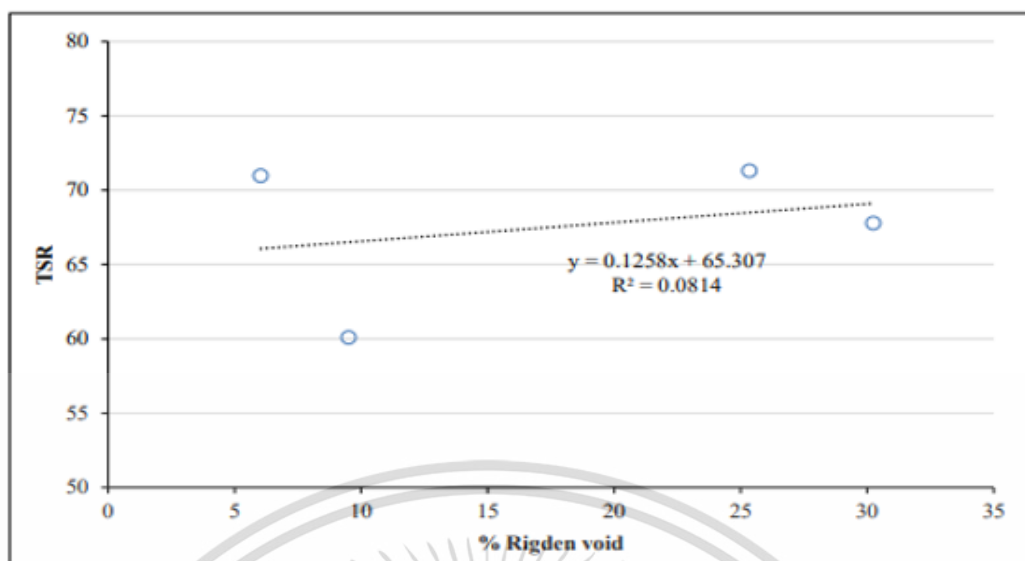


รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSR (Tensile Strength Ratio) และค่า Rigid Voids ของตัวอย่างแอสฟัลต์ชนิด AC 60/70



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSR (Tensile Strength Ratio) และค่า Rigid Voids ของตัวอย่างแอสฟัลต์ชนิด CB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TSR (Tensile Strength Ratio) และค่า Rigden Voids ของตัวอย่างแอสฟัลต์ชนิด PMA (Polymer-Modified Asphalt)

จากการค้นพบนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่ส่งผลต่ออิทธิพลของการคละขนาดกันของมวลรวมต่อความสัมพันธ์ระหว่าง TSR และ Rigden Void ความสัมพันธ์ระดับปานกลางที่พบในการคละขนาดชนิดหนาแน่น (Dense Gradation) โดยใช้แอสฟัลต์ชนิด AC60/70 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงใน Rigden Void ภายในการคละขนาดนี้มีผลกระทบที่เด่นชัดต่อค่า TSR ในทำนองเดียวกัน ความสัมพันธ์ที่ส่งผลมากกว่าในการคละขนาดแบบหนาแน่น (Dense Gradation) โดยชนิดของแอสฟัลต์ CB บ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงใน Rigden Void มีอิทธิพลเด่นชัดมากขึ้นต่อ TSR ในการคละขนาดนี้ ในทางกลับกัน ความสัมพันธ์ที่อ่อนแอในการคละขนาดแบบเปิด (Open Gradation) ของแอสฟัลต์ชนิด PMA แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงใน Rigden Void มีผลกระทบน้อยที่สุดต่อ TSR ในการคละขนาดนี้

ความแตกต่างในความสัมพันธ์ระหว่าง TSR และ Rigden Void ในการคละขนาดต่างๆ อาจเกิดจากความแตกต่างในลักษณะการอัดตัวของมวลรวม และการกระจายตัวของสารยึดเกาะแอสฟัลต์ และการมีอยู่ของช่องว่างอากาศ โดยที่การคละขนาดแบบหนาแน่น (Dense Gradation) โดยทั่วไปจะแสดงการอัดตัวของมวลรวมที่สูงกว่าและโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อความสัมพันธ์ที่ปานกลางในทางกลับกัน ในส่วนของการคละขนาดแบบเปิด (Open Gradation) มีโครงสร้างที่ซึมผ่านได้ดีและปริมาณและขนาดของช่องว่างขนาดใหญ่กว่า ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง Rigden Void และ TSR ลดลง

จากผลการทดสอบพบว่า การทดสอบ Rigden Voids มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาความเสียหายจากความชื้นในการคละขนาดของแอสฟัลต์ทั้งแบบมีความหนาแน่น (Dense Gradation) และมีรูพรุน (Porous Gradation) การค้นพบนี้สอดคล้องกับการวิจัยก่อนหน้านี้ที่ดำเนินการโดย Das ในปี 2020 ซึ่งใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ Grey เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของฝุ่น ความแข็งแรงของพันธะ และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักยภาพในความเสี่ยงหายจากความชื้นในแอสฟัลต์มาสดิกโดยเน้นความสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งของ Rigden Voids ในฐานะป้งจ้ยที่มีอิทธิพลมากที่สุด [33]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของฝุ่นแต่ละชนิดต่อความต้านทานต่อความเสียหายจากความชื้นของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids และความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของการทดสอบ Brunauer-Emmett-Teller (BET) โดยที่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างฝุ่นแต่ละชนิด โดยฝุ่นหินปูนมีเปอร์เซ็นต์ Rigden Voids สูงที่สุด กากอ้อย และขุยมะพร้าว โดยความหนาแน่นของฟิลเลอร์พบว่าแปรผันโดยตรงกับ Rigden Voids ซึ่งสามารถบ่งชี้ได้ว่าความหนาแน่นของฝุ่นที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาตรของช่องว่างอัดแน่นเพิ่มขึ้นในการบดอัด

จากการศึกษานี้เน้นถึงความสำคัญของการพิจารณาคุณสมบัติของฝุ่นแต่ละชนิดเมื่อออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์เพื่อให้แน่ใจว่ามีความทนทานต่อความชื้นและความทนทานของผิวทางเพียงพอ โดยการทดสอบ Rigden Voids ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการประเมินอิทธิพลของฝุ่นต่อประสิทธิภาพของแอสฟัลต์จากการประเมินด้วยผลของการทดสอบ Rigden Voids โดยวิศวกรสามารถตัดสินใจโดยใช้ข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกชนิดของฝุ่นและการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์ นอกจากนี้การศึกษายังได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Rigden Voids และพื้นที่ผิวจากการทดสอบ BET. โดยจากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของการทดสอบ BET ได้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นผิวของฝุ่นที่ศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพของแอสฟัลต์และพบว่าผลการวิจัยพบว่าฝุ่นที่มี Rigden Voids สูงนั้นแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจากการทดสอบ BET สูงตามไปด้วย ซึ่งปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันของแอสฟัลต์และฝุ่นที่เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งสามารถเป็นประโยชน์ในการเลือกชนิดของฝุ่นที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะของสารยึดเกาะแอสฟัลต์ที่ดีขึ้นและประสิทธิภาพการปูผิวทางโดยรวม

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Rigden Void และจำนวนการสัมผัสและความยาวในการสัมผัส ในแอสฟัลต์ประเภทต่างๆ (AC60/70, CB และ PMA) เผยให้เห็นความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน โดยแอสฟัลต์ชนิด AC60/70 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงบวกที่อ่อนแอ ในขณะที่แอสฟัลต์ชนิด CB แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมากของความสัมพันธ์ Rigden Void และทั้งจำนวนการสัมผัสและความยาวของการสัมผัส และแอสฟัลต์ชนิด PMA แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงบวกปานกลางกับจำนวนสัมผัส และความสัมพันธ์เล็กน้อยกับความยาวของการสัมผัส การค้นพบนี้เน้นถึงความสำคัญของการพิจารณาคุณลักษณะทางโครงสร้างจุลภาคเมื่อวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์

การศึกษานี้ยังได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Rigden Void และการต้านทานความเสียหายจากความชื้นที่ถูกทดสอบด้วยการทดสอบ Tensile Strength Ratio (TSR) จะแปรผันตามการกระจายของแอสฟัลต์ และแอสฟัลต์ที่มีการกระจายแบบระดับหนาแน่น(Dense Gradation) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ในระดับปานกลาง ในขณะที่ช่องผสมของกระจายแบบเปิด(Open Gradation) แสดงความสัมพันธ์ที่อ่อนแอ และจากผลลัพธ์เหล่านี้เน้นถึงความสำคัญของคุณลักษณะการบดอัดของมวลรวมและปริมาณของช่องว่างอากาศที่มีอิทธิพลต่อความสัมพันธ์ระหว่าง TSR และ Rigden Void

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทของฝุ่นในส่วนผสมของแอสฟัลต์และอิทธิพลที่มีต่อการต้านทานความชื้น และผลการวิจัยเน้นถึงความสำคัญของการพิจารณาค่า Rigden Voids และลักษณะพื้นผิวของฝุ่นเมื่อออกแบบผิวทางแอสฟัลต์ โดยผสมผสานชนิดฝุ่นที่เหมาะสมกับคุณสมบัติที่พึงประสงค์โดยวิศวกร และ ผู้รับเหมาสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ความทนทาน และความทนทานต่อความชื้นของผิวทางแอสฟัลต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคที่มีสภาพอากาศแปรปรวนและมีปริมาณน้ำฝนมาก

การศึกษาในอนาคตอาจมุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพในระยะยาวของส่วนผสมแอสฟัลต์ที่รวมกับฝุ่นชนิดต่างๆ และความต้านทานต่อความเสียหายจากความชื้นภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ นอกจากนี้ การตรวจสอบผลกระทบของฝุ่นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์อื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อการเกิดร่อนและความล้า จะช่วยให้ครอบคลุมมากขึ้น ความเข้าใจถึงอิทธิพลโดยรวมที่มีต่อประสิทธิภาพการปูผิวทาง ด้วยการขยายความรู้ของเราในด้านเหล่านี้ เราสามารถปรับปรุงการออกแบบและการก่อสร้างส่วนผสมแอสฟัลต์ต่อไปได้ ซึ่งนำไปสู่ถนนที่ยั่งยืนและยืดหยุ่นมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cheng, D. X., Little, D. N., Lytton, R. L., & Holste, J. C. (2002). Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1810, 44–53. doi:10.3141/1810-06.
- [2] Chaturabong, P., & Bahia, H. U. (2018). Effect of moisture on the cohesion of asphalt mastics and bonding with surface of aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 19(3), 741–753. doi:10.1080/14680629.2016.1267659
- [3] Harris, B. M., & Stuart, K. D. (1995). Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt. *Asphalt Paving Technology*, 64, 54-95
- [4] Romeo, E., Ghizzardi, V., Rastelli, S., & Montepara, A. (2016). Influence of Mineral Fillers and Their Fractional Voids on Mastic Rheological and Mechanical Properties. 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. RILEM Bookseries, 11. Springer, Dordrecht, Netherlands. doi:10.1007/978-94-017-7342-3_55.
- [5] Zhang, J., Sun, C., Li, P., Liang, M., Jiang, H., & Yao, Z. (2019). Experimental study on rheological properties and moisture susceptibility of asphalt mastic containing red mud waste as a filler substitute. *Construction and Building Materials*, 211, 159– 166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.252
- [6] Das, A. K., & Singh, D. (2020). Interfacial bond strength and moisture induced damage characteristics of asphalt mastic-aggregate system composed of Nano hydrated lime filler. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 13(6), 665–672. doi:10.1007/s42947-020-6004-7.
- [7] Rigden, P. J. (1947). The use of fillers in bituminous road surfacings. A study of filler-binder systems in relation to filler characteristics. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 66(9), 299–309. doi:10.1002/jctb.5000660902
- [8] Anderson, D. A., & Goetz, W. H. (1973). Mechanical behavior and reinforcement of mineral filler-asphalt mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 42, 37–66.
- [9] Anderson, D. A. (1987). Guidelines for use of dust in hot mix asphalt concrete mixtures. Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings Technical Sessions, Reno, United States
- [10] Richardson, C. (1915). The theory of the perfect sheet asphalt surface. *Industrial and Engineering Chemistry*, 7(6), 463–465. doi:10.1021/ie50078a002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Kallas, B. F., & Puzinauskas, V. P. (1961). A study of mineral fillers in asphalt paving mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 10, 493-528.

[12] Brown, E. R., Haddock, J. E., & Crawford, C. (1996). Investigation of Stone Matrix Asphalt Mortars. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1530(1), 95-102. doi:10.1177/0361198196153000112.

[13] Heitzman, M. A. (2005). Development of new film thickness models for hot mix asphalt. PhD Thesis, Iowa State University, Ames, United States.

[14] Mogawer, W. S., & Stuart, K. D. (1996). Effects of Mineral Fillers on Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1530(1), 86-94. doi:10.1177/0361198196153000111.

[15] Anderson, D. A., & Tarris, J. P. (1982). Adding dust collector fines to asphalt paving mixtures. NCHRP report, Transportation Research Board, Washington, United States

[16] Smith, B. J., & Hesp, S. A. M. (2000). Crack Pinning in Asphalt Mastic and Concrete: Regular Fatigue Studies. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1728(1), 75-81. doi:10.3141/1728-11.

[17] Winniford, R. S. (1961). The Rheology of Asphalt-Filler Systems as Shown by the Microviscometer. STP309, 109-120, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States

[18] Heukelom, W. (1968). The role of filler in bituminous mixes. *Association Asphalt Paving Technology Proceeding (AAPT)*, Minnesota, United States.

[19] Heukelom, W., & Wijga, P. W. O. (1971). Viscosity of dispersions as governed by concentration and rate of shear. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 40, 418-437.

[20] Craus, J., Ishai, I., & Sides, A. (1978). Some physico-chemical aspects of the effect and the role of the filler in bituminous paving mixtures. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceeding*, 13-15 February, 1978, Lake Buena Vista, United States.

[21] Kandhal, P. S. (1981). Evaluation of baghouse fines in bituminous paving mixtures (with discussion). *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, St Paul, United States.

[22] Dukatz, E. L., & Anderson, D. A. (1980). The effect of various fillers on the mechanical behavior of asphalt and asphalt concrete. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, St Paul, United States.

[23] Anderson, D. A., Tarris, J. P., & Brock, J. D. (1982). Dust Collector Fines and Their Influence on Mixture Design (With Discussion). *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, St Paul, United States.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Shashidhar, N., & Romero, P. (1998). Factors Affecting the Stiffening Potential of Mineral Fillers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1638(1), 94–100. doi:10.3141/1638-11
- [25] Shashidhar, N., Needham, S. P., Chollar, B. H., & Romero, P. (1999). Prediction of the performance of mineral fillers in stone matrix asphalt. *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, St Paul, United States.
- [26] Kandhal, P. S., Lynn, C. Y., & Parker, F. (1988). Tests for plastic fines in aggregates related to stripping in asphalt paving mixtures. Report No: NCAT Report No. 98-3. National Center for Asphalt Technology, Washinton, United States.
- [27] Faheem, A., & Bahia, H. U. (2009). Conceptual phenomenological model for interaction of asphalt binders with mineral fillers. *Asphalt Paving Technology-Proceedings*, 28, 679.
- [28] Faheem, A. F., & Bahia, H. U. (2010). Modelling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction. *Road Materials and Pavement Design*, 11, 281–303. doi:10.1080/14680629.2010.9690335.
- [29] Faheem, A., Hintz, C., Bahia, H., Al-Qadi, I., & Glidden, S. (2012). Influence of filler fractional voids on mastic and mixture performance. *Transportation Research Record*, 2294(2294), 74–80. doi:10.3141/2294-08.
- [30] Sangiorgi, C., Tataranni, P., Mazzotta, F., Simone, A., Vignali, V., & Lantieri, C. (2017). Alternative fillers for the production of bituminous mixtures: A screening investigation on waste powders. *Coatings*, 7(6), 76. doi:10.3390/coatings7060076.
- [31] Choudhary, R., Chattopadhyay, D., Kumar, A., & Julaganti, A. (2017). Use of industrial wastes as filler in open-graded friction courses. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 12(2), 106–116. doi:10.3846/bjrbe.2017.13
- [32] Lesueur, D., Lázaro Blázquez, M., Andaluz Garcia, D., & Ruiz Rubio, A. (2018). On the impact of the filler on the complex modulus of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 19(5), 1057–1071. doi:10.1080/14680629.2017.1288653.
- [33] Harris, B. M., & Stuart, K. D. (1995). Analysis of mineral fillers and mastics used in stone matrix asphalt. *Asphalt Paving Technology*, 64, 54-95.
- [34] Çelik, O. N., & Atiş, C. D. (2008). Compactibility of hot bituminous mixtures made with crumb rubber-modified binders. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1143–1147. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.02.005.

- [35] Delgadillo, R., & Bahia, H. U. (2008). Effects of Temperature and Pressure on Hot Mixed Asphalt Compaction: Field and Laboratory Study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(6), 440–448. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2008)20:6(440).
- [36] Hunter, A. E., Airey, G. D., & Collop, A. C. (2004). Effect of asphalt mixture compaction on aggregate orientation and mechanical performance. *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*, 12-16 September, Sun City, South Africa
- [37] Airey, G. D., Hunter, A. E., & Collop, A. C. (2008). The effect of asphalt mixture gradation and compaction energy on aggregate degradation. *Construction and Building Materials*, 22(5), 972–980. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.11.022.
- [38] Tayebali, A. A., Malpass, G. A., & Khosla, N. P. (1998). Effect of mineral filler type and amount on design and performance of asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record*, 1609(1609), 36–43. doi:10.3141/1609-05.
- [39] Valdes, J. P., Kahouadji, L., Liang, F., Shin, S., Chergui, J., Juric, D., & Matar, O. K. (2023). Direct numerical simulations of liquid–liquid dispersions in a SMX mixer under different inlet conditions. *Chemical Engineering Journal*, 462, 142248. doi:10.1016/j.cej.2023.142248
- [40] Hesami, E., Jelagin, D., Kringos, N., & Birgisson, B. (2012). An empirical framework for determining asphalt mastic viscosity as a function of mineral filler concentration. *Construction and Building Materials*, 35, 23–29. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.093.
- [41] Wang, H., Al-Qadi, I. L., Faheem, A. F., Bahia, H. U., Yang, S. H., & Reinke, G. H. (2011). Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential. *Transportation Research Record*, 2208(2208), 33–39. doi:10.3141/2208-05.
- [42] Akarsh, P. K., Ganesh, G. O., Marathe, S., & Rai, R. (2022). Incorporation of Sugarcane Bagasse Ash to investigate the mechanical behavior of Stone Mastic Asphalt. *Construction and Building Materials*, 353. doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129089.
- [43] Rachabut, K., & Chaturabong, P. (2020). Evaluation of using natural fillers to improve moisture damage resistance and the use of pull-off tensile test in determining moisture damage resistance in asphalt mixture. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(12), 4318. doi:10.3390/app10124318.
- [44] Mongkol, K., Chaturabong, P., & Suwannapalai, A. (2020). Effect of bagasse and coconut peat fillers on asphalt mixture workability. *Coatings*, 10(12), 1–15. doi:10.3390/coatings10121262.

[45] Sefidmazgi, N. R., Tashman, L., & Bahia, H. (2012). Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis. *Road Materials and Pavement Design*, 13(Sup1), 21–37. doi:10.1080/14680629.2012.657045.

[46] Hemnithi, N., & Chaturabong, P. (2023). Utilizing Imaging Analysis to Determine the Internal Structure Characteristics of Asphalt Mixtures for Permeability and Moisture Damage Performance. *Coatings*, 13(3), 584. doi:10.3390/coatings13030584



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้