



วิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของสโตนมาستيك
แอสฟัลต์กับพอร์สแอสฟัลต์

**A COMPARISON OF ENGINEERING PROPERTIES
BETWEEN STONE MASTIC ASPHALT AND
POROUS ASPHALT**

นายสุธี รังสรรค์สุภโร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญญา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

วิศวกรรมโยธา

ภาควิชา

เรื่อง การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของสโตนมาستيكแอสฟัลต์
กับพอร์สแอสฟัลต์

A Comparison of Engineering Properties between Stone Mastic Asphalt and
Porous Asphalt

นามผู้วิจัย นายสุธี รังสรรค์ศุภโร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอกพิพัฒน์ สอนวงษ์, วศ.ม.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วัชรินทร์ วิทยกุล, M.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์คิบุญ เมธากุลชาติ, Ph.D.)

(รองศาสตราจารย์วรกร ไม้เรียง, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 12 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2551.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของสโตนมาستيكแอสฟัลต์กับพอร์สแอสฟัลต์

A Comparison of Engineering Properties between Stone Mastic Asphalt and Porous Asphalt

โดย

นายสุธี รังสรรค์สุขโร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2551

สุธี รังสรรค์สุภโร 2551: การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์กับพอร์สแอสฟัลต์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ประธานกรรมการที่ปรึกษา:
รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอกพิพัฒน์ สอนวงษ์, M.Eng. 93 หน้า

ความมุ่งหมายของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้าน
วิศวกรรมของสโตนมาสติกแอสฟัลต์กับพอร์สแอสฟัลต์ ที่ใช้วัสดุมวลรวม 2 ชนิด คือวัสดุมวล
รวมหินปูน และวัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม ในการศึกษาจะมีการใช้ขนาดคละตามมาตรฐาน
ของการออกแบบส่วนผสมร้อนสโตนมาสติกแอสฟัลต์และพอร์สแอสฟัลต์ ผลการศึกษาพบว่า
ในสโตนมาสติกแอสฟัลต์และพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุเชื่อมประสานโพลิเมอร์โมดิฟายด์
แอสฟัลต์ ชนิดของวัสดุมวลรวมที่ต่างกัน ไม่มีผลต่อคุณสมบัติด้านคุณสมบัติการไหลและ
อัตราส่วนช่องว่างที่บรรจุด้วยแอสฟัลต์ที่แตกต่างกันตามมาตรฐานข้อกำหนดของแต่ละชนิด
ส่วนผสมร้อน แต่จะมีผลต่อคุณสมบัติด้านเสถียรภาพ และความหนาแน่น การศึกษาพบว่า
โมดูลัสการคืนตัวที่อุณหภูมิ 25°C, 30 °C และ 35 °C ในผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ เมื่อใช้วัสดุ
มวลรวมตะกรันเตาหลอมจะให้ค่าสูงกว่ามวลรวมหินปูน 19.83, 25.80 และ 43.31 เปอร์เซ็นต์
ตามลำดับ พอร์สแอสฟัลต์เมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมจะให้ค่าสูงกว่ามวลรวมหินปูน
24.36, 20.81 และ 21.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าการเกิดร่องล้อของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์และพอร์สแอสฟัลต์เมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมมีการเกิดร่องล้อที่ต่ำกว่าใช้
วัสดุมวลรวมหินปูน 7.72 และ 57.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ดังนั้นส่วนผสมร้อนสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมจึงมี
เสถียรภาพ ความทนทานต่อต้านการเกิดร่องล้อ ได้สูงกว่าวัสดุมวลรวมหินปูนในส่วนผสมร้อน
ชนิดเดียวกันและสูงกว่าในส่วนผสมร้อนพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมทั้งสองชนิด ส่วนการ
เสียดูบถาวรจะมีต่ำกว่าวัสดุมวลรวมหินปูนในส่วนผสมร้อนชนิดเดียวกันและต่ำกว่าในส่วนผสม
ร้อนพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมทั้งสองชนิดเช่นกัน



ลายมือชื่อนิสิต



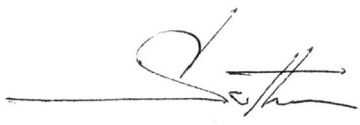
ลายมือชื่อประธานกรรมการ

11 03 51

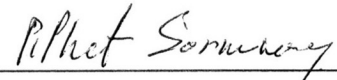
Suthee Rangsuparo 2008: A Comparison of Engineering Properties between Stone Mastic Asphalt and Porous Asphalt. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor FLt.Lt. Piphat Sornwong, M.Eng. 93 pages.

The objective of this research is to conduct the investigation of distinctive engineering properties between Stone Mastic Asphalt (SMA) and Porous Asphalt (PA). Both mixtures use limestone aggregate and mould heat steel mixture. In this study, a variable is a different size of mixture grades under the controlled factor (standard hot mixed these two types of mixtures). The result shows that SMA and PA using modified polymer asphalt as binder, does not have any implication to flow and air voids ratio in the asphalt mixtures under the standard controlled specific for each application. The impacts are related to stability and density. The study also shows that under certain temperatures of 25 °C, 30 °C and 35 °C, SMA using limestone as mixture, its surface is stronger than the steel furnace slag mixture of PA by 19.83%, 25.80% and 43.3% in order. While PA strength using steel furnace slag mixture is higher than the mass of limestone mixture by 24.36%, 20.81% and 21.45% consequentially. Therefore, wheel wear tracks will appear on the surface of PA using steel furnace slag under limestone mass of 7.72% and 57.9% respectively.

Therefore, the mixture of Stone Mastic Asphalt using steel furnace slag mass is more stable and rutting depth resistance and with this distinguishing property is better than the mass limestone mixture. To erode the permanent property of Stone Mastic Asphalt is more difficult than the one of limestone mixtures.



Student's signature



Thesis Advisor's signature

11 03 08

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รศ.ร.อ.พิพัฒน์ สอนวงษ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ทำหน้าที่อาจารย์ปรึกษาอย่างสมบูรณ์แบบ สละเวลาให้หนังสือเข้าปรึกษาอย่างใกล้ชิด สอบถาม ติดตามความก้าวหน้า และให้กำลังใจเมื่อพบปัญหาต่างๆ ในการทำวิจัย โดยไม่เห็นแก่ประโยชน์ รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล กรรมการวิชาเอก รศ.ดร.ดิญญ เมฆากุลชาติ กรรมการวิชาการที่แนะนำวิธีแก้ปัญหา ชี้ทางแก้ปัญหา จนงานวิจัยพบผลสำเร็จ และ ผศ.ดร. ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนชี้ให้เห็นประโยชน์ของความเพียร อันเป็นประโยชน์ต่อการใช้ชีวิตในสังคมและการทำวิทยานิพนธ์จนแล้วเสร็จด้วยดี

ขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักวิเคราะห์ตรวจสอบและสำนักวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านสถานที่ทดลอง และคำปรึกษาอีกมากมายที่มีคุณค่าต่องานวิจัย

ขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ชาวช่างก่อสร้างมหาเมฆ ทุกท่าน ที่ได้สนับสนุนกำลังใจและข้อมูลที่เกี่ยวข้องตลอดจนความช่วยเหลืออื่นๆอีกมากมายกับการวิจัย

ท้ายสุด ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ นายสุนทร นางละออ สุพโร บิดา มารดา ผู้วิจัย ผู้ซึ่งมีโอกาสทางการศึกษาน้อยแต่เล็งเห็นประโยชน์ของการศึกษาของผู้วิจัย และโดยเฉพาะ คุณวดี นุสรา พิศาลวิริยะกุล ผู้ซึ่งอยู่เคียงข้าง ร่วมเผชิญปัญหาและให้กำลังใจผู้วิจัย ทั้งในยามสุขและทุกข์ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นกับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอบแต่ พ่อ แม่ คณาจารย์แผนกวิชาช่างก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคราชสีหราชราม แผนกวิชาช่างก่อสร้าง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ ภาควิชาเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ผู้ประสิทธิ์ประสาทสรรพวิชาความรู้ อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างดีเสมอมา

สุธิ รังสรรค์สุโกโร

มีนาคม 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	8
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	26
ผลและวิจารณ์	38
สรุปและข้อเสนอแนะ	53
สรุป	53
ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	55
ภาคผนวก	59
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน	4
2	ขนาดกละ (Gradation) ของมวลรวมพอร์สแอสฟัลต์และปริมาณโพลีเมอร์ โมดิไฟด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้	5
3	ขนาดกละของวัสดุผสมแทรก	5
4	ข้อกำหนดในการออกแบบพอร์สแอสฟัลต์ คอนกรีต	6
5	ขนาดกละของวัสดุมวลรวม และปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในสโตน มาสติกแอสฟัลต์	6
6	ขนาดกละของวัสดุอัดแทรก	7
7	ข้อกำหนดคุณภาพของสโตนมาสติกแอสฟัลต์	7
8	ผลการออกแบบส่วนผสมพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม	39
9	ผลการออกแบบส่วนผสมสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวม หินปูนและตะกรันเตาหลอม	40
10	คุณสมบัติของพอร์สแอสฟัลต์ของมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม โดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างตามข้อกำหนด	40
11	คุณสมบัติของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ของมวลรวมหินปูนและตะกรันเตา หลอม โดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง 3.5%	41
12	ผลการทดสอบ Wheel Tracking Test ของพอร์สแอสฟัลต์โดยใช้วัสดุมวล รวมหินปูนและมวลรวมตะกรันเตาหลอม	44
13	ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวของสโตนมาสติกแอสฟัลต์และพอร์ส แอสฟัลต์ ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ผลการทดสอบ Tensile Strength พอร์สแอสฟัลต์ โดยวิธี Indirect Tensile	66
2	ผลการทดสอบ Tensile Strength สโตนมาสติกแอสฟัลต์ โดยวิธี Indirect Tensile	67
3	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 25° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี	72
4	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 30° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี	73
5	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 35° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี	74
6	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 25° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมหินปูน จ.นครสวรรค์	75
7	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 30° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมหินปูน จ.นครสวรรค์	76
8	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 35° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมหินปูน จ.นครสวรรค์	77
9	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 25° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมตะกั่วหินเตาหลอม จ.ชลบุรี	78
10	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 30° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมตะกั่วหินเตาหลอม จ.ชลบุรี	79
11	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 35° C ของ พอร์สแอสฟัลต์วัสดุมวลรวมตะกั่วหินเตาหลอม จ.ชลบุรี	80
12	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี	81
13	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี	82

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
14	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 35° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี	83
15	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.ชลบุรี	84
16	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.ชลบุรี	85
17	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.ชลบุรี	86
18	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุมวลรวมตะกั่วหินเตาหลอม จ.ชลบุรี	87
19	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมตะกั่วหินเตาหลอม จ.ชลบุรี	88
20	ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมตะกั่วหินเตาหลอม จ.ชลบุรี	89

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงขนาดคละของผิวทาง SMA , Dense Grade , Open Grade Asphalt	9
2	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของสโตนแมสติกแอสฟัลต์กับผิวทางประเภทต่าง ๆ	10
3	การเปรียบเทียบการจัดเรียงตัวของมวลรวม	12
4	รูปลักษณะการใช้งานเครื่อง Wheel Tracking	17
5	การป้อนน้ำหนักและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบด้วย Indirect Tensile Test	19
6	แรงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Indirect Tensile Test	19
7	กราฟช่วงระยะการให้น้ำหนักของการทดสอบโมดูลัสคืนตัว	21
8	แผนภูมิการเรียงขนาดคละของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม	38
9	แผนภูมิการเรียงขนาดคละของสโตนแมสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม	38
10	แผนภูมิการเปรียบเทียบค่า Rut Depth ของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม	43
11	แผนภูมิการเปรียบเทียบค่า Rut Depth ของสโตนแมสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม	43
12	แผนภูมิการเปรียบเทียบค่า Rut Depth ของสโตนแมสติกแอสฟัลต์กับพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและ ตะกรันเตาหลอม	44
13	กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Modulus ของสโตนแมสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและ ตะกรันเตาหลอม	47
14	กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Modulus ของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม	47
15	กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของสโตนแมสติกแอสฟัลต์และพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่างๆ	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุ มวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	48
17	กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวม หินปูนหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	49
18	กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์และพอร์ส แอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	49
	ภาพผนวกที่	
1	แสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุ มวลรวมหินปูน1 จ.สระบุรี	60
2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุ มวลรวมหินปูน2 จ.นครสวรรค์	61
3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุ มวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี	62
4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน1 จ.สระบุรี	63
5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน 2 จ.ชลบุรี	64
6	แสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุ มวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี	65
7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึก ของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน1 จ.สระบุรี	68
8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับ ความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน 2 จ.นครสวรรค์	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี	69
10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน1 จ.สระบุรี	69
11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน2 จ.ชลบุรี	70
12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี	70
13 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลหินปูนกับรวมตะกรันเตาหลอม	71
14 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลหินปูนกับรวม ตะกรันเตาหลอม	71
15 เครื่องมือทดลองมาร์แชลล์ Stability Test	90
16 เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (UTM-5P)	90
17 เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (UTM-5P) ติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ Static Indirect Tensile	91
18 การจัดเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ	91
19 เครื่องมือบดอัดตัวอย่างในการทดสอบ Wheel Tracking Test	92
20 เครื่องมือทดสอบ Wheel Tracking Test	92

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของสโตนมาสติก แอสฟัลต์กับพอร์สแอสฟัลต์

A Comparison of Engineering Properties between Stone Mastic Asphalt and Porous Asphalt

คำนำ

ถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) เป็นผิวทางยึดหยุ่นที่นิยมใช้กัน ในปัจจุบัน อันเนื่องมาจากเป็นถนนที่สามารถรองรับปริมาณการจราจรสูง มีความแข็งแรงทนทาน ผิวเรียบ แบนรับน้ำหนักรถได้สูง การบำรุงรักษาง่ายและราคาที่ถูกกว่าผิวทางคอนกรีต ประกอบด้วยมวลรวมที่มี คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีและแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) นำมาผสมกันตามการออกแบบ โดยวิธีต่าง ๆ ให้ได้มาซึ่งคุณสมบัติทั่วไปและคุณสมบัติเฉพาะของผิวทาง ทำการผสมแบบชนิด ร้อน (Hot mix) แล้วทำการปูลาด ณ สถานที่ก่อสร้างทาง บดอัดความหนาแน่นตามการข้อกำหนด ผิวทางที่ได้จะมีความสามารถรับน้ำหนักได้ตรงตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบ

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน โดยมีการแบ่งประเภทผิวทางเป็นชนิด ได้แก่ ผิวทางชนิด Dense Grade เป็นผิวทางที่ใช้กันทั่วไป ความแข็งแรงของผิวทางขึ้นอยู่กับความเสียดสี ระหว่างเม็ดของมวลรวม และแรงยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน ผิวทางชนิด Open Grade (OG) มีมวลรวมที่มีลักษณะขนาดเดียวกัน มีมวลรวมละเอียดน้อย ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง อากาศมาก และกำลังรับแรงมาจากการขัดตัวกันของมวลรวม แต่ไม่เหมาะกับพื้นที่ที่รับแรงเฉือนสูง ใช้วัสดุประสานซึ่งมีความหนาแน่นเคลือบผิวมวลรวมมากกว่า 15 ไมครอน เพื่อความคงทน เช่น พอร์สแอสฟัลต์ (Porous Asphalt) ผิวทางชนิด Fine Gap Grade (FGG) ประกอบไปด้วยมวลรวม หยาบน้อย ใช้ทรายและวัสดุผสมแทรกมากเหมาะสำหรับปริมาณการจราจรเบาบาง และใช้ความเร็วต่ำ และผิวทางชนิด (Stone Mastic Asphalt) เป็นผิวทางที่มีขนาดคละของมวลรวมอยู่ในลักษณะขาดช่วง (Gap Grade) มีมวลรวมหยาบมากถึงร้อยละ 70-80 % ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด มีมวลละเอียดน้อย และใช้วัสดุผสมเพิ่มประเภท Cellulose Fiber เพื่อป้องกัน การแยกตัวของแอสฟัลต์ของมวลรวมหยาบ ผิวทางชนิดนี้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ดี มีความฝืดสูง ค่าความสึกหรอต่ำ และมีความคงทนสูง ในการเลือกใช้ผิวทางแต่ละชนิดนั้น จะพิจารณาองค์ประกอบด้านโครงสร้าง ความหนาของผิวทาง

ชนิดและปริมาณการจราจร ลักษณะทางกายภาพของทาง อุณหภูมิและสภาพแวดล้อม คุณสมบัติของผิวทางที่ต้องการ ชนิดวัสดุและเครื่องมือเครื่องจักร รวมทั้งราคาที่เป็นตัวกำหนดการเลือกใช้

ในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของผิวทางสโตนมาสติกแอสฟัลต์ (Stone Mastic Asphalt) และพอร์สแอสฟัลต์ (Porous Asphalt) โดยการปรับปรุงขนาดผลของวัสดุมวลรวมตามรูปแบบของผิวทางแต่ละชนิด โดยใช้หินปูน (Limestone) และตะกรันเตาหลอม (Slag) เป็นวัสดุมวลรวม โดยศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมที่ได้จากการออกแบบของผิวทางข้างต้น การเกิดร่องล้อ (Rutting) และค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus) ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงข้อแตกต่างของคุณสมบัติผิวทางข้างต้น และสามารถเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมกับพื้นที่ได้อย่างถูกต้องตามความต้องการข้อกำหนดของพื้นที่ต่อไปได้

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการปรับเปลี่ยนขนาดผลของวัสดุมวลรวม ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาตามหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของหินปูน (Limestone) และตะกรันเตาหลอม (Slag) เพื่อนำมาเป็นวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต
2. ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินปูน (Limestone) และตะกรันเตาหลอม (Slag) เป็นวัสดุมวลรวมของผิวทางสโตนแมสติกแอสฟัลต์ (Stone Mastic Asphalt) และพอร์สแอสฟัลต์ (Porous Asphalt) ที่ออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Method)
3. เปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้าน Stability, Flow, Rutting และ Resilient Modulus

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของผิวทางสโตนแมสติกแอสฟัลต์ (Stone Mastic Asphalt) และพอร์สแอสฟัลต์ (Porous Asphalt) ที่ใช้โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (Polymer Modified Asphalt เรียกว่า PMA) เป็นวัสดุเชื่อมประสาน
2. วัสดุเชื่อมประสานที่นำมาใช้ในงาน ศึกษาวิจัยนี้เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งมีข้อกำหนดดังตารางที่ 1
3. ส่วนผสมจะถูกออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Method) ตามคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 2 ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 และสโตนแมสติกแอสฟัลต์ดังตารางที่ 5 ตารางที่ 6 และตารางที่ 7
4. เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพโดยการทดลองหาค่า Stability, Flow, Rutting และ Resilient Modulus

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน

รายการที่	คุณสมบัติ	หน่วย	ข้อกำหนด		วิธีทดสอบ
			AC 60 - 70	PMA	
1	เพนเตตรชันที่อุณหภูมิ 25 °ซ	0.1 มม.	60 – 70	60 – 70	DH-T 403
2	จุดอ่อนตัววงแหวนแบบลูกกลม	ซ	-	-	ASTM D36
3	ดัชนีเพนเตตรชัน	-	-	Min 3	NLT-181 ^a
4	การยึดตัวที่อุณหภูมิ 15 °ซ	ซม.	Min 100	Min 55	DH-T 405
5	จุดวาบไฟ	°ซ	Min 232	Min 220	ASTM D29
6	การละลายในไตรโคโรเอธิลีน	%	Min 99	Max 99	DH-T 409
7	ความหนืดที่อุณหภูมิ 60 °ซ	cP	-	-	ASTM D4402
	ที่อุณหภูมิ 135 °ซ	cP	-	1,100	ASTM D4402
8	ความหนาแน่น	kg/l	-	1.00 – 1.05	ASTM D70
<u>การทดสอบการที่เหลือจากการอบ</u>					
9	น้ำหนักที่หายไป	%	Max 0.8	Max 0.5	ASTM D1754
10	ค่าเพนเตตรชันที่เหลือ	%	Min 54	Min 70	DH-T 403
11	การยึดตัว ที่อุณหภูมิ 15 °ซ	ซม.	Max 0.8	Min 40	DH-T 405

หมายเหตุ a NLT = The National Laboratory of Transportation Madrid, Spain

ตารางที่ 2 ขนาดกะ (Gradation) ของมวลรวมพอร์สแอสฟัลต์และปริมาณโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้

ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรง
มิลลิเมตร	นิ้ว	ร้อยละโดยมวล
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
ปริมาณโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละโดยมวลของมวลรวม		4.0-6.0
ความหนา	มิลลิเมตร	35-50

ตารางที่ 3 ขนาดกะของวัสดุผสมแทรก

ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรง
มิลลิเมตร		ร้อยละโดยมวล
0.600	(เบอร์ 30)	100
0.300	(เบอร์ 50)	75-100
0.075	(เบอร์ 200)	55-100

ตารางที่ 4 ข้อกำหนดในการออกแบบพอร์สแอสฟัลต์ คอนกรีต

คุณภาพ	ข้อกำหนด
1. Cantabro Abrasion Test	
- Dry Sample Abrasion Loss	Max. 20 Percent
- Soaked Sample Abrasion Loss	Max. 40 Percent
2. Air Voids in the Mix	Min. 20 Percent

ตารางที่ 5 ขนาดกะของวัสดุรวม และปริมาณวัสดุเชื่อมประสานในสโตนมาสติกแอสฟัลต์

ขนาดที่เรียกใช้ มม. (นิ้ว)		12.5 (1/2)
สำหรับชั้นทาง		ชั้นผิวทาง(Wearing Course)
ความหนา มม.		40 - 70
ขนาดตะแกรง		ปริมาณผ่านตะแกรง
มม.	นิ้ว	ร้อยละโดยมวล
19	3/4	100
12.50	1/2	85 - 95
9.50	3/8	75 (maximum)
4.75	# 4	20 – 28
2.36	# 8	16 – 24
0.60	#30	12 - 16
0.30	# 50	12 - 15
0.075	# 200	8 – 10
0.020	Pan	Less than 3
ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานร้อยละของมวลรวม		> 6
ปริมาณเซลลูโลสไฟเบอร์ร้อยละของส่วนผสม		0.3 – 1.5

ตารางที่ 6 ขนาดกะละของวัสดุอัดแท่ง

ขนาดตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรง	
	มม.	ร้อยละ โดยมวล
	นิ้ว	
0.60	# 30	100
0.30	# 50	75 – 100
0.075	# 200	55 - 100

ที่มา: มาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีต ทล. – ม. 408/2532 กรมทางหลวง (2535)

ตารางที่ 7 ข้อกำหนดคุณภาพของสโตนมาสติกแอสฟัลต์

รายการ	ชั้นผิวทาง(Wearing Course)
การบดอัด(Blows)	50
เสถียรภาพ(Stability), ปอนด์	2,000
การไหล(Flow) 0.25 มม. (0.01 นิ้ว)	8 - 16
เปอร์เซ็นต์ของช่องว่าง(Percent Air Void)	3 - 4
ช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสของมวลรวม (Void in Mineral of Aggregate; VMA)	>16 %
การไหลแยกตัวของวัสดุเชื่อมประสาน (Schellenberg Binder Drainage)	< 0.3 %
ดัชนีความแข็ง(Strength Index)	> 75 %

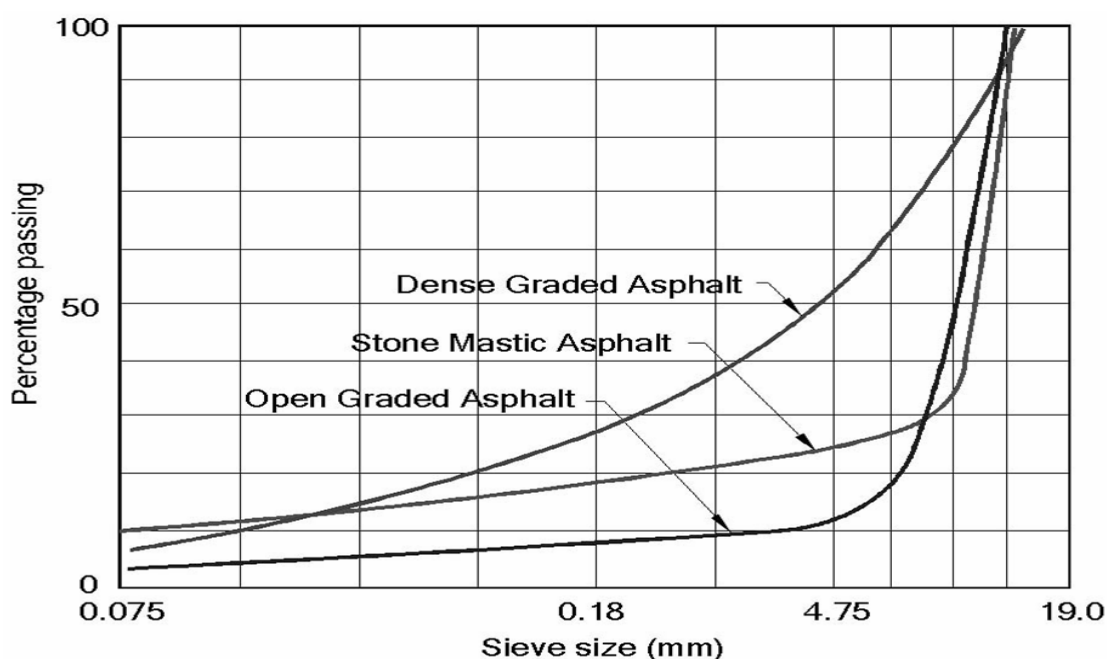
การตรวจเอกสาร

1. ความหมายและความเป็นมาของพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีตและสโตนมาสติกแอสฟัลท์

1.1 พอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (Porous Asphalt Concrete)

พริศา (2546) ผิวทางชนิดนี้ มีมวลรวมเป็นลักษณะขนาดเดียวกัน มีมวลรวมละเอียดจำนวนน้อย ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศมากถึงประมาณ 20 % และกำลังการรับแรงมากจากการขัดตัวกันของมวลรวม ด้วยเหตุนี้จึงมีความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่ไม่ควรไปใช้ในที่แรงเฉือนสูง ๆ ผิวทางชนิดนี้จะต้องใช้วัสดุประสานปริมาณมากและเคลือบผิวมวลรวมหนามากกว่า 15 ไมครอน เพื่อความคงทน

กรมทางหลวง (2542) งานผิวจราจรแบบพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต หมายถึง การก่อสร้างผิวจราจรด้วยการปูผิวจราจรด้วยวัสดุพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งได้จากการผสมระหว่างมวลรวม (Aggregate) กับโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์ สำหรับงานพอร์สแอสฟัลต์คอนกรีต (Polymer Modified Asphalt Cement For Porous Asphalt Concrete) ที่โรงงานผสม (Asphalt Concrete Mixing Plant) โดยควบคุมอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิตามกำหนดมีลักษณะผิวหน้าหยาบ มีรูพรุนสูงน้ำซึมผ่านได้ดีเพิ่มค่าความฝืดของผิวทางไม่เกิดแผ่นฟิล์มของน้ำ (Hydroplaning) และลดระดับเสียงขณะรถวิ่งผ่านมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นชั้นผิวทาง โดยการปูหรือเกลี่ยแต่งและบดทับบนชั้นรองผิวทาง (Binder Course) หรือชั้นผิวทางเดิมซึ่งน้ำซึมผ่านไม่ได้ที่ได้ระดับความลาด และได้ทำการแทคโคท (Tack Coat) ก่อนเสมอ



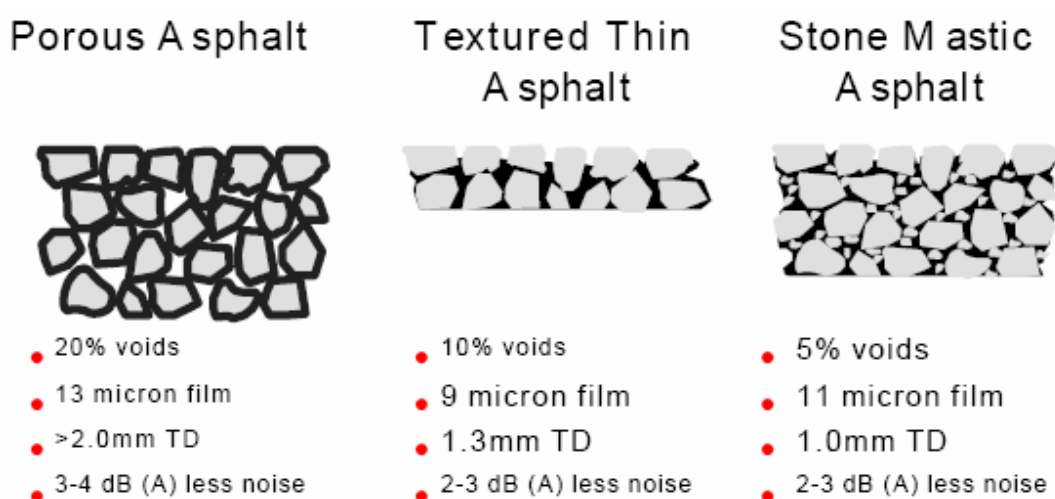
ภาพที่ 1 แสดงขนาดกะของผิวทาง SMA, Dense Grade, Open Grade Asphalt (Porous Asphalt)

1.2 สโตนมาสติกแอสฟัลต์ (Stone Mastic Asphalt: SMA)

พริสา (2546) ผิวทางชนิดสโตนมาสติกแอสฟัลต์ เป็นผิวทางที่นิยมใช้กันมาก สำหรับก่อสร้างถนนที่ต้องรับน้ำหนักจากการจราจรมาก เช่น สนามบิน ท่าเทียบเรือในยุโรป และแพร่หลายไปทั่วโลกลักษณะผิวทางที่ราบเรียบให้ความสะดวกสบายในการขับขี่ ด้านทาน การสิ้นเปลือง และก่อให้เกิดเสียงจากการสัญจรในระดับต่ำ วัสดุโครงสร้างที่แข็งแรงมีปริมาณมวล หยาบมาก ลักษณะของมวลรวมจะมีขนาดกะเป็นแบบ Gap Grade มีส่วนหยาบที่ค้ำบนตะแกรง เบอร์ 8 ประมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7 ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เติมลง ในช่องว่างระหว่างมวลรวมมีมากทำให้ผิวทาง SMA มีความทนทานด้านการเปลี่ยนรูปร่าง ถาวรได้ดี แต่เนื่องจากมีปริมาณวัสดุเชื่อมประสานมากจึงต้องป้องกันการไหลซึมของยางแอสฟัลต์ (Binder Drainage) โดยใส่สารผสมเพิ่ม (Stabilizing Additive) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผิวทาง SMA ลดการไหลซึมของยางแอสฟัลต์ ส่วนผสมสามารถก่อสร้างเป็นชั้นบาง ๆ ได้ ทำให้ปริมาณการใช้ แอสฟัลต์ที่มีคุณภาพในการก่อสร้างปริมาณน้อยลง ด้วยเหตุนี้ SMA จึงถูกพัฒนาขึ้นมาให้เกิด ประสิทธิภาพในการเลือกใช้วัสดุเชื่อมประสานและมวลรวมที่มีคุณภาพสูง

JTG Richardson(1999) ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของสโตนแมสติกแอสฟัลต์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในสหราชอาณาจักร จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

สโตนแมสติกแอสฟัลต์เป็นแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมขนาดละเอียดเรียงข้ามขนาด (Gap Grade) มีมวลรวมหยาบ วัสดุอัดแทรกและปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป อาจใส่สารผสมเพิ่ม (Stabilizing Additive) เพื่อปรับปรุงให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความเหนียวขึ้น เพื่อป้องกันการไหลเยิ้มของแอสฟัลต์ เนื่องจากผิวทางสโตนแมสติกแอสฟัลต์มีส่วนของมวลรวมหยาบที่สูงทำให้มีผิวสัมผัสระหว่างเม็ดหินใหญ่ (Stone on Stone Contact) มาก การถ่ายแรงระหว่างอนุภาคหินจึงเกิดได้ดี ทำให้สามารถต้านทานการเกิดร่องล้อและการเสียรูปได้ดี ลักษณะโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของสโตนแมสติกแอสฟัลต์กับผิวทางประเภทต่าง ๆ

Robert and Schmiedlin; Debra and Debra (2002) ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของสโตนแมสติกแอสฟัลต์กับแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป โดยการใส่ Cellulose fiber, mineral fiber, thermoplastic polymer และ Elastomeric polymer เป็นสารปรับปรุงคุณภาพเพื่อประเมินประสิทธิภาพของ SMA แต่ละประเภท โดยพิจารณาคูสมบัติของ การเกิดร่องล้อ ความเสียหาย การเกิดร่องล้อ ผลกระทบของเสียง และการขับน้ำ

จากการศึกษาสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

- ผิวทางประเภทสโตนมาสติกแอสฟัลต์ จะเกิดรอยร้าวน้อยกว่าผิวทางประเภทแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป ประมาณ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์

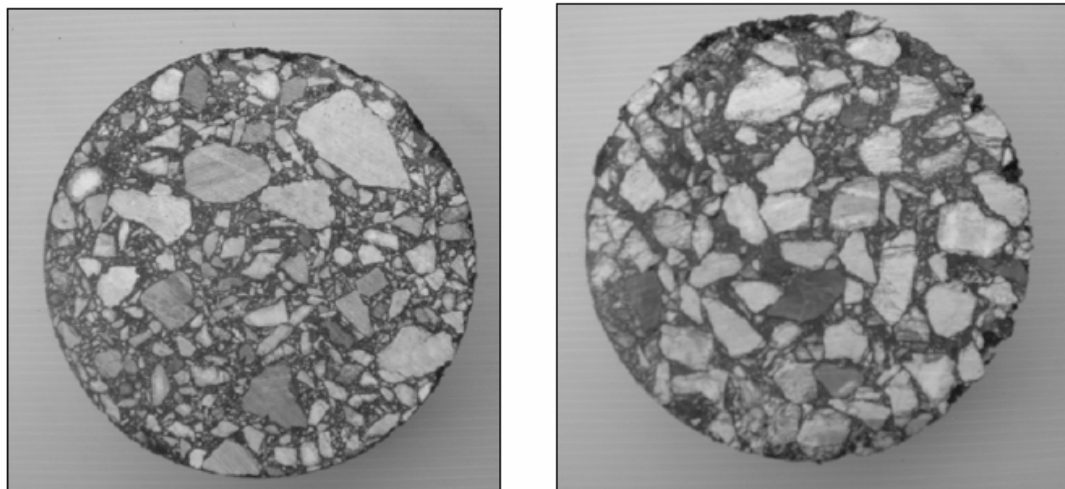
- ผิวทางประเภทสโตนมาสติกแอสฟัลต์ ที่มีขนาดละเอียดกว่าจะมีความต้านทานการเกิดรอยร้าวมากกว่าผิวทางที่มีขนาดละเอียดกว่า

- ผิวทางประเภทสโตนมาสติกแอสฟัลต์ ที่ปูบนแอสฟัลต์คอนกรีตมีอัตราการเกิดรอยร้าวเท่ากับที่ปูบนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และผิวทางประเภทสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ปูบนทั้งสองกรณีจะมีความต้านทานการเกิดรอยร้าวมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐานประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์

- เสียงที่วัดได้จากสโตนมาสติกแอสฟัลต์ เมื่อมีรถขับผ่านจะน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐานประมาณ 5 เดซิเบล

- ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ผิวทางทั้งสโตนมาสติกแอสฟัลต์ และแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐาน มีความสามารถในการต้านทานการเกิดร่องล้อที่ไม่ต่างกันนัก โดยให้ผลที่ดีทั้งสองประเภท

- ผิวทางประเภทสโตนมาสติกแอสฟัลต์จะมีความปลอดภัยที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐาน เนื่องจากสโตนมาสติกแอสฟัลต์จะเกิดละอองน้ำเมื่อขับในขณะที่มีผิวเปียกและมีแสงสะท้อนเมื่อขับในเวลากลางคืนน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตมาตรฐาน



ภาพที่ 3 (ก) การจัดเรียงตัวของมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต (ข) การจัดเรียงตัวของมวลรวมในสโตนมาสติกแอสฟัลต์

ประโยชน์ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์จากการศึกษาสรุปได้ดังนี้

- มีความต้านทานการเกิดร่องล้อสูง
- มีความต้านทานการเกิดรอยร้าวสูง
- มีความคงทนสูง
- ความต้านทานในการหลุดลอก
- ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ
- มีค่าความต้านทานการลื่นไถลที่ดี
- ลดมลภาวะทางเสียง

2. วัสดุมวลรวมโดยใช้ตะกรันเหล็ก

ตะกรันเหล็กเป็นสารประกอบที่ถูกขจัดออกมาในรูปของตะกอนโลหะ จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

2.1 ตะกรันเตาถลุง (Blast Furnace Slag)

ตะกรันเตาถลุงเป็นผลพลอยได้มาจากอุตสาหกรรมถลุงเหล็กซึ่งใช้แร่เหล็ก ถ่าน โค้ก หินปูน และโดโลไมต์ เป็นวัสดุในการถลุง ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,650 องศาเซลเซียส ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ที่มีมากในก๊าซที่เกิดการสันดาป จะทำหน้าที่รีดิวซ์แร่เหล็ก เมื่อเหล็กถูกรีดิวซ์จะเคลื่อนลงมาส่วนล่างของเตา ส่วน Fluxing Stone ซึ่งประกอบด้วย หินปูน และโดโลไมต์ จะสลายกลายเป็นแคลเซียมและแมกนีเซียมออกไซด์ รวมกับซิลิกาและอลูมินาของแร่เหล็ก เกิดเป็นตะกรันรวมกันอยู่ในรูปหลอมละลายอยู่เหนือเหล็ก

ชนิดของตะกรันเตาถลุง การเย็นตัวมีผลกับคุณสมบัติของตะกรันเตาถลุง ที่อุณหภูมิประมาณ 1,500 องศาเซลเซียส ตะกรันเตาถลุงจะถูกส่งออกจากเตาหลอมและแยกประเภทต่าง ๆ ตามการเย็นตัวดังนี้

Bank Slag เกิดจากการขนตะกรันเตาถลุงไปเก็บไว้ในถัง แล้วจึงเทตะกรันเตาถลุงบนพื้นที่ที่มีขอบกั้น จนเกิดการเย็นตัวและแข็งตัว

Ladle-to-pit Slag เกิดจากการเทตะกรันเตาถลุงที่หลอมเหลว ออกจากถังขนาดใหญ่ ไปในเบ้าหรือหลุมที่เตรียมไว้ โดยถังขนาดใหญ่มีความจุประมาณ 5 – 10 ตัน ถูกขนส่งโดยทางรถไฟเพื่อนำไปเทในหลุมที่มีขนาดกว้าง 50 – 90 ฟุต ยาว 350 – 1300 ฟุต ลึก 8- 20 ฟุต

Ball Slag เกิดจากการเย็นตัวของตะกรันเตาถลุง ในถังขนาดใหญ่ในช่วงเวลา 14 – 24 ชั่วโมง จนกระทั่งมีรูปร่างค่อนข้างกลม และ Ball Slag ยังต้องใช้เวลาเย็นตัวอีกเป็นอาทิตย์ เพื่อให้แกนกลางแข็งก่อนที่จะนำไปใช้งาน

Direct – to – pit Slag เกิดจากการเทตะกรันเตาถลุงหลอมเหลว ไปตามรางเพื่อไปยังเบ้าหลุมที่อยู่ใกล้กับเตาหลอม และเร่งการเย็นตัวโดยฉีดน้ำไปยังผิวของตะกรันเตาถลุงที่ร้อน

2.2 ตะกรันเตาหลอม (Steel Furnace Slag)

ตะกรันเตาหลอมเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้า โดยการนำเหล็กดิบ เศษเหล็ก หินปูน (CaO) และโดโลไมท์ ซึ่งเป็นวัสดุดิบในการผลิตใส่เข้าไปในเตา ซึ่งมี 2 แบบที่ใช้กัน

การผลิตด้วยเตาออกซิเจน (Oxygen Process) เมื่อใส่วัตถุดิบต่าง ๆ แล้วจะเป่าออกซิเจนความดันสูงเข้าไปในเตา โดยออกซิเจนจะเข้าไปรวมตัวกับสารมลทินต่าง ๆ เช่น คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัสและเหล็ก บางส่วนในรูปของออกไซด์หลอมเหลว และไปรวมตัวกับหินปูนและโดโลไมท์ เกิดเป็นตะกรันเตาหลอมขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 30 – 40 นาที

การผลิตด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Process) ไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนและการหลอมเหลว หินปูนจะหลอมปกคลุมน้ำเหล็กที่กำลังหลอมเหลวและควบคุมการกำจัดมลทินต่าง ๆ คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส จะค่อย ๆ ถูกกำจัดออกไป อยู่ในรูปของตะกรันเตาหลอม โดยใช้เวลาประมาณ 40 – 50 นาที

3. โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์

The Institute of Petroleum (2000) โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ คือแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมสารโพลีเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคนาขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องผสมชนิดแรงเฉือนเพื่อให้โพลีเมอร์กระจายตัวและคงสภาพอยู่ในแอสฟัลต์

โพลีเมอร์ คือ สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มวลโมเลกุลสูง เกิดจากการรวมตัวของสารโมเลกุลเล็ก ๆ ที่เรียกว่าโมโนเมอร์จำนวนมากมาเกิดพันธะเชื่อมต่อกัน

1. โพลีเมอร์แบ่งตามลักษณะการเกิดเป็น 2 ชนิด คือ

- 1.1 โพลีเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ ยางสังเคราะห์ พลาสติก โพลีเอสเตอร์
- 1.2 โพลีเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ ยางธรรมชาติ เซลลูโลส ไกลโคเจนโปรตีน

2. โพลีเมอร์แบ่งตามชนิดของโมโนเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่

2.1 โฮโมโพลีเมอร์ คือ โพลีเมอร์ที่เกิดจากโมโนเมอร์ชนิดเดียวกันมาเกิดพันธะกัน ได้แก่ เซลลูโลส โกลโคโรเจน และแป้ง เป็นต้น

2.2 โคโพลีเมอร์ หรือโพลีเมอร์ร่วม คือ โพลีเมอร์ที่เกิดจากโมโนเมอร์ต่างชนิดมาเกิดพันธะกัน ได้แก่ โพรตีน โพลิสไตรีน โพลีบิวตาไดอิน โพลีเอสเตอร์ เป็นต้น โครงสร้างของโพลีเมอร์มี 3 ชนิด คือ

2.2.1 โพลีเมอร์แบบเส้น เกิดจากโมโนเมอร์มาเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างกันเป็นสายโซ่ โพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบนี้จะมีคุณสมบัติความหนาแน่นสูงเนื้อแข็งมีความเหนียวกว่าโครงสร้างแบบอื่น และจุลหุลอมเหลวสูงกว่าโพลีเมอร์แบบกิ่ง

2.2.2 โพลีเมอร์แบบกิ่ง เกิดจากโมโนเมอร์ที่มาสร้างพันธะกันแบบกิ่งสาขาที่เกาะอยู่บนสายโซ่หลัก โพลีเมอร์ชนิดนี้มีความหนาแน่นและจุลหุลอมเหลวต่ำ แต่มีความยืดหยุ่นดีกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่น

2.2.3 โพลีเมอร์แบบร่างแห โมโนเมอร์ที่มาสร้างพันธะกันในลักษณะที่มีสายโซ่หลักหลายสายและมีกิ่งเชื่อมโยงสายโซ่เหล่านั้นเป็นเสมือนร่างแหต่อเนื่องกันไป โพลีเมอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติไม่ยืดหยุ่นมีความคงตัว มีเนื้อที่แข็งมาก ไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างกลับไปกลับมาได้เมื่อได้รับความร้อนสูงจะแตกสลายกลายเป็นเถ้าไปโพลีเมอร์ที่ใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เพื่อใช้เป็นวัสดุ เชื่อมประสานชนิดโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์

(The Institute of Petroleum, 2000) สไตรีนบิวตาไดอินสไตรีน (Styrene Butadiene Styrene ; SBS) เป็นโคโพลีเมอร์ของโพลิสไตรีนต่อเข้ากับโพลีบิวตาไดอินซึ่งเป็นแกนกลางปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับโพลิสไตรีน มีโครงสร้างของโพลีเมอร์เป็นแบบเส้น มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ โมเลกุลของโพลีเมอร์จะกลายเป็นสารละลายในแอสฟัลต์ เพิ่มความแข็งแรงความเหนียวและจุลหุลอมเหลวของแอสฟัลต์ให้สูงขึ้น แต่ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของโพลีเมอร์ในแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพ ชนิดของแอสฟัลต์ รวมถึงวิธีการในการผลิตเพื่อผสมรวมเข้าด้วยกัน SBS ส่วนใหญ่จะละลายได้ดีในอโรมาติก หรือน้ำมัน เพื่อปรับปรุง

การละลายของโพลีไสตรีนในโพลีเมอร์ แต่หากมีโโรมาติกมากเกินไปจะลดประสิทธิภาพของ SBS เนื่องจากสไตรีนบางส่วนในโมเลกุลของโพลีเมอร์ละลายในแอสฟัลต์

4. การเกิดร่องล้อของผิวทาง

Metcalf (1998) กล่าวว่าไว้ว่าการทดสอบการเกิดร่องล้อของผิวทางนั้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีมานานแล้ว โดยเริ่มขึ้นที่เมืองฮาลิงตัน ปี ค.ศ. 1919 ด้วยเครื่องทดสอบแบบ Full Scale ต่อมา ในปี ค.ศ. 1920 ที่รัฐอินเดียนา สถาบันทดสอบ The Bates Road Test ได้ทดสอบการเกิดร่องล้อ ด้วยการควบคุมการจราจรที่นำมาใช้ทดสอบให้มีน้ำหนักล้อระหว่าง 1 – 4 ตันมีระยะทางในการทดสอบ 4 กิโลเมตร ปี ค.ศ. 1944 The Hybla Valley Non Rigid Pavement ได้ศึกษาการแอ่นตัวของผิวทางซึ่งมีส่วนสำคัญต่อการศึกษาในเรื่องลักษณะนี้ในเวลาต่อมา

อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ. 1958 – 1960 AASHO Road Test ได้เริ่มการทดสอบผิวถนนด้วยวิธีที่ทันสมัย โดยใช้เครื่องทดสอบ Accelerated Loading Facility และการใช้โครงข่ายทางหลวงในสภาพการจราจรปกติเป็นสถานที่ทดสอบ การทดสอบได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบผิวทางกับรูปทรงของถนนและจำนวนครั้งของน้ำหนักรถที่กระทำต่อผิวถนน แต่ความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นเพียงข้อกำหนดเฉพาะงานที่ทดสอบได้เท่านั้น

Oliver and Tredrea (1998) กล่าวว่าการใช้ Full Scale Road Trial โดยการใช้รถทดสอบวิ่งไปบนท้องถนนและเฝ้าสังเกตพฤติกรรมของส่วนผสมบนถนนเป็นเวลาหลาย ๆ ปี ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่แพงมาก สำหรับการทดสอบที่ใช้เวลาน้อยและให้ผลเป็นที่ยอมรับคือ การทดสอบด้วยเครื่อง Wheel Tracking ซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะสามารถจำลองการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์บนถนนในลักษณะที่มีน้ำหนักกระทำซ้ำๆ และครอบคลุมถึงช่วงอุณหภูมิที่สภาพถนนจะรับได้

เครื่อง Wheel Tracking ได้พัฒนาและออกแบบโดย U.K. Transport Research Laboratory และมีมาตรฐานการใช้งานเป็นไปตามมาตรฐานอังกฤษที่ BS 598, Part 110



ภาพที่ 4 รูปลักษณะการใช้งานเครื่อง Wheel Tracking

ที่มา: Ronald *et al.* (n.d.)

5. การทดสอบหาดัชนีความแข็ง (Strength Index, SI)

พริศา (2546) วิธีการทดสอบ Ontario Vacuum Immersion Marshall Test เป็นการทดสอบวิธีหนึ่งที่ใช้ในการทำทดลองในประเทศแคนาดา เพื่อศึกษาหาค่าความต้านทานของการหลุดล่อน (Stripping Resistance) ของมวลรวมผสมร้อนโดยใช้ค่าดัชนีความแข็งซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาแชลล์จากก้อนตัวอย่างที่แช่ในน้ำเกลือ (0.5% Seat Solution) เทียบกับค่าเฉลี่ยของเสถียรภาพของมาแชลล์จากก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในน้ำเกลือ (Unsoaked) โดยค่านี้จะเทียบออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าดัชนีความแข็งของมวลรวมผสมร้อนที่จะนำไปปูลาด ถ้าค่าดัชนีความแข็งมีค่าต่ำจะชี้ให้เห็นว่า ผิวทางนั้นหลุดล่อนง่ายสำหรับการทดสอบนี้ ได้กำหนดค่าดัชนีความแข็งไว้ว่าต้องไม่ต่ำกว่า 75% ค่าดัชนีความแข็งแรงสามารถจะคำนวณได้จากสมการ

$$SI = \frac{\text{Soaked Sample} \times 100}{\text{Unsoaked Sample}}$$

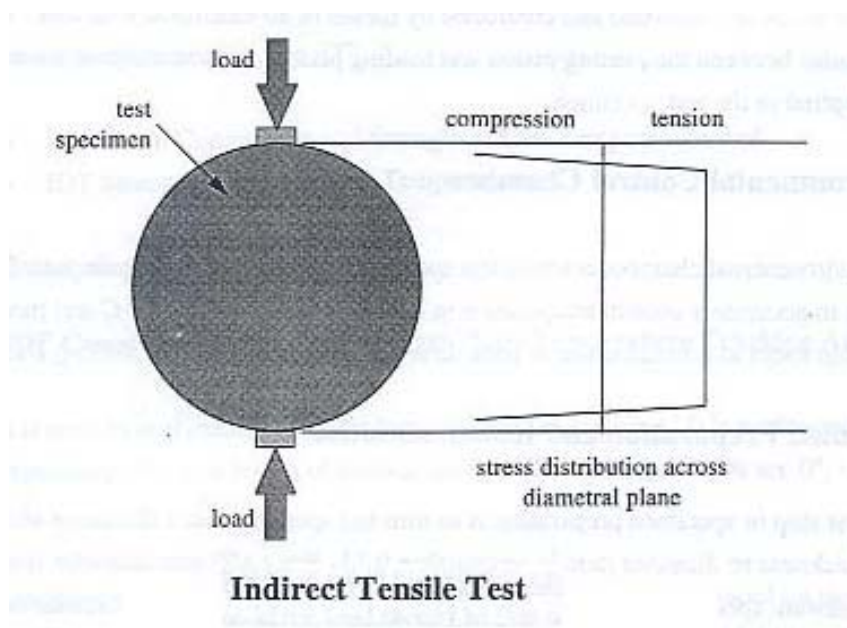
Soaked Sample และ Unsoaked Sample คือค่าที่อ่านได้จากการทดสอบหาเสถียรภาพ

6. การทดสอบวัสดุโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)

เทพฤทธิ์ (2549) การทดสอบแบบ Indirect Tensile Test เป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักที่เป็น Compression load ซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้งแบบ Static และแบบ Repeated / Dynamic load แล้วแต่กรณี โดยให้แรงกระทำในแนวนอนตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวดิ่งของก้อนวัสดุทดสอบ ตามทฤษฎีที่ Stresses พัฒนาขึ้น เนื่องจากการกระทำของแรงที่กระทำต่อก้อนวัสดุทดสอบทรงกระบอก ในทางปฏิบัติหากยึดการให้แรงของก้อนวัสดุทดสอบโดยตรงแล้วจะทำให้จุดแตกหักของวัสดุเกิดที่ตำแหน่งขอบผิวของก้อนวัสดุทดสอบที่ทำการให้แรง ผลที่ได้จะไม่ถูกต้องตามคุณสมบัติจริงของวัสดุที่ควรจะเป็น ดังนั้นการให้แรงจึงต้องกระทำผ่านแท่งก้นน้ำหนักที่เป็นเหล็กสแตนเลสที่มีขนาดเหมาะสม กล่าวคือ

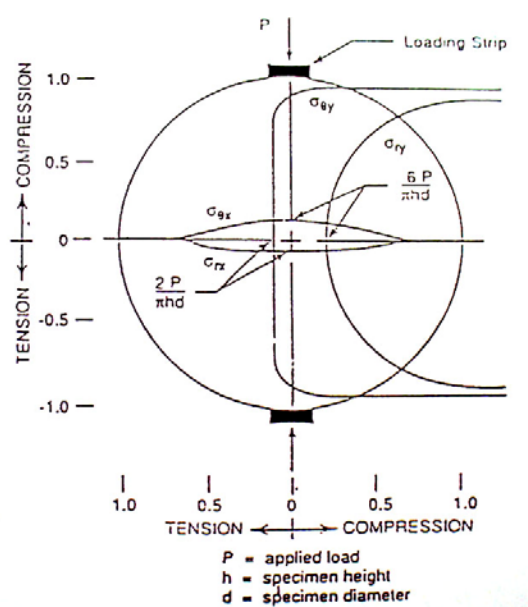
ในกรณีที่ก้อนวัสดุทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร และในกรณีที่ก้อนวัสดุทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 150 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร โดยที่แท่งก้นน้ำหนักดังกล่าวต้องมีด้านสัมผัสกับผิวของก้อนวัสดุทดสอบซึ่งเป็นส่วนโค้งที่มีรัศมีเท่ากับรัศมีของก้อนวัสดุทดสอบ ทำให้สามารถแนบกันได้สนิทพอดีเพื่อประโยชน์ในการกระจายน้ำหนักและการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำคงที่ การให้แรงในลักษณะนี้จะทำให้เกิดหน่วยแรงดึง (Tensile stress) ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการให้แรง หรือแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่ง ทำให้ก้อนวัสดุทดสอบเกิดการแตกแยกขึ้นตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ว่าจะเกิดจากการป้อน Single load หรือ Repeated load ก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 13

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายของ Stresses ที่เกิดขึ้นภายในก้อนวัสดุทดสอบขณะทำการทดสอบทั้งในแนวราบและแนวดิ่ง จะสังเกตเห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางของก้อนวัสดุทดสอบ Compressive stress ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่าของหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแนวราบ ผลจากทฤษฎีพอจะสรุปสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณค่า Tensile strength ค่า Tensile strain ค่า Modulus of Elasticity และค่า Poisson's Ratio ได้ โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ



ภาพที่ 5 การป้อนน้ำหนักและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่างจากการทดสอบด้วย Indirect Tensile Test

ที่มา: วัชรินทร์ (2547)



ภาพที่ 6 แรงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ Indirect Tensile Test

ที่มา: Anagnos and Kennedy (1972)

ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่างจากการทดสอบ Indirect Tensile สามารถหาได้จากสมการ

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi D h}$$

เมื่อ	σ_T	=	Tensile Strength (MPa)
	P	=	น้ำหนักที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (N)
	a	=	ความกว้างของแผ่นถายน้ำหนัก (mm)
	h	=	ความสูงของก้อนตัวอย่างที่เริ่มทำการทดลอง (mm)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (mm)

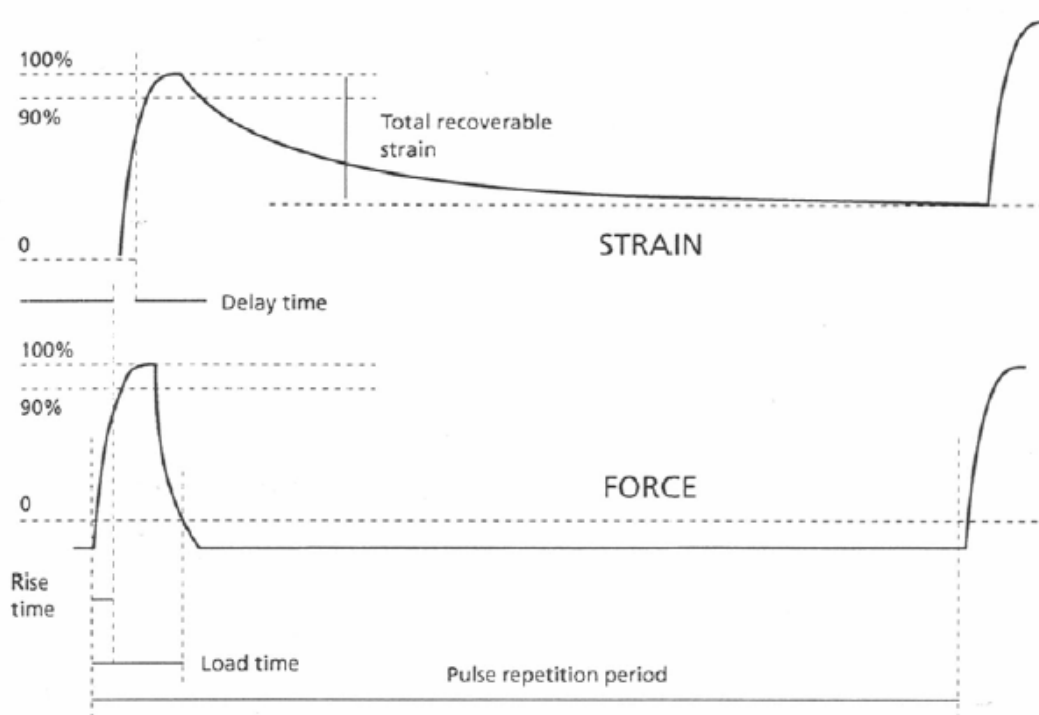
7. การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

พริสา (2546) การทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile) เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำ ๆ กับก้อนตัวอย่างทดสอบเพื่อให้น้ำหนักที่กระทำนั้นเป็นลักษณะรูปคลื่น Harversine หรือคลื่นแบบรูปร่างอื่น ๆ น้ำหนักที่กระทำในแนวดิ่ง ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่งของก้อนตัวอย่างจะทำให้ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวในแนวราบ และขณะช่วงเวลาหยุดพักการให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างจะมีการคืนตัวกลับ เรียกว่าค่าการคืนตัว (Resilient Strain) เมื่อให้น้ำหนักกระทำซ้ำอีกตามจำนวนครั้งที่กำหนดจนกระทั่งค่าการตัวมีค่าค่อนข้างคงที่ด้วยการกำหนดค่า Poisson's Ratio โดยประมาณของก้อนทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตจะทำให้ได้ค่าโมดูลัสการคืนตัว

การทดสอบโมดูลัสคืนตัวตามโครงการ Pavement Technology Project จะใช้เครื่องมือ Universal Testing Machine (UTM-5P) ที่มีการควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การทดสอบจะกระทำที่ความถี่ 1 Hz (1 รอบ/วินาที) ช่วงเวลาการในการกดน้ำหนักคือ 0.1 วินาที (Load Time) และช่วงเวลาหยุดการกดน้ำหนัก 0.9 วินาที (Pulse Repetition Period) และการทดสอบจะกระทำการทดสอบที่ 4 ค่าอุณหภูมิ คือ 15°C, 25°C, 35°C และ 45°C โดยเริ่มจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่าไปหาอุณหภูมิที่สูงกว่าแต่ละค่าอุณหภูมิจะใช้ค่าน้ำหนักที่กระทำแตกต่างกัน ตามภาพที่ ซึ่งเป็ค่าที่ได้จากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมโดยวิธี Indirect Tensile ตามมาตรฐาน

ASSHTO T283 ใช้อัตราการให้แรงเท่ากับ 0.8333 มิลลิเมตร/วินาที หรือ 2 นิ้ว/นาาที ทดสอบที่ อุณหภูมิ 25°C ค่า Poisson's Ratio ที่ใช้โดยประมาณของโครงการทดสอบนี้จะใช้ 0.35

สำหรับอุณหภูมิ 15°C และ 25°C และ 0.40 สำหรับอุณหภูมิการทดสอบ 35°C และ 45°C จำนวนครั้งของการให้น้ำหนักกระทำ 150 ครั้ง ซึ่งจัดว่าเพียงพอสำหรับการวัดค่าโมดูลัสคืนตัว และผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสคืนตัว 5 ค่าสุดท้าย (ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง, 2545)



ภาพที่ 7 กราฟช่วงระยะการให้น้ำหนักของการทดสอบโมดูลัสคืนตัว

ที่มา: AARG. (1999)

ค่าโมดูลัสคืนตัวและค่าการคืนตัว สามารถคำนวณได้จากค่าความสัมพันธ์ของสมการต่อไปนี (Austroads Pavement Reference Group[APRG], 1999)

$$E = \frac{P(V + 0.27)}{h_c \times H}$$

$$\epsilon = \frac{H}{D}$$

เมื่อ

- E = ค่าโมดูลัสกึ่งคืนตัวโดยประมาณ (MPa)
- P = น้ำหนักกระทำสูงสุด (N)
- V = ค่า Poisson's Ratio โดยประมาณ เว้นแต่จะมีค่าที่แน่นอน
- h_c = ความสูงของก้อนตัวอย่างโดยเฉลี่ย (mm)
- H = ระยะการกึ่งคืนตัวในแนวนอนทั้งหมด (mm)
- D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของก้อนตัวอย่าง (mm)
- ϵ = ค่าการกึ่งคืนตัว (Resilient Strain)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุ

1.1 โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (Polymer Modified Asphalt เรียกย่อว่า PMA) มีข้อกำหนดดังตารางที่ 1

1.2 มวลรวม (Aggregate) ใช้ 2 ชนิด มีอัตราส่วนขนาดกะของมวลรวมเป็นไปตามตารางที่ 2 และตารางที่ 6 ดังนี้

1.2.1 หินปูน (Limestone)

1.2.2 มวลรวมตะกรันเตาหลอม (Slag Aggregate)

2. อุปกรณ์ทดสอบคุณภาพมวลรวม

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมวลรวมหยาบ

2.1.1 อุปกรณ์ทดสอบความสึกหรอ (Abrasion Test) หรือความแข็งแรง (Toughness) โดยเครื่อง Los Angeles Abrasion ทำการทดลองตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 202/2518 หรือ AASHTO T96-77 หรือ ASTM C 136-84A

2.1.2 อุปกรณ์ทดลองหาขนาดเม็ดของมวลรวมหยาบ (Gradation Test) ทำการทดลองตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 204/2516 หรือ AASHTO T 85 หรือ ASTM C136-84A

2.1.3 อุปกรณ์ทดลองหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำ (Specific Gravity) ทำการทดลองตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 207/2517 หรือ AASHTO T85-77 หรือ ASTM C127-84

2.1.4 อุปกรณ์การทดสอบความคงทน (Soundness Test) ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 213/2531 หรือ AASHTO T104-77 หรือ ASTM C88-83

2.1.5 อุปกรณ์การทดสอบหาดัชนีความแบน (Flakiness Index) ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 210/2518 หรือ BS 812-1967

2.1.6 อุปกรณ์การทดสอบหาค่าดัชนีความยาว (Elongation Index) ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 210/2518 หรือ BS 812-1967

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบมวลรวมละเอียด

2.2.1 อุปกรณ์การทดสอบหาขนาดเม็ดของมวลรวมละเอียดแบบล้าง (Washed Sieve Analysis) ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 205/2517 หรือ AASHTO T85-78 หรือ ASTM C136-84A

2.2.2. อุปกรณ์ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 209/2515 หรือ AASHTO 176-73 หรือ ASTM C 88-83

2.2.3 อุปกรณ์วิธีการทดสอบทรายสมมูล (Sand Equivalent) ทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่ ทล.-ท. 209/2515 หรือ AASHTO T176-73 หรือ ASTM D2419-74

3. อุปกรณ์ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาแชลล์

3.1 ภาชนะโลหะก้นเรียบ (Pan, metal, flat bottom) สำหรับให้ความร้อนกับมวลรวม

3.2 ภาชนะโลหะก้นมน (Pan, metal, round) สำหรับผสมมวลรวมกับแอสฟัลต์

3.3 เตาอบและแผ่นให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า (Oven and Hot Plate, electric) สำหรับให้ความร้อนแก่มวลรวม

3.4 เครื่องชั่งมี (Balance) 2 ชนิด สำหรับชั่งมวลรวมและแอสฟัลต์ ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 5 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม และสำหรับชั่งตัวอย่างที่บดทับแล้วได้น้ำหนักสูงสุด 2 กิโลกรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

3.5 อ่างต้มน้ำ (Boiling Water Bath) ที่ควบคุมอุณหภูมิสำหรับแช่ก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์ คอนกรีตที่บดทับแล้ว

3.6 เตาแก๊ส (Gas Stove) ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่แอสฟัลต์

3.7 ช้อนผสมหรือเกรียง (Mixing Spoon or Trowel) ใช้สำหรับผสมมวลรวมกับแอสฟัลต์

3.8 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

3.9 แท่นรองการบดทับ (Compaction Pedestal) ประกอบด้วยฐานไม้ขนาด 20*20*45 เซนติเมตร มีแผ่นโลหะขนาดประมาณ 30*30*2.5 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่บนฐานไม้

3.10 แบบบดทับ (Compaction Mold) ประกอบด้วย แผ่นรองโลหะ แบบหล่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว และมีความสูงประมาณ 3 นิ้ว และปลอกขยาย

3.11 ค้อนบดทับ (Marshall Hammer) ประกอบด้วยแผ่นโลหะกลมหนา 0.5 นิ้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.875 นิ้ว ติดกับก้านเหล็กซึ่งมีดุนน้ำหนัก 10 ปอนด์ สำหรับปล่อยน้ำหนัก ลงบนแผ่นเหล็กวงกลม โดยมีระยะตกกระทบของดุนน้ำหนักเท่ากับ 18 นิ้ว

3.12 ที่จับแบบ (Mold Holder)

3.13 เครื่องดันตัวอย่าง (Extruder Jack)

3.14 ถุงมือกันความร้อน (Gloves)

3.15 เครื่องมือทดสอบมาเชลล์ (Marshall Testing Machine) สำหรับทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) ซึ่งค่าเสถียรภาพคือค่าต้านทานกำลังสูงสุดของตัวอย่างมีหน่วยเป็นปอนด์

3.16 เครื่องวัดการไหล (Flow Meter) เพื่อหาค่าการไหลซึ่งค่าการไหลคือค่าการเคลื่อนตัวทั้งหมดหรือค่าความเครียดในหน่วยของ 1/100 นิ้ว ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่าง ไม่มีแรงและมีแรงสูงสุดในช่วงการทดสอบหาค่าเสถียรภาพ

4. อุปกรณ์บดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

อุปกรณ์บดทับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาเชลล์ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล. -ท. 604/2517 หรือ ASTM D 1559 หรือ AASHTO T 245

5. อุปกรณ์การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต

5.1 อุปกรณ์การทดลองดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ตามมาตรฐานการทดลอง Ontario Vacuum Immersion Marshall Test

5.2 อุปกรณ์การทดลอง Resilient Modulus วิธีการทดลอง Indirect Tensile Test ตามการทดลองของ Jame N. Anagnos and Thomas W. Kennedy

5.3 อุปกรณ์การทดลองการเกิดร่องล้อ (Rutting) วิธีการทดลอง (Wheel Tracking Test)

วิธีการ

1. วิธีการตรวจสอบมวลรวม

ในการตรวจสอบวัสดุมวลรวมนั้นแยกออกเป็นตรวจสอบวัสดุมวลรวมหยาบ และตรวจสอบวัสดุรวมละเอียด ซึ่งมีดังต่อไปนี้

1.1 วัสดุมวลรวมหยาบ

ต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมหยาบดังนี้

- ขนาดคละ (Gradation) ทำการทดสอบ ตามรายการทดลองที่ ทล. – ท. 204/2516 หรือ AASHTO T85 – 78 หรือ ASTM C136 – 84

- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบ ตามการลองตามที่ทล. –ท. 207/2517 หรือ AASHTO T85 – 77 หรือ ASTM C127 – 84

- ความคงทน (Soundness) ทำการทดสอบ ตามการลองตามที่ ทล. – ท. 213/2531 หรือ AASHTO T104– 77 หรือ ASTM C88 – 83

- ดัชนีความแบน (Flakiness Index) ทำการทดสอบ ตามการลองตามที่ ทล. – ท. 210/2518

- ดัชนีความยาว (Elongation Index) ทำการทดสอบ ตามการลองตามที่ ทล. – ท. 211/2518

- ความสึกหรอของมวลรวมหยาบ โดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ทำการทดสอบตามการลองตามที่ ทล. – 202/2518 หรือ AASHTO T96 - 77 หรือ ASTM C131-81

1.1.1 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ (Gradation) จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุโดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านมา หรือที่ค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = \frac{R}{T} \times 100$$

เมื่อ	P	=	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก
	R	=	มวลของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด
	T	=	มวลของตัวอย่างทั้งหมด

1.1.2 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุชนิดเม็ดหยาบ (Specific Gravity) (ขนาดโตกว่า 4.75 มม.) แบบส่วนใหญ่ (Bulk Specific) และแบบปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และ ปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ (Water Absorption) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Bulk Specific Gravity (Dry)} = \frac{W_D}{W_s - W_w}$$

$$\text{Bulk Specific Gravity (Sat)} = \frac{W_s}{W_s - W_w}$$

$$\text{Apparent Specific Gravity} = \frac{W_D}{W_D - W_w}$$

$$\text{Water Absorption} = \frac{W_D}{W_s - W_D}$$

เมื่อ	W_D	=	มวลของวัสดุอบแห้งในอากาศ, กรัม
	W_s	=	วัสดุของผิวแห้ง (Standard Surface), กรัม
	W_w	=	มวลของวัสดุในน้ำ

1.1.3 ค่าความคงทน (Soundness) โดยการหาความคงทนของมวลรวม วัสดุมวลรวมหยาบ โดยเพื่อหาความต้านทานต่อการแตก หรือการแยกของมวลรวมในสารละลายอิ่มตัวโซเดียมซัลเฟต หรือแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อที่จะได้ใช้ข้อมูลในการช่วยพิจารณา ค่าความคงทนของมวลรวม ที่ถูกกระทำโดยดินฟ้าอากาศ

1.1.4 ดัชนีความแบน (Flakiness Index, FI) เป็นการหามวลของวัสดุที่มีความหนาของด้านแบนที่น้อยกว่า 3/5 เท่าของขนาดเฉลี่ยของวัสดุนั้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุที่นำมาทดสอบ สำหรับข้อกำหนดของทางหลวง ค่าดัชนีความแบนต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งค่าดัชนีความแบนคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ดัชนีความแบน (Flakiness Index)} = \frac{X}{W} \times 100$$

เมื่อ X = น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ผ่าน
 W = น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ค้ำบนแต่ละ
 ตะแกรง

1.1.5 ดัชนีความยาว (Elongation Index, EI) เป็นการหามวลของวัสดุที่มีความยาวของส่วนยาว มากกว่า 1.8 เท่าของความหนาเฉลี่ยของวัสดุ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับมวลที่นำมาทำการทดสอบ ข้อกำหนดของกรมทางหลวง ค่าดัชนีความยาวต้องมีค่าไม่มากกว่าร้อยละ 30 ซึ่งค่าดัชนีความยาวคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ดัชนีความยาว (Elongation Index)} = \frac{Y}{W} \times 100$$

เมื่อ Y = น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ค้ำบน Length Gauge
 W = น้ำหนักรวมเป็นกรัมของตัวอย่างทุกขนาดที่ค้ำบนแต่ละ
 ตะแกรงก่อนนำไปผ่าน Length Gauge (ค่าของ EI ควรปัดเป็นเลขจำนวนเต็ม)

1.1.6 ความสึกกร่อนของมวลรวมหยาบโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นการทดสอบหาค่าการสึกหรอของมวลรวมหยาบ ว่ามีความต้านทานต่อการขัดสีและการกระแทกของเครื่องจักรบดอัดความแน่นดีหรือไม่ โดยกรมทางหลวงยอมให้ค่าการสึกหรอของวัสดุมวลรวมชั้นผิวทางไม่เกินร้อยละ 40 ในการคำนวณค่าการสึกหรอสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ
 B = น้ำหนักตัวอย่างทุกขนาดที่ค้างตะแกรงเบอร์ 12

1.2 วัสดุมวลรวมละเอียด

ต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติของมวลรวมละเอียดดังนี้

- ขนาดคละ (Gradation) ทำการทดสอบ ตามรายการทดลองที่ ทล. – ท. 205/2517 หรือ AASHTO T85 – 78 หรือ ASTM C136 – 84A

- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ทำการทดสอบ ตามการลองตามที่ทล. – ท.209/2517 หรือ AASHTO T84 – 77 หรือ ASTM C128 – 84

- ความคงทน (Soundness) ทำการทดสอบ ตามการลองตามที่ ทล. – ท. 213/2531 หรือ AASHTO T104– 77 หรือ ASTM C88 – 83

- ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) ทำการทดสอบ ตามการลองตามที่ ทล. – ท.203/2515 หรือ AASHTO T176– 73 หรือ ASTM D2419 – 74

1.2.1 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด (Gradation) จะทำการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง แล้วเปรียบเทียบมวลของตัวอย่างที่ผ่านมา หรือที่ค้างตะแกรงขนาดต่าง ๆ กับมวลรวมทั้งหมดของตัวอย่าง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง } P = \frac{R}{T} \times 100$$

เมื่อ	P	=	โดยน้ำหนัก
	R	=	มวลรวมของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด
	T	=	มวลของตัวอย่างทั้งหมด

1.2.2 ความถ่วงจำเพาะและปริมาณน้ำที่ซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุ การทดสอบจะต้องทำการแยกวัดมวลรวมละเอียดนี้ออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 200 กับส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วทำการคำนวณจากสมการดังนี้

ความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่ (Bulk Specific Gravity)

$$G_B (30^{\circ}\text{C}) = \frac{W_D d_t}{0.9957(W_s + W_2 + W_1)}$$

เมื่อ	GB	=	ความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่
	W_D	=	น้ำหนักของตัวอย่างแห้ง (Weight of Dry Sample), กรัม
	W_s	=	น้ำหนักของตัวอย่างขึ้น (Weight of Saturated Surface Sample), กรัม
	W_2	=	น้ำหนักภาชนะ (Pycnometer) + น้ำ; กรัม
	W_1	=	น้ำหนักภาชนะ (Pycnometer) + น้ำ; ตัวอย่าง; กรัม
	dt	=	ความหนาแน่นของน้ำขณะทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิ $t^{\circ}\text{C}$

ความถ่วงจำเพาะที่ปรากฏ (Apparent Specific Gravity)

$$G_B (30^{\circ}\text{C}) = \frac{W_D d_t}{0.9957(W_D + W_2 + W_1)}$$

สำหรับวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 นั้น สามารถจะหาค่าความถ่วงจำเพาะแบบส่วนใหญ่ได้ เพราะไม่สามารถทำให้ผิวนอกของมวลรวมแห้ง โดยที่ยังมีความชื้นอยู่ภายในได้ (เนื่องจากมวลรวมนั้นมีความเป็นพลาสติกมาก)

1.2.3 ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent, SE) วิธีการนี้เป็นการทดลองเพื่อหาสัดส่วนระหว่างฝุ่นหรือวัสดุประเภทดินเหนียว กับวัสดุเม็ดหยาบจำพวกกรวดหรือทรายที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ซึ่งได้กำหนดค่าต่ำสุดของทรายที่ใช้ ต้องมีค่าต้องไม่น้อยกว่า 50% โดยหาได้จากสมการ

$$\text{ค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent, SE)} = \frac{\text{Sand reading}}{\text{Clay reading}} \times 100$$

2. การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามวิธีมาร์แชลล์

คุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาผสมแล้ว ยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมวัสดุที่ใช้ด้วย ดังนั้นการออกแบบเพื่อหาอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

2.1 การเลือกวัสดุ ในขั้นแรก จะต้องศึกษาถึงรายละเอียดของแบบก่อสร้างและข้อกำหนดอย่างละเอียด รวมทั้งปริมาณการจราจร ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฯลฯ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลสำหรับพิจารณาว่า ควรใช้วัสดุชนิดใด จากแหล่งใด โดยคำนึงถึงความสะดวก ประหยัด กำลังการผลิต ความมั่นคงแข็งแรงของวัสดุนั้นๆ เมื่อนำมาใช้งาน

2.2 วัสดุแอสฟัลต์ ในขั้นตอนนี้จะต้องศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ว่ามีคุณสมบัติถูกต้องตามข้อกำหนดหรือไม่ และเหมาะสมที่จะใช้กับสายทางนั้น ๆ หรือไม่ มากน้อยเพียงใด

2.3 วัสดุมวลรวม เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุมวลรวมแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนวณหาอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมทั้งหมดเพื่อให้ได้ขนาดกะทัดรัดที่เหมาะสม ทดลองผสมเพื่อทำก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 101.6 มม.(นิ้ว) สูง 63.5 ± 1.3 มม. (2.5 ± 0.05 นิ้ว) ตามวิธี ASTM D1559 โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์ผสมอย่างน้อย 5 ค่า โดยเพิ่มหรือลดครั้งละ 0.5% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม โดยในแต่ละปริมาณแอสฟัลต์ให้ทำตัวอย่างไม่น้อยกว่า 3 ก้อน

3. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสม

วัสดุผสมได้จากการผสมร่อนระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์ เมื่อทำการบดอัดตามวิธีของ มาร์แชลล์ (บดอัดด้วยก้อนมาตรฐาน 50 ครั้งต่อด้านของก้อนตัวอย่าง) โดยอุณหภูมิขณะทำการบดอัดอยู่ระหว่าง $170 - 175^{\circ}\text{C}$ และ $150 - 155^{\circ}\text{C}$ สำหรับโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์

3.1 ทดสอบหาค่าความหนาแน่น (Density) ตามวิธี ASTM D2726 (ค่าที่ผิดปกติไม่นำมาคำนวณด้วย)

3.2 ทดสอบหาค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) ตามวิธี ASTM D1559 แล้วหาค่าเฉลี่ย (ค่าที่ผิดปกติไม่นำมาคำนวณด้วย)

3.3 ทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index, SI) วิธีการทดสอบ Ontario Vacuum Immersion Marshall Test เป็นการทดสอบวิธีหนึ่งที่เริ่มทำการทดสอบในประเทศแคนาดา เพื่อศึกษาหาค่าความต้านทานการหลุดร่อน (Stripping Resistance) ของมวลรวมผสมร่อน โดยการใช้ค่าเฉลี่ยของการทดสอบค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์ จากก้อนตัวอย่างที่แช่ในน้ำเกลือ (0.5% Salt Solution) เทียบกับค่าเฉลี่ยของค่าเสถียรภาพของมาร์แชลล์จากก้อนตัวอย่างที่ไม่ได้แช่ในน้ำเกลือ (Unsoaked) โดยค่านี้จะเทียบออกมาเป็น เปอร์เซนต์ค่าดัชนีความแข็งแรงของมวลรวมผสมร่อน ที่จะนำไปปูลาด ถ้าค่าดัชนีความแข็งแรงมีค่าต่ำ จะชี้ให้เห็นว่าผิวทางนั้นหลุดร่อนได้ง่าย สำหรับกรมทางหลวงได้กำหนดค่าดัชนีความแข็งแรงไว้ว่าจะไม่ต่ำกว่า 70% ค่าดัชนีความแข็งแรงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$SI = \frac{\text{Soaked Sample}}{\text{Unsoaked Sample}} \times 100$$

เมื่อ SI = ค่าดัชนีความแข็งแรง

Soaked Sample และ Unsoaked Sample คือ ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบหาเสถียรภาพของก้อนตัวอย่าง

3.4 นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่าง ๆ กับอัตราส่วนผสมของวัสดุเชื่อมประสาน

3.5 ทดสอบหาการเกิดร่องล้อ (Rutting) ตามวิธีการทดลอง (Wheel Tracking Test)

3.6 ทดสอบหาโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) โดยวิธีแรงดึงโดยอ้อม (Indirect Tensile Test)

4. การคำนวณหาค่าปริมาตรและองค์ประกอบของส่วนต่าง ๆ ของแอสฟัลต์

ในการคำนวณส่วนต่าง ๆ ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต ไม่ว่าจะเป็นการคำนวณหาน้ำหนักของส่วนประกอบ หรือปริมาตรของส่วนประกอบก็ตาม จะคิดอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการนำค่าต่าง ๆ ไปใช้ในงานสนาม

4.1 การคำนวณหาความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (GAG)

$$G_{AG} = \frac{100}{\sum_{n=1}^4 \frac{P_n}{G_n} + \frac{P_f}{G_f}}$$

เมื่อ	PF	=	ปริมาณวัสดุอัดแทรกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวมทั้งหมด
	P _n	=	ปริมาณวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของวัสดุทั้งหมด
	G _f	=	ความถ่วงจำเพาะของวัสดุอัดแทรก
	G _n	=	ความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมจาก Hot Bin n

4.2 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไป เนื่องจากดูดซึมของมวลรวม (Asphalt Lost by Absorption Asphalt, Ab)

เปอร์เซ็นต์ของแอสฟัลต์ที่หายไป เนื่องจากการดูดซึมของมวลรวม (Ab)

$$Ab = \frac{100 \times G_v - G_{AG} \times G_{AC}}{G_v \times G_{AG}}$$

เมื่อ G_{AC} = ความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์

$$G_v = \text{Virtual Specific Gravity} = \frac{100 - b}{\frac{100}{G_m} - \frac{b}{G_{AC}}}$$

G_m = Theoretical Maximum Specific Gravity
= ปริมาณแอสฟัลต์เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักทั้งหมดของ
ส่วนผสม

4.3 การคำนวณหาความถ่วงจำเพาะที่มากที่สุดตามหลักวิชาการ (Theoretical Maximum Specific Gravity, G_m) ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณได้จากการทดสอบตามวิธีของ ASTM D2041 และคำนวณตามสมการ

ความถ่วงจำเพาะที่มากที่สุดตามหลักวิชาการ

$$G_m = \frac{D}{A + D - E}$$

เมื่อ D = น้ำหนักของตัวอย่างในอากาศ

A = น้ำหนักของ Flask ในน้ำ

E = น้ำหนักของ Flask + น้ำหนักตัวอย่างในน้ำหลังจากดูด
ฟองอากาศส่วนเกินออกไปแล้ว

4.4 คำนวณหาปริมาณแอสฟัลต์ส่วนที่เหลือจากถูกลมรวมดูดซึมไปแล้ว เป็นเปอร์เซ็นต์ (Effective Asphalt) โดยนำหนักของส่วนผสม

$$E_{AC} = \frac{b - Ab(100 - b)}{100}$$

4.5 การคำนวณหาความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง (Bulk Density)

$$DE = \frac{AC_a}{AC_s - AC_w}$$

เมื่อ DE = ความหนาแน่นทั้งหมดของก้อนตัวอย่าง
 AC_a = น้ำหนักตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศ
 AC_s = น้ำหนักตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในอากาศ เมื่อมีความชื้น (สภาพ Saturated Surface Dry)
 AC_w = น้ำหนักตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ชั่งในน้ำ

4.6 การคำนวณหาปริมาตรของแอสฟัลต์ทั้งหมดในก้อนตัวอย่าง โดยไม่รวมปริมาณของแอสฟัลต์ที่ถูกมวลรวมดูดซึมเข้าไปในรูปของเปอร์เซ็นต์

$$V_{AC} = \frac{E_{AC} \times D_E}{G_{AC}}$$

4.7 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของมวลรวมทั้งหมดในก้อนตัวอย่าง

$$V_{AG} = \frac{(100 - b)}{G_{AG}} \times D_E$$

4.8 การคำนวณหาช่องว่างในวัสดุรวมรวม (Voids in the Mineral Aggregate; VMA) โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์

$$VMA = 100 - VAG$$

4.9 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ช่องว่างในอากาศ (Air voids) ในก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

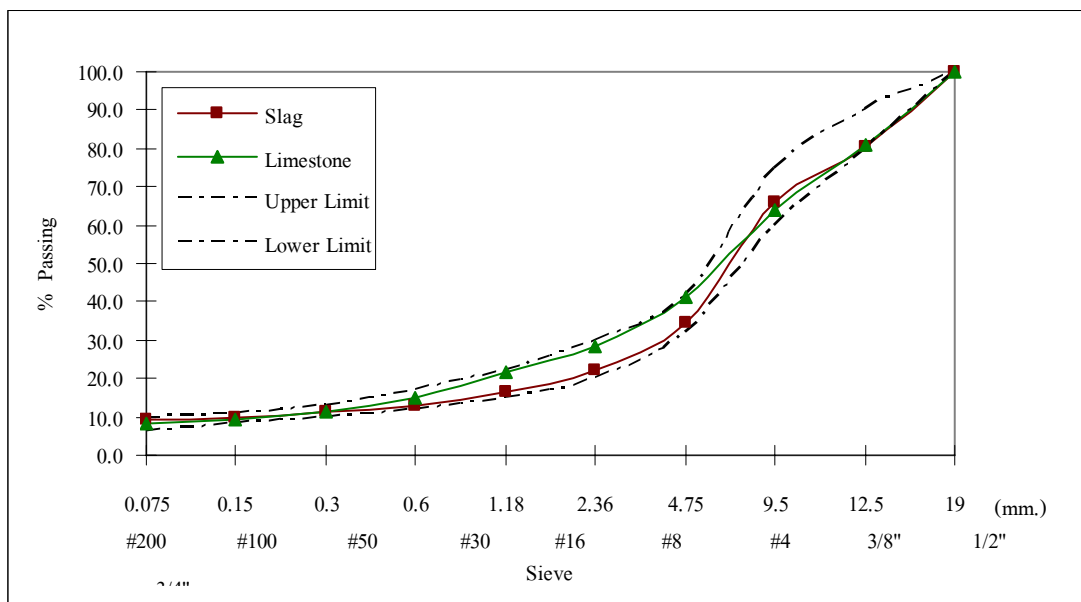
$$AV = VMA - VAC$$

4.10 การคำนวณหาสัดส่วนระหว่างปริมาตรของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ ต่อช่องว่างของมวลรวมหินที่บดอัด ในรูปของเปอร์เซ็นต์ (Voids Filled With Bitumen; VFB) ในก้อนของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

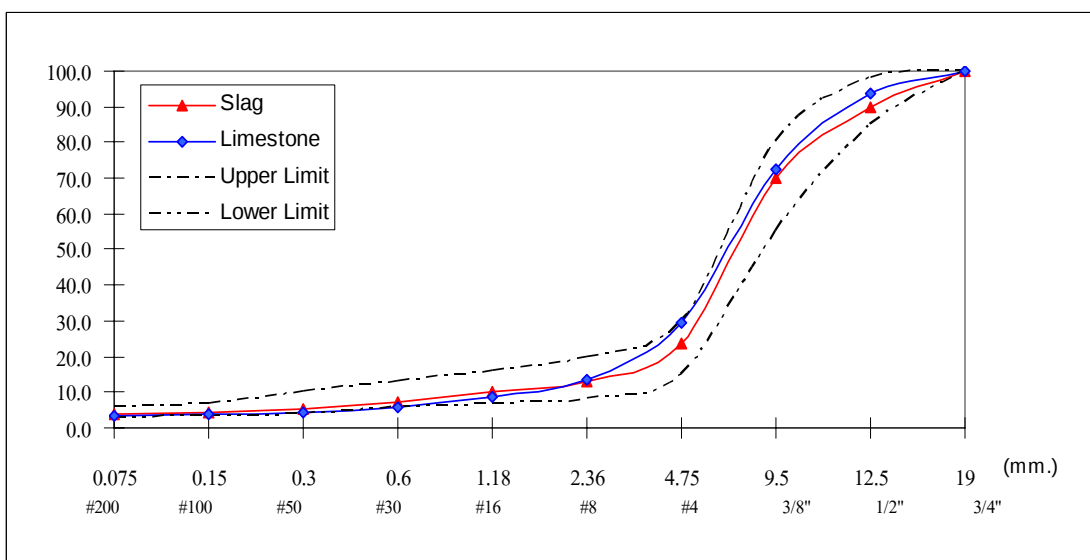
$$VFB = \frac{100 \times V_{AC}}{VMA}$$

ผลและวิจารณ์

1. ผลการตรวจสอบคุณภาพวัสดุผสมรวม



ภาพที่ 8 แผนภูมิการเรียงขนาดคละของพอร์ตแลนด์ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูนและตะกั่วเตาหลอม



ภาพที่ 9 แผนภูมิการเรียงขนาดคละของสโตนมาสดิกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูน ตะกั่วเตาหลอม

1.1 การตรวจสอบคุณภาพวัสดุรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม พบว่าคุณสมบัติของวัสดุรวมผ่านตามเกณฑ์ข้อกำหนด และเรียงขนาดรวมได้อัตราส่วนผสมการเรียงตัวของมวลผละ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนดขนาดผละของ Porous Asphalt และ Stone Mastic Asphalt ดังภาพที่ 8 และ 9

1.2 การออกแบบส่วนผสมร้อนพอร์สแอสฟัลต์และสโตนมาสติกแอสฟัลต์ ตามวิธีมาแชลล์ เมื่อนำวัสดุรวมหินปูนและวัสดุรวมตะกรันเตาหลอมแต่ละชนิดคือหินปูน และตะกรันเตาหลอม ตามสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น ทำการออกแบบส่วนผสม Porous Asphalt ให้ได้อัตราส่วนของมวลผละที่ทำให้ส่วนผสมมีช่องว่างอากาศมากกว่า 20 % และสโตนมาสติกแอสฟัลต์ให้ได้อัตราส่วนของมวลผละที่ทำให้ส่วนผสมมีช่องว่างอากาศ 3.5% โดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน PMA จะได้ค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม โดยผลที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมของวัสดุรวมหินปูนทั้ง 2 แหล่ง นำมาหาค่าเฉลี่ย และวัสดุรวมตะกรันเตาหลอม ผลออกแบบแสดงไว้ดังในตารางที่ 8 และ 9

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุรวมทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับกันระหว่างวัสดุแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง %AC ที่สัมพันธ์กับค่า Stability และ Flow

ตารางที่ 8 คุณสมบัติของพอร์สแอสฟัลต์ของมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม

		Mixture		
		Limestone	Slag	Desired
Design Asphalt Content	By Weight of Agg.	5.0	5.0	4 - 6
Marshall Density	gm./ml	1.997	2.373	-
Marshall Stability	lbs.	1465	2123	-
Marshall Flows	0.01 in	14	14	-
Marshall Stability/Marshall Flows	lbs./0.01 in.	104.6	151.6	-
Air Voids	%	20.3	20.6	Min. 20 Percent
Void Fill with Asphalt	%	30.4	32.7	-
Void in Mineral Aggregate	%	29.1	30.6	-
Cantabro Abrasion Test				
- Dry Sample Abrasion Loss	%	5.2	4.3	Max. 40 Percent
- Soaked Sample Abrasion Loss	%	15.7	13.6	Max. 20 Percent

ตารางที่ 9 คุณสมบัติของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ของมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม

		Mixture		
		Limestone	Slag	Desired
Design Asphalt Content	By Weight of Agg.	6.0	6.0	> 6
Marshall Density	gm./ml	2.412	2.832	-
Marshall Stability	lbs.	2706	4161	> 1200
Marshall Flows	0.01 in	15	15	8 - 16
Marshall Stability/Marshall Flows	lbs./0.01 in.	180.4	227.4	-
Air				
Voids	%	3.5	3.5	3 - 4
Void Fill with Asphalt	%	78.6	80.4	-
Void in Mineral Aggregate	%	16.3	17.9	> 6
Strength Index	%	87.4	90.7	> 75
Cellulose Fibers	By Weight of Agg.	0.33	0.33	0.3 - 1.5

ตารางที่ 10 ผลการออกแบบส่วนผสมอัสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและวัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม

No.	% AC by Weight of Agg.	Density	Air Voids	VMA %	VFB %	Stability (Lbs.)	Flow (1/100")	Remark
1	4.0	1.971	22.3	29.3	23.9	1270	12	
2	4.5	1.982	21.4	29.3	27.2	1417	13	
3	5.0	1.997	20.3	29.1	30.4	1465	14	LimeStone
4	5.5	2.006	19.3	29.1	33.7	1543	15	
5	6.0	2.008	18.65	29.4	36.5	1561	16	
1	4.0	2.344	23.1	30.8	25.0	1949	12	
2	4.5	2.362	21.7	30.6	29.1	2044	13	
3	5.0	2.373	20.6	30.6	32.7	2123	14	Slag
4	5.5	2.381	19.6	30.7	36.2	2163	15	
5	6.0	2.383	18.9	31.0	39.0	2184	16	

ตารางที่ 11 ผลการออกแบบส่วนผสมสโตนมาستيكแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและวัสดุ
มวลรวมตะกรันเตาหลอม

No.	% AC by Weight of Agg.	Density	Air Voids	VMA %	VFB %	Stability (Lbs.)	Flow (1/100")	Remark
1	5.0	2.393	5.6	16.2	65.6	2373	13	
2	5.5	2.404	4.5	16.2	72.5	2526	14	
3	6.0	2.412	3.5	16.3	78.6	2706	15	LimeStone
4	6.5	2.419	2.6	16.4	84.4	2624	16	
5	7.0	2.417	2.0	16.9	88.5	2461	17	
1	5.0	2.810	6.0	17.8	66.3	3860	13	
2	5.5	2.821	4.8	17.9	73.2	4078	14	
3	6.0	2.832	3.5	17.9	80.4	4161	15	Slag
4	6.5	2.839	2.4	18.1	86.7	4111	16	
5	7.0	2.830	2.0	18.8	89.4	3987	17	

1.2.1 Stability Porous Asphalt และ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวม
หินปูนและวัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมที่มีขนาดละเอียดตามข้อกำหนดเดียวกัน เมื่อใช้วัสดุ
เชื่อมประสาน PMA จะให้ค่า Stability ที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุมวลรวม ดังนี้

1) Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุ
มวลรวมหินปูน พบว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมจะให้ค่า Stability ที่สูง
กว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน คิดเป็น 44.9 %

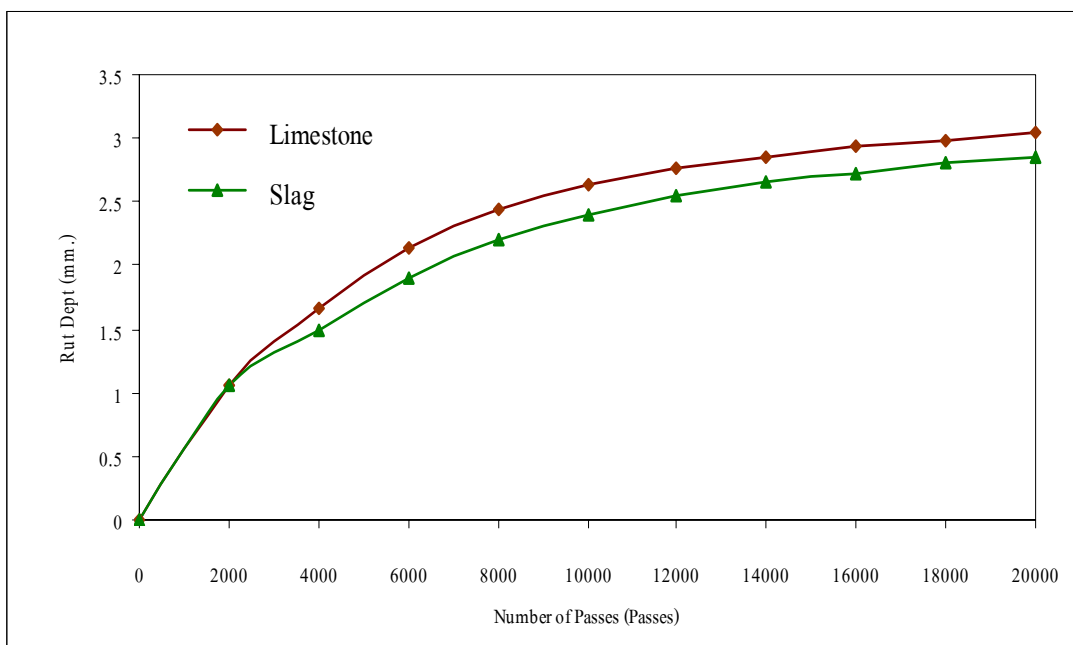
2) Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมเมื่อเปรียบเทียบกับ
วัสดุมวลรวมหินปูน พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมจะให้ค่า
Stability ที่สูงกว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน คิดเป็น 53.7%

1.2.2 Flow Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม พบว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอมและวัสดุรวมหินปูน จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 14.5 และ 14.1 ตามลำดับ และ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอมและวัสดุรวมหินปูน จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันคือ 15.4 และ 15.0 ตามลำดับ

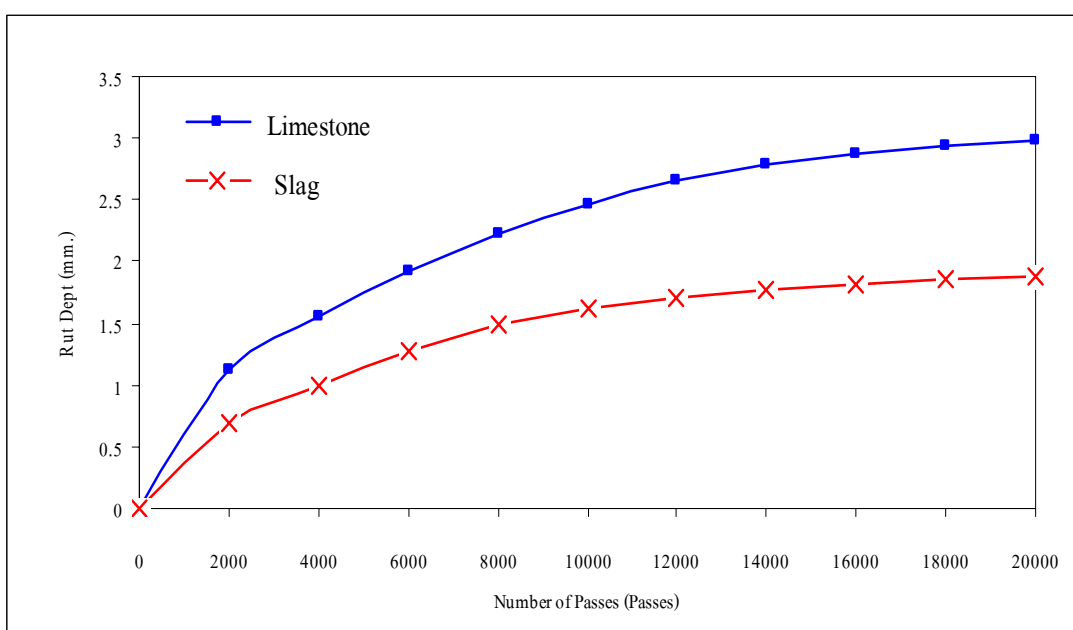
2. การทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting)

จากการทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting) ของ Stone Mastic Asphalt และ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม โดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 60°C มาทำการบดทับด้วยลูกกลิ้ง ให้ได้ค่าความหนาแน่นตามคุณสมบัติ ขนาด 407 x 137 x 10 มิลลิเมตร ซึ่งแผ่นแอสฟัลต์คอนกรีตนี้จะนำมาจำลองเสมือนสภาพการใช้งานจริงเหมือนที่ทำการบดอัดได้จากสนามโดยใช้แอสฟัลต์จำลองสภาพของผิวทางส่วนผสมร้อน Stone Mastic Asphalt และ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม ใช้วัสดุเชื่อมประสาน PMA จำนวน อย่างละ 3 ตัวอย่าง ตามการออกแบบ Stone Mastic Asphalt และ Porous Asphalt

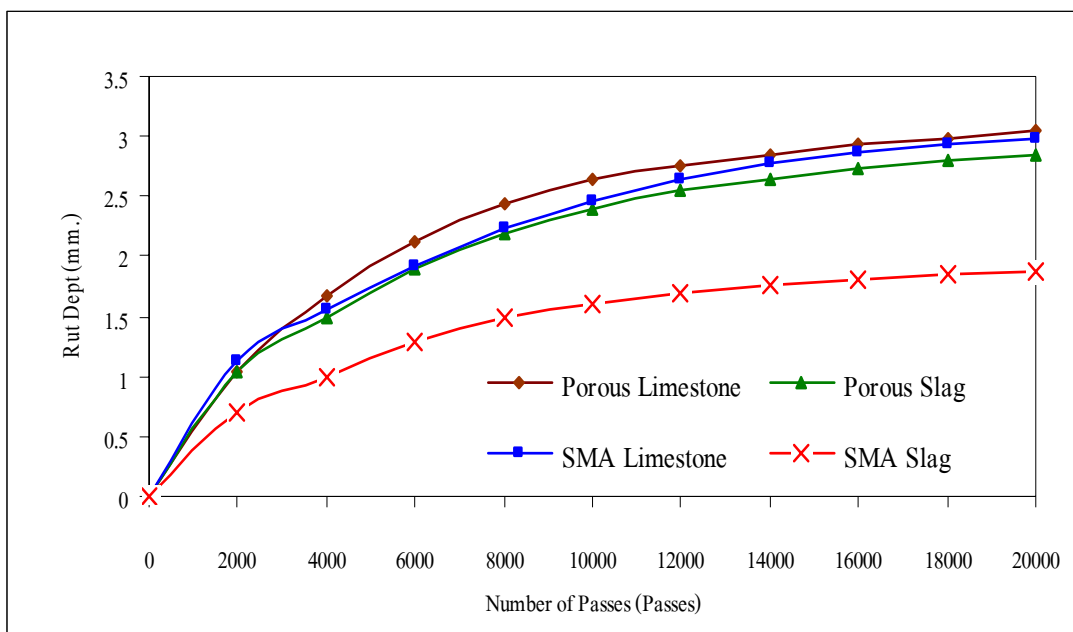
ผลการทดสอบของการเกิดร่องล้อ (Rutting) ของ Porous Asphalt และ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม โดยใช้ PMA เป็นวัสดุเชื่อมประสาน พบว่าเมื่อใช้วัสดุรวมหินปูน จะมีแนวโน้มที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ เมื่อใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอมดังแสดงในตารางที่ 12



ภาพที่ 10 แผนภูมิการเปรียบเทียบค่า Rut Depth ของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม



ภาพที่ 11 แผนภูมิการเปรียบเทียบค่า Rut Depth ของสโตนมาสดิกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม



ภาพที่ 12 แผนภูมิการเปรียบเทียบค่า Rut Depth ของสโตนมาสต์แอสฟัลต์กับพอร์ัสแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและ ตะกรันเตาหลอม

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบ Wheel Tracking Test ของพอร์ัสแอสฟัลต์และสโตนมาสต์แอสฟัลต์ โดยใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและมวลรวมตะกรันเตาหลอม

Type of Aggregate		Porous Asphalt		SMA	
		Limestone	Slag	Limestone	Slag
Air Voids	%	20.3	20.6	20.3	3.5
Number of Passes	N	20000	20000	20000	20000
Rut Depth	mm.	3.07	2.85	2.97	1.88

2.1 ผลการทดสอบการกีดร่องล้อ (Rutting) ของ Porous Asphalt และ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม

2.1.2 การเกิดร่องล้อ

1) Porous Asphalt เมื่อใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูนที่วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูน ค่าการเกิดร่องล้อ(Rutting) มีแนวโน้มที่สูงกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอมอยู่ประมาณ 7.72 %

2) Stone Mastic Asphalt เมื่อใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูนที่วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูน ค่าการเกิดร่องล้อ (Rutting) มีแนวโน้มที่สูงกว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอมอยู่ประมาณ 57.9 %

2.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบการเกิดร่องล้อ (Rutting) ของ Porous Asphalt และ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม

2.2.1 การเกิดร่องล้อ

1) Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูน เมื่อใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม จะมีแนวโน้มการเกิดร่องล้อที่ต่ำกว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูน อยู่ระหว่าง 36.7-42.9 %

2) Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูน เมื่อใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม จะมีแนวโน้มการเกิดร่องล้อที่ต่ำกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมหินปูน อยู่ระหว่าง 17.9-38.8 %

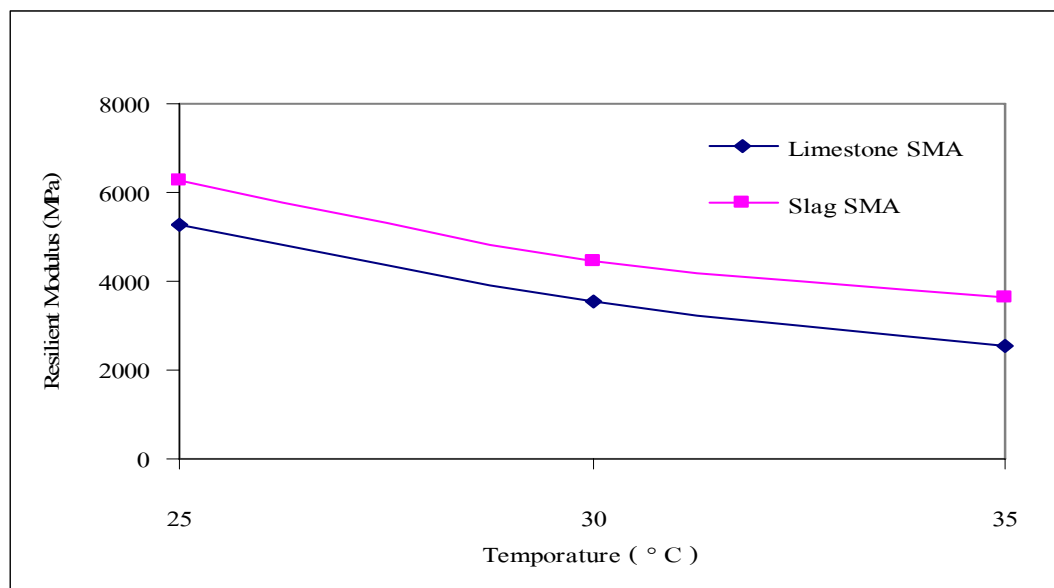
3) Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม เมื่อใช้วัสดุเชื่อมประสานชนิด PMA ที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม จะมีแนวโน้มการเกิดร่องล้อที่ต่ำกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุผสมรวมตะกรันเตาหลอม อยู่ระหว่าง 34.0-43.9 %

3. การทดสอบค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus)

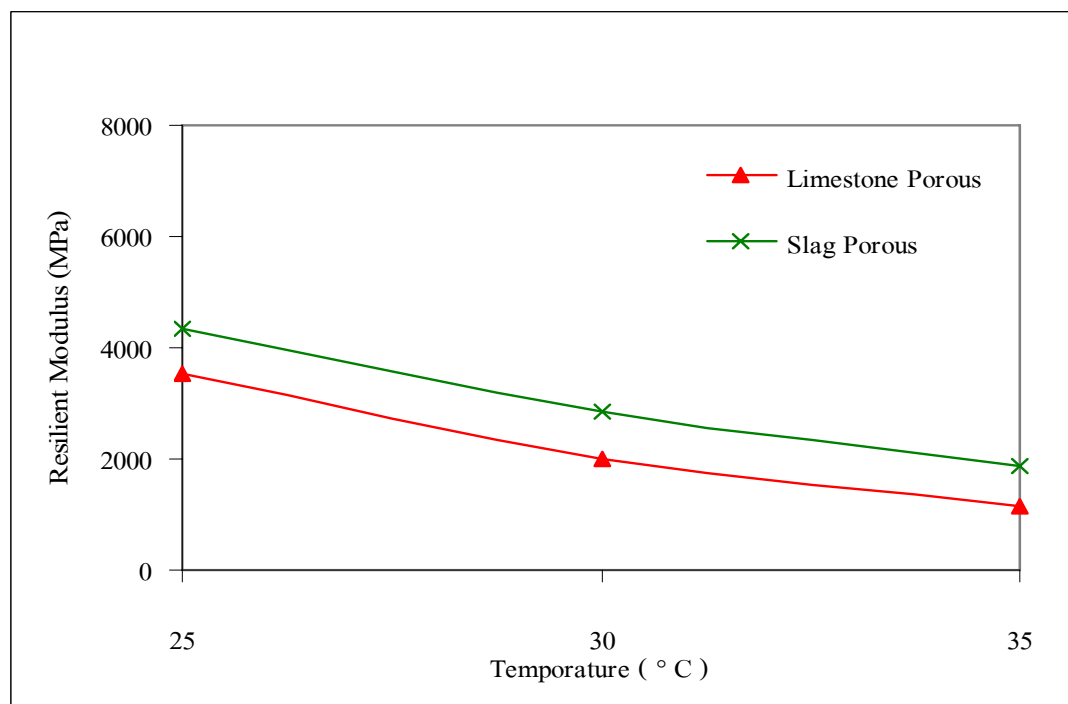
จากการทดสอบค่าโมดูลัสการคืนตัวของ Stone Mastic Asphalt และ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม โดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 25°C , 30°C และ 35°C ที่ระดับน้ำหนัทดสอบต่าง ๆ กัน การวัดค่าโมดูลัสทำการทดสอบน้ำหนัที่จําแนกค่าการคืนตัวมีค่าที่คงที่ จึงใช้เป็นค่าโมดูลัสการคืนตัวที่ต้องการทราบค่าผลทดสอบ

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัวของสโตนมาสติกแอสฟัลต์และพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม

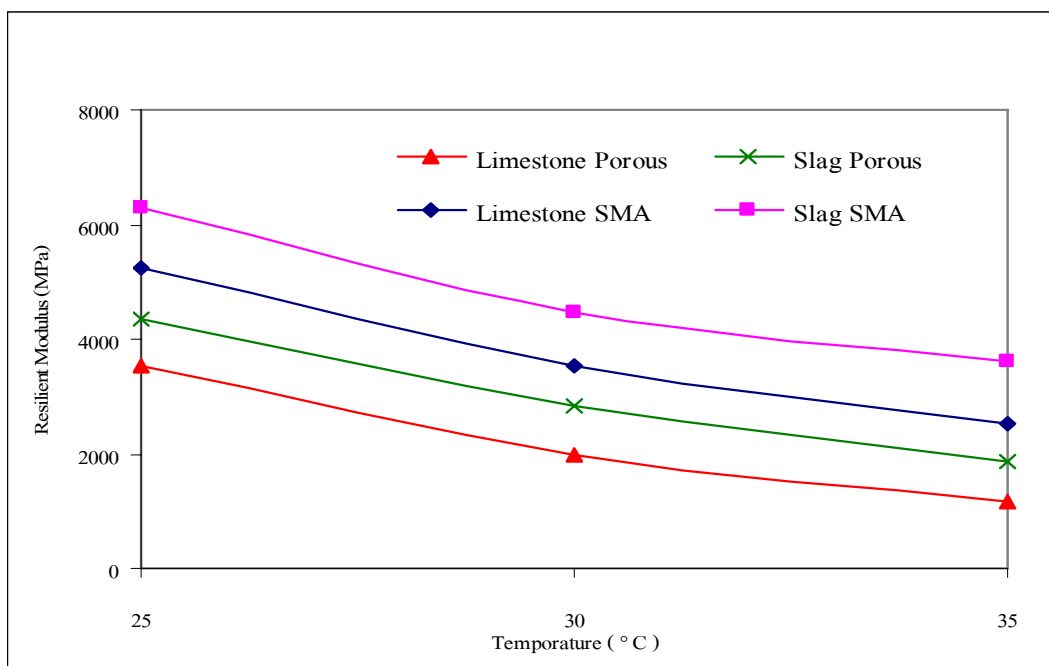
Type of Binder	Type of Aggregate	25 °C		30 °C		35 °C	
		Resilient Modulus (Mpa)	Resilient Strain (Micro Strain)	Resilient Modulus (Mpa)	Resilient Strain (Micro Strain)	Resilient Modulus (Mpa)	Resilient Strain (Micro Strain)
Stone Mastic Asphalt	Limestone	5251	11.66	3547	13.31	2526	15.76
	Slag	6292	8.82	4462	10.54	3620	12.38
Porous Asphalt	Limestone	3550	11.93	1987	14.04	1169	16.33
	Slag	4357	9.22	2849	11.36	1869	13.37



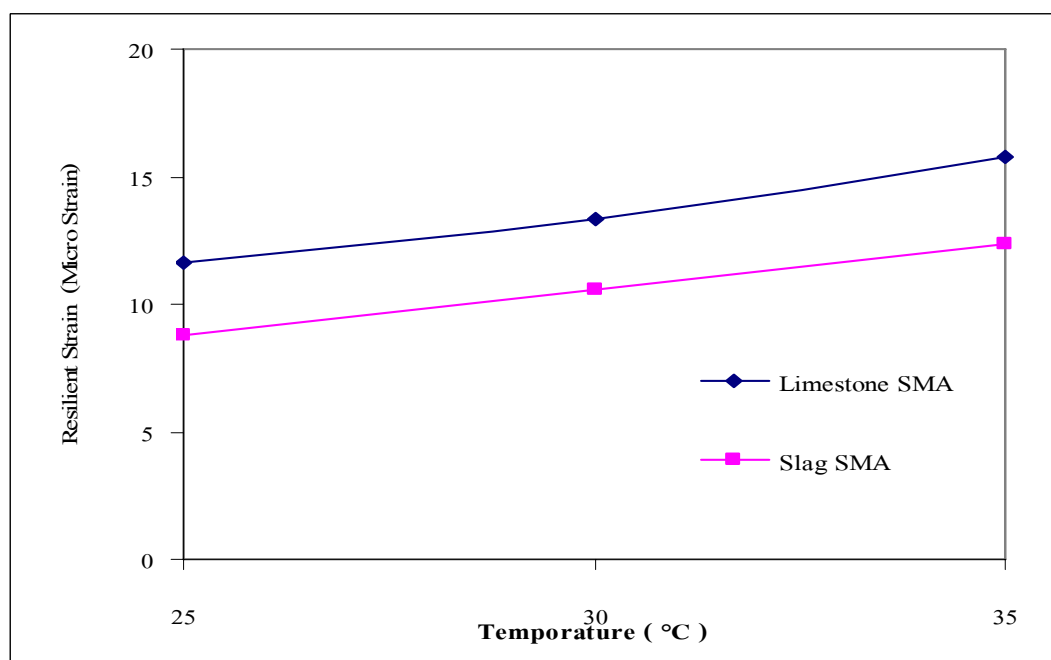
ภาพที่ 13 กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Modulus ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



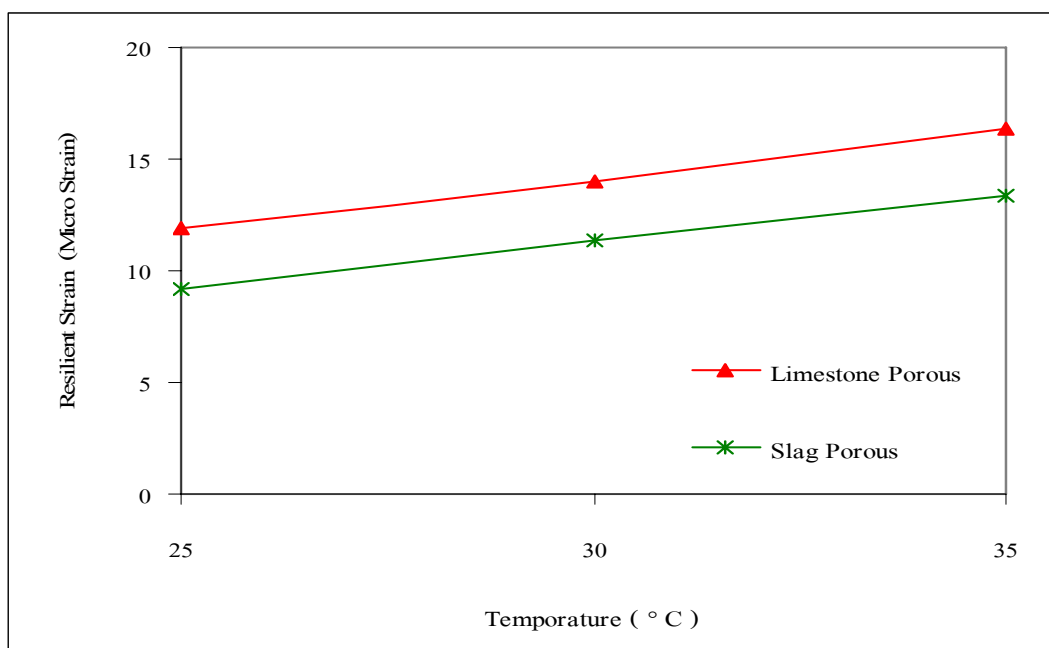
ภาพที่ 14 กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Modulus ของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



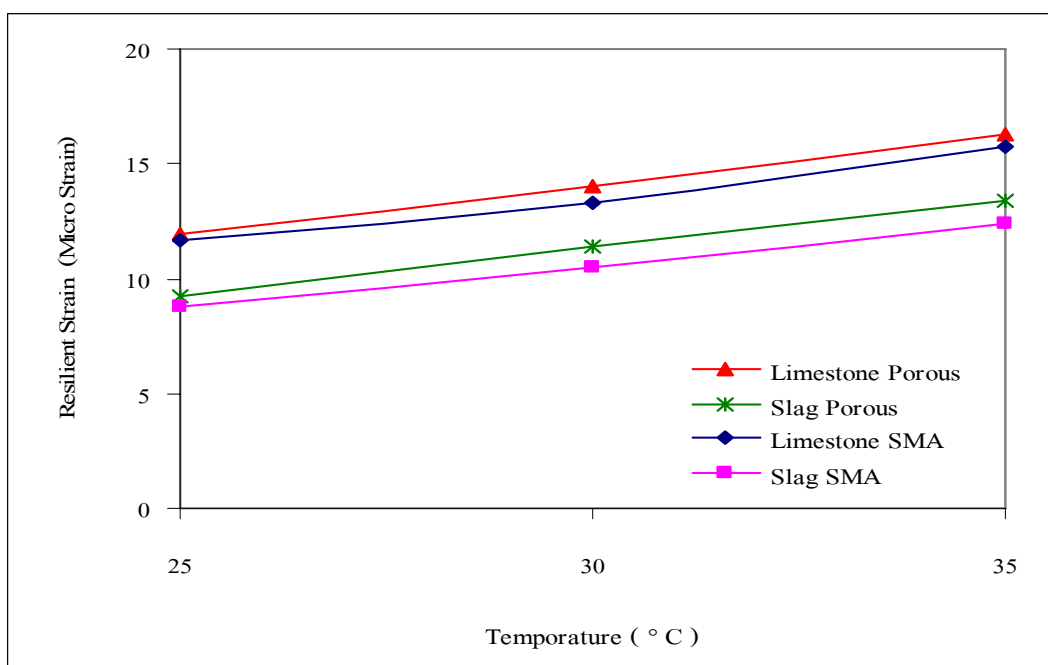
ภาพที่ 15 กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของสโตนมาสดิกแอสฟัลต์และพอร์ส
แอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 16 กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของสโตนมาสดิกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวม
หินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 17 กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



ภาพที่ 18 กราฟเปรียบเทียบค่า Resilient Strain ของสโตนมาสติกแอสฟัลต์และพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

3.1 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัว ของ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน และตะกรันเตาหลอม

3.1.1 ค่าโมดูลัสการคืนตัว

1) SMA เมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนที่วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 25 °C, 30 °C และ 35 °C พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จะให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวที่มีแนวโน้มที่สูงกว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนอยู่ประมาณ 19.83, 25.80 และ 43.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.1.2 ค่าการคืนตัว

1) SMA เมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนที่วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 25 °C, 30 °C และ 35 °C พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จะให้ค่าการคืนตัวมีแนวโน้มที่ต่ำกว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนอยู่ประมาณ 24.36, 20.81 และ 21.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.2 ผลการทดสอบโมดูลัสการคืนตัว ของ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม

3.2.1 ค่าโมดูลัสการคืนตัว

1) Porous Asphalt เมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนที่วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 25 °C, 30 °C และ 35 °C พบว่าเมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จะให้ค่าโมดูลัสการคืนตัวมีแนวโน้มที่สูงกว่าวัสดุมวลรวมหินปูนอยู่ประมาณ 22.73, 43.38 และ 59.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.2.2 ค่าการคืนตัว

1) Porous Asphalt เมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนที่วัสดุเชื่อมประสาน PMA ที่อุณหภูมิ 25 °C, 30 °C และ 35 °C พบว่าเมื่อใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมจะให้ค่า การคืนตัวมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าใช้วัสดุมวลรวมหินปูนอยู่ประมาณ 22.72, 19.10 และ 22.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.3 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสการคืนตัวและค่าการคืนตัวของ Stone Mastic Asphalt และ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม

3.3.1 ค่าโมดูลัสการคืนตัว

1) SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบ SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน ที่ทุกอุณหภูมิการทดลอง พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จะมีโมดูลัสค่าการคืนตัวที่สูงกว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน อยู่ระหว่าง 19.8-43.3 %

2) SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม ที่ทุกอุณหภูมิการทดลอง พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จะมีค่าโมดูลัสการคืนตัวที่สูงกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม อยู่ระหว่าง 43.7-93.7 %

3) SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนที่ทุกอุณหภูมิการทดลอง พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนจะมีค่าโมดูลัสการคืนตัวที่สูงกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน อยู่ระหว่าง 77.2-209.7 %

3.3.2 ค่าการคืนตัว

1) SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน ที่ทุกอุณหภูมิการทดลอง พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จะมีแนวโน้มค่าการคืนตัวที่ต่ำกว่า SMA ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน อยู่ระหว่าง 21.4-24.4 %

2) SMA ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม ที่ทุกอุณหภูมิการทดลอง พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม จะมีแนวโน้มค่าการคืนตัวที่ต่ำกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม อยู่ระหว่าง 4.3-7.4 %

3) SMA ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม เปรียบเทียบกับ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมหินปูน ที่ทุกอุณหภูมิการทดลอง พบว่า SMA ที่ใช้วัสดุรวมตะกรันเตาหลอม จะมีแนวโน้มค่าการคืนตัวที่ต่ำกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุรวมหินปูนอยู่ระหว่าง 24.2-26.1 %

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาคูณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของสโตนแมสติกแอสฟัลต์กับพอร์สแอสฟัลต์ โดยทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Porous Asphalt และ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมทั้ง 2 ชนิด คือมวลรวมหินปูนและมวลรวมตะกรันเตาหลอม สรุปได้ดังนี้

1. ค่าเสถียรภาพ (Stability) พบว่าค่าของ Stone Mastic Asphalt และ Porous Asphalt เมื่อนำไปใช้ทำผิวทาง พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จะให้ค่าเสถียรภาพที่สูงกว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้มวลรวมหินปูน Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม และ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน ซึ่งให้ค่าเสถียรภาพที่ต่ำที่สุด
2. ค่าการไหล (Flow) ของ Stone Mastic Asphalt และ Porous Asphalt ที่มีขนาดคละและสัดส่วนตามข้อกำหนด เมื่อใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและตะกรันเตาหลอม ผลการทดสอบพบว่าค่าการไหล มีค่าที่ใกล้เคียงกัน
3. ค่าการเกิดร่องล้อ (Rutting) พบว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน จะมีค่าการเกิดร่องล้อที่สูงกว่า Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนและ Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม ซึ่ง Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมจะมีค่าการเกิดร่องล้อที่ต่ำที่สุด
4. ค่าโมดูลัสการคืนตัว (Resilient Modulus) พบว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอมจะมีค่าโมดูลัสการคืนตัวที่สูงกว่า Stone Mastic Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม และ Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนซึ่ง Porous Asphalt ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูนจะมีค่าโมดูลัสการคืนตัวที่ต่ำที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ควรหาข้อกำหนด SMA สำหรับประเทศไทยที่สามารถใช้มวลคละของ Dense Grade ได้ จะเป็นการสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดขนาดมวลคละของโรงโม่และต่อผู้ที่ต้องการใช้งาน
2. การจัดเตรียมตัวอย่างเพื่อหาค่า Resilient Modulus ต้องมีความสม่ำเสมอในการเตรียมตัวอย่าง
3. ควรมีการทดลองในหัวข้อนี้ใน Superpave เพื่อเป็นการเปรียบเทียบวิธีเตรียมตัวอย่าง ทดลองบดอัดส่วนผสมด้วย Gyrotory Compactor กับ Marshall Method
4. ควรทดลองในคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านอื่นเพิ่มขึ้น Skidding Resistance และ Polish Stone Value (PSV)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- โกสินทร์ เจตยานนท์. 2545. การเปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์กับมัลติเกรดแอสฟัลต์ใน
แอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2541. คู่มือทดสอบหิน ทราฟและคอนกรีต. บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุ,
กรุงเทพฯ.
- ณรงค์ กุหลาบ. 2529. แอสฟัลต์เทคโนโลยี. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น,
ขอนแก่น.
- นิรชร นกแก้ว. 2539. การศึกษาการใช้เถ้าหนักในต้นแทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประยูร เตชะจินดา. 2527. การใช้เม็ดดินเผาเป็นวัสดุมวลรวมในงานผิวทางเซอร์เฟสทรีตเมนต์.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีชา ไกรศิริเดช. 2521. การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของเม็ดดินผสมทรายเผา หินปูนเผา
แก้ว ตะกรันเตาถลุง และตะกรันเตาหลอม เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุผิวทาง. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะ ปิยศิริติกุล. 2521. การศึกษาถึงเสถียรภาพของวัสดุผสมทรายกับยางมะตอยโดยวิธีของ
มาร์แชล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พาริสา จันนุ้ย. 2546. อิทธิพลของวัสดุเชื่อมประสานในสโตนมาสติกแอสฟัลต์. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วัชรินทร์ วิทย์กุล. 2544. การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน. วิธีมาร์แชลล์.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วัชรินทร์ วิทยกุล. 2528. แอสฟัลต์เทคโนโลยีและการปฏิบัติงานก่อสร้าง เล่มที่1.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2529. คู่มือปฏิบัติการวัสดุแอสฟัลต์และแอสฟัลต์ติกคอนกรีต. คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2537. วัสดุการทาง. ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.

ศรัญญา เดชะพรหมพันธ์. 2544. การศึกษาการนำตะกรันเตาหลอมมาทดแทนวัสดุมวลรวมของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมพงษ์ ชีไธสง. 2542. การศึกษาปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมเพิ่มในแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด Pen 60/70 และใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมักร สุนทอง. 2535. โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ จรีเวรุไวโรจน์. 2537. การนำความร้อนทิ้งของเตาผิวโปล่ากลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง. 2543ก. มาตรฐานวิธีการทดลอง. กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

_____. 2543ข. มาตรฐานการทดลอง. กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

สำนักงานวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง. 2542. การสัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2542. บทความทางวิชาการ สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

สิทธิศักดิ์ อัสวพรหมธาดา และ สมักร สันทอง. 2545. **ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนโดยใช้ตะกรันเหล็กเป็นวัสดุมวลรวม**. บทความทางวิชาการ ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางกรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

_____. ม.ป.ป. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแอสฟัลต์คอนกรีตและตัวอย่างการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต**. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

เอนก เปียลัดดา. 2530. **เสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ 60/70 และ 80/100**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

American Association of State Highway and Transportation Officials. 1978. **Standard Specification for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing**. Part II. The American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C., U.S.A.

American Society for Testing and Material. 1986. **Annual Book of ASTM Standard**. Vol.o4.03. American Society for Testing and Materials, Easton, Maryland, U.S.A.

Hosking, R. 1992. **Road Aggregate and Skidding**. HMSO, London..

Hunter, R.N. 1995. **Bituminous Mixtures in road Construction**. Thomas Telford Services Ltd., New York.

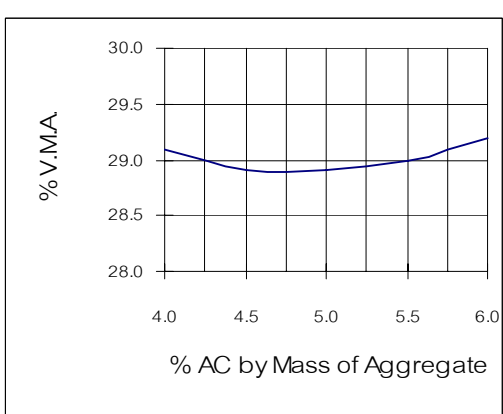
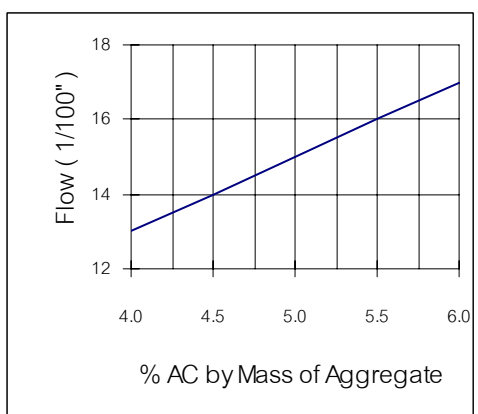
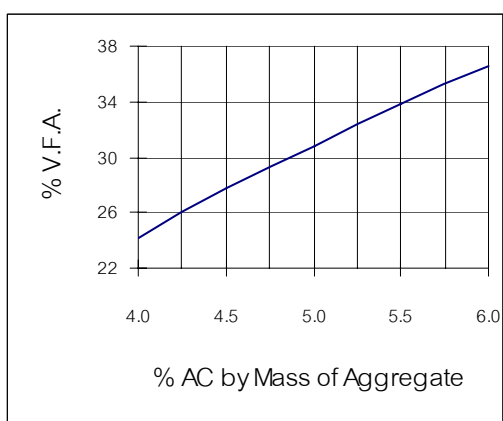
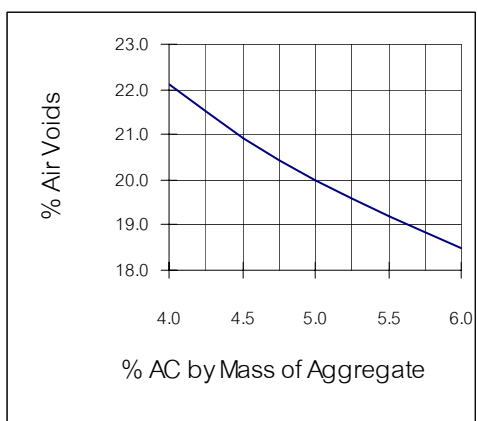
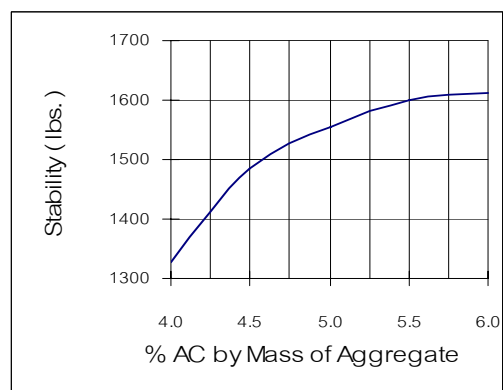
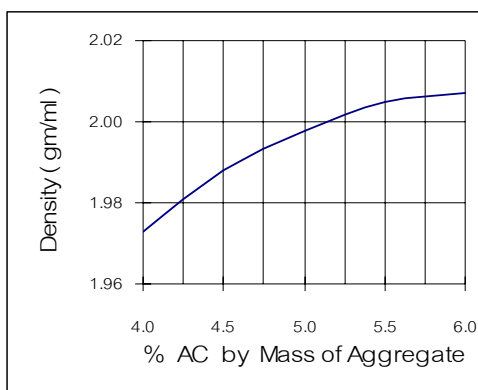
Khatri, M.A., D.F. Martinez., F.M. Bayomy, and W.T. Tang. 1993. **Performance Evaluation of Asphalt Mixtures with Gasifier Slah as Fine Aggregate**. in Waller, H.F. Used of Waste Materials in Hot-Mix Asphalt. ASTM., Philadellpia.

Meininger, R.C. 1992. **Effects of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance**. ASTM., Philadelphia.

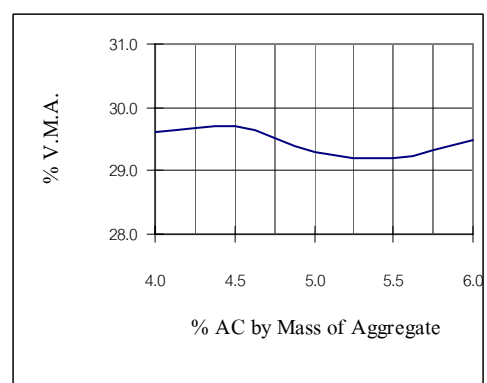
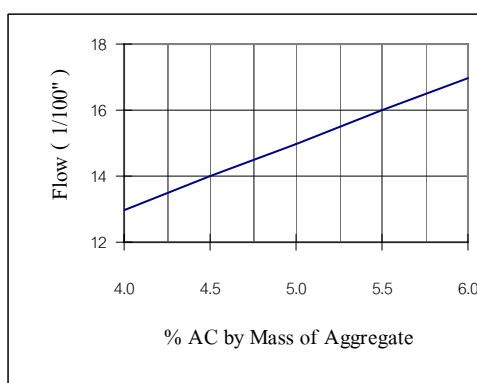
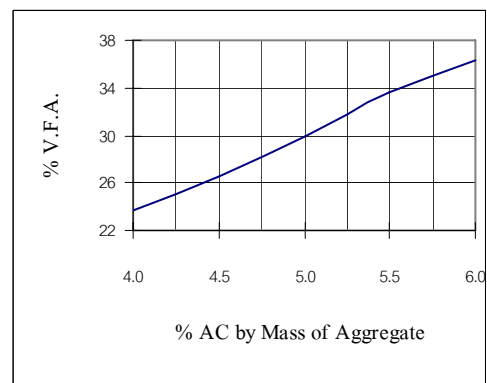
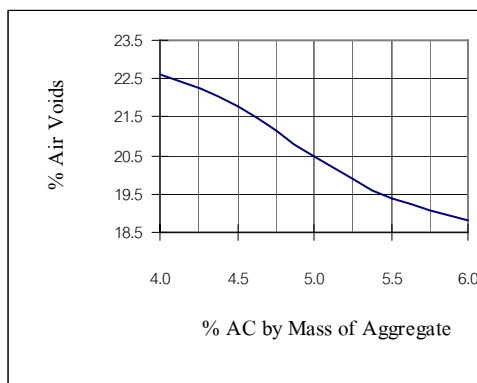
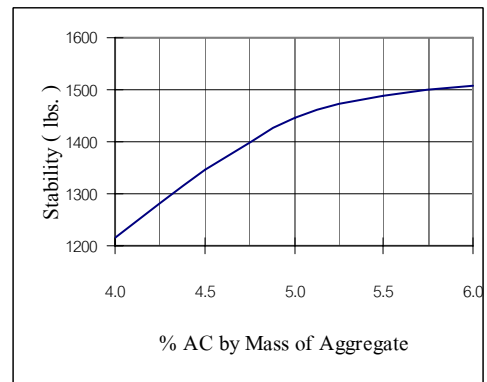
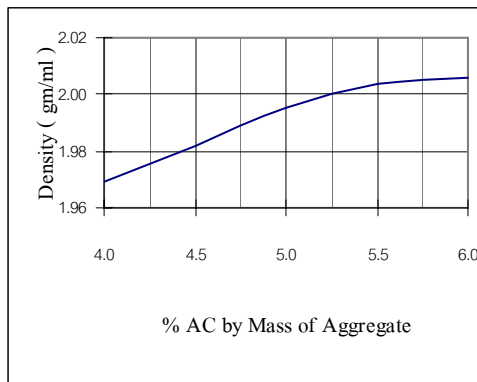
Stapler, W.T., J.S. Stone, and H.D.Chose. 1970. **A Skid Resistance Study of Georgia Pavements.** Department Research GHD Research Project No.6201., Georgia.

Willam, A. and P.E. Snylvies. 1972. **Use of Material Filler to Improve Poor Aggregate for Plantmix Pavement.** Idaho Department of Highways. Boise, Idaho.

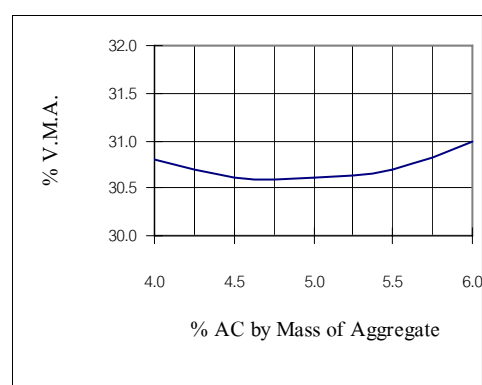
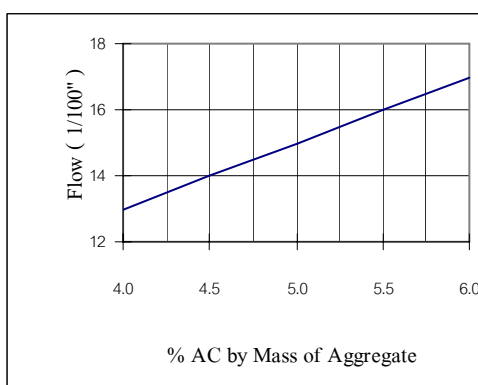
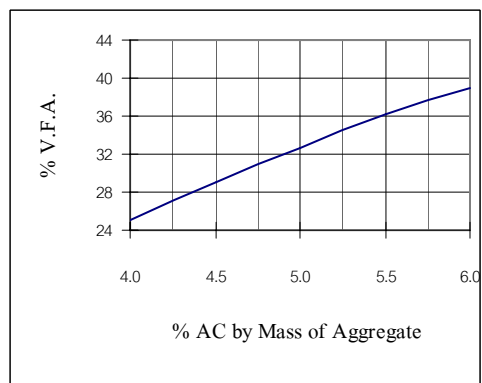
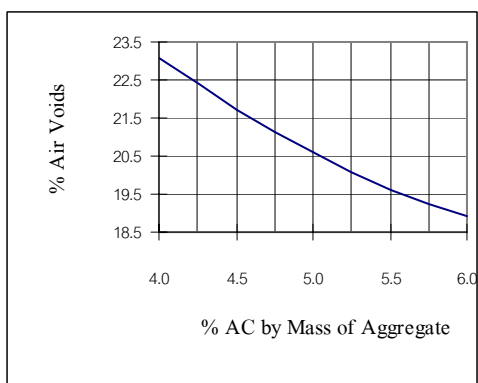
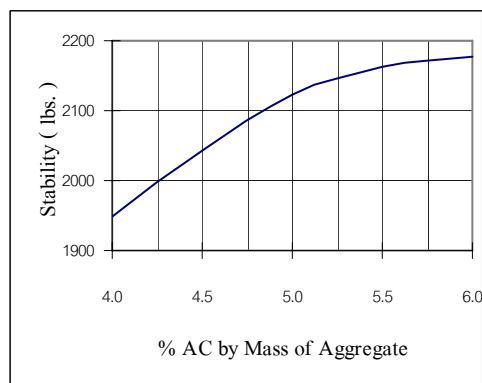
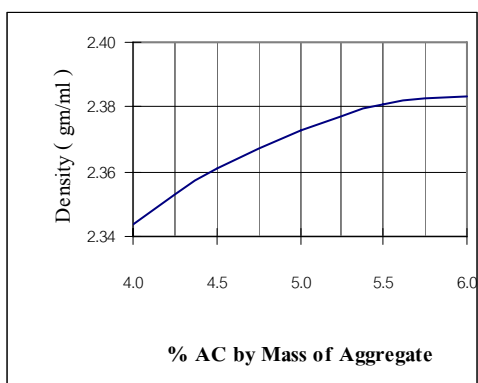
ภาคผนวก



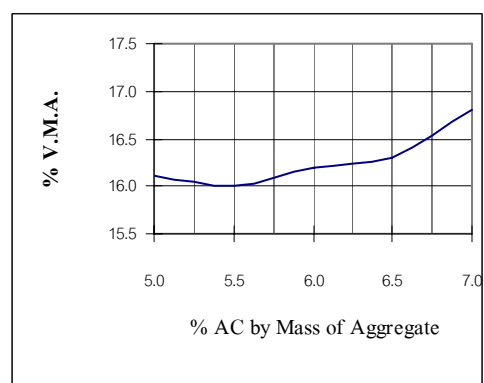
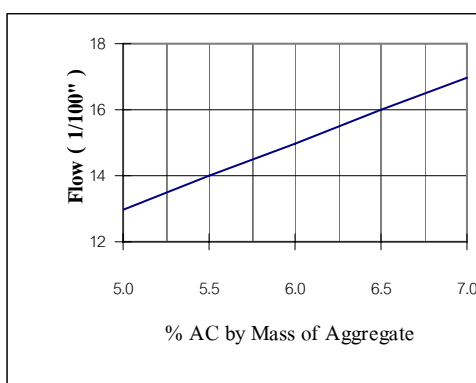
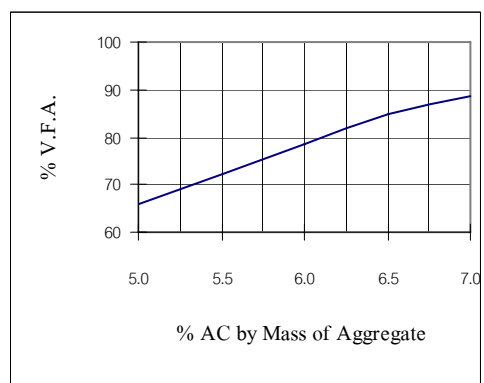
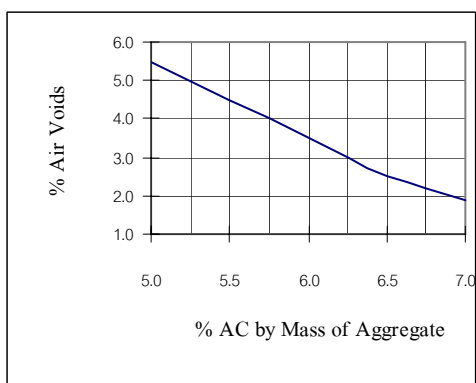
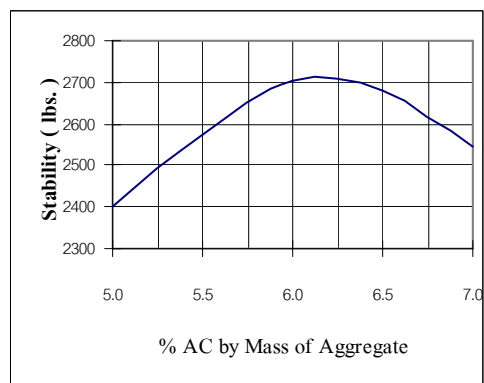
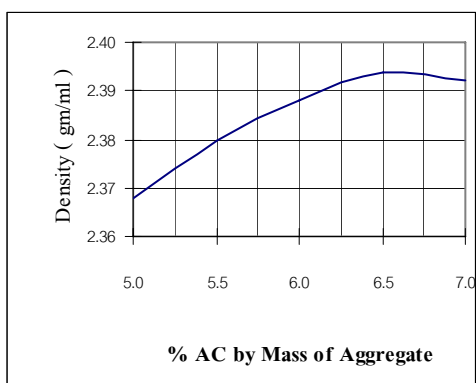
ภาพผนวกที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุ
มวลรวมหินปูน 1 จ.สระบุรี



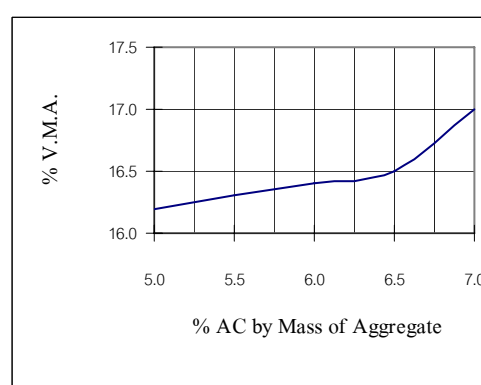
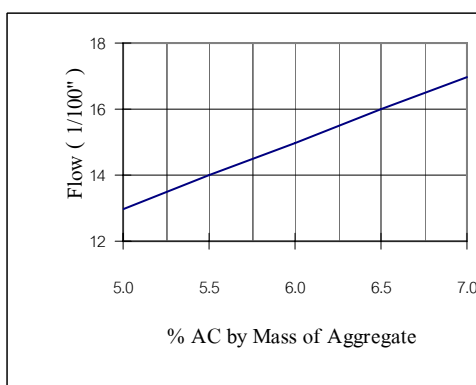
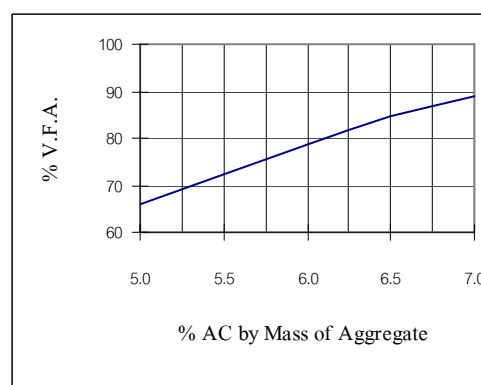
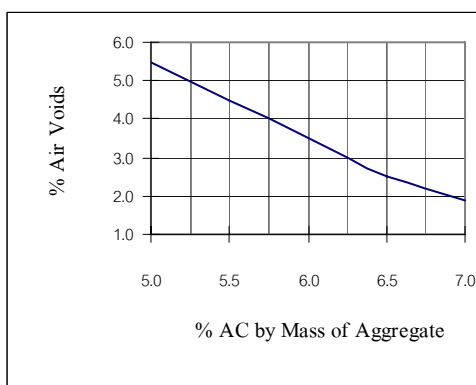
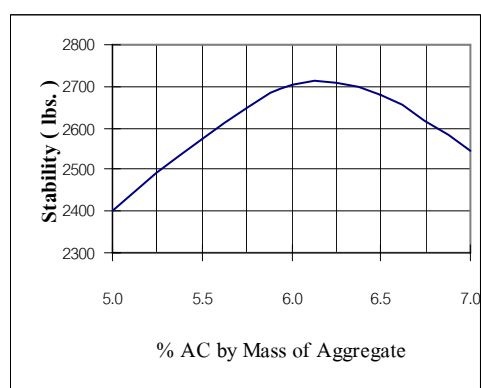
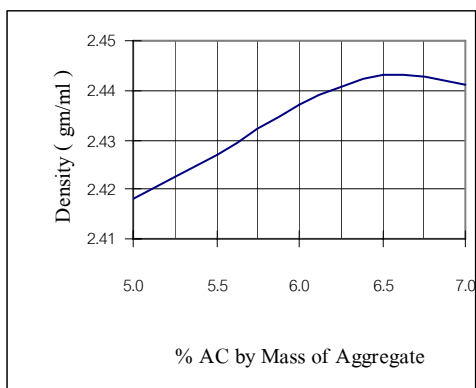
ภาพผนวกที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุ
มวลรวมหินปูน 2 จ.นครสวรรค์



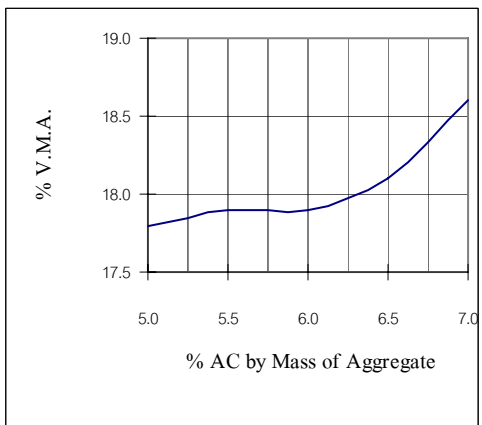
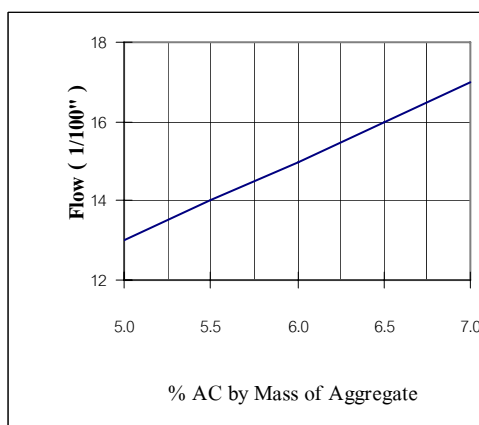
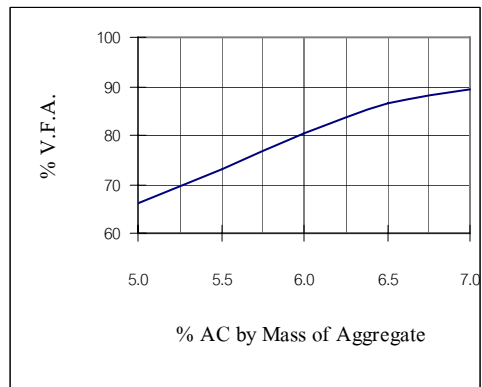
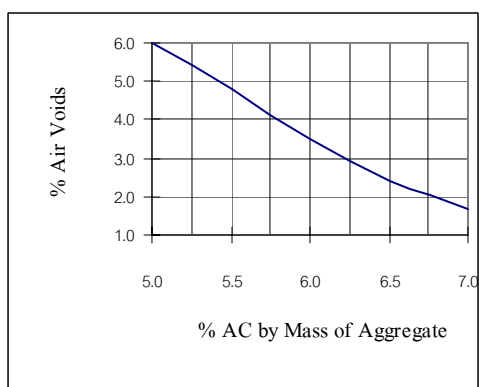
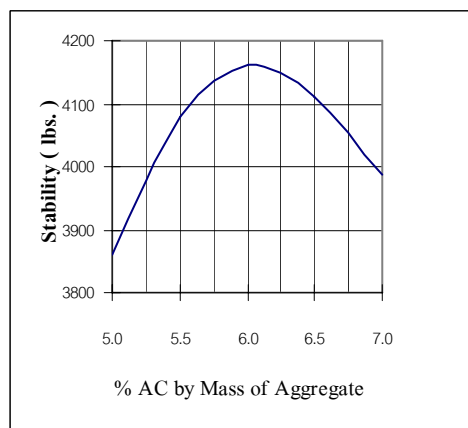
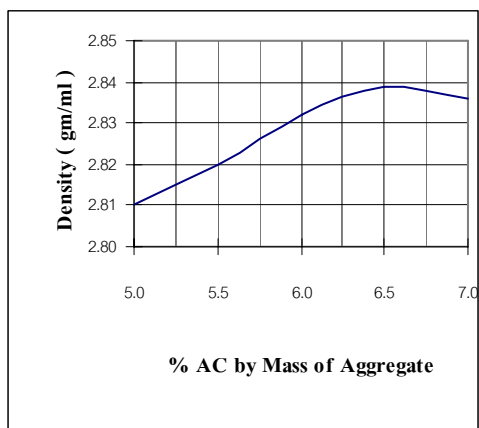
ภาพผนวกที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี



ภาพผนวกที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบสโตนมาสดิกแอสฟัลต์ที่ใช้
วัสดุรวมหินปูน 1 จ.สระบุรี



ภาพผนวกที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการทดสอบสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้
วัสดุมวลรวมหินปูน 2 จ.ชลบุรี



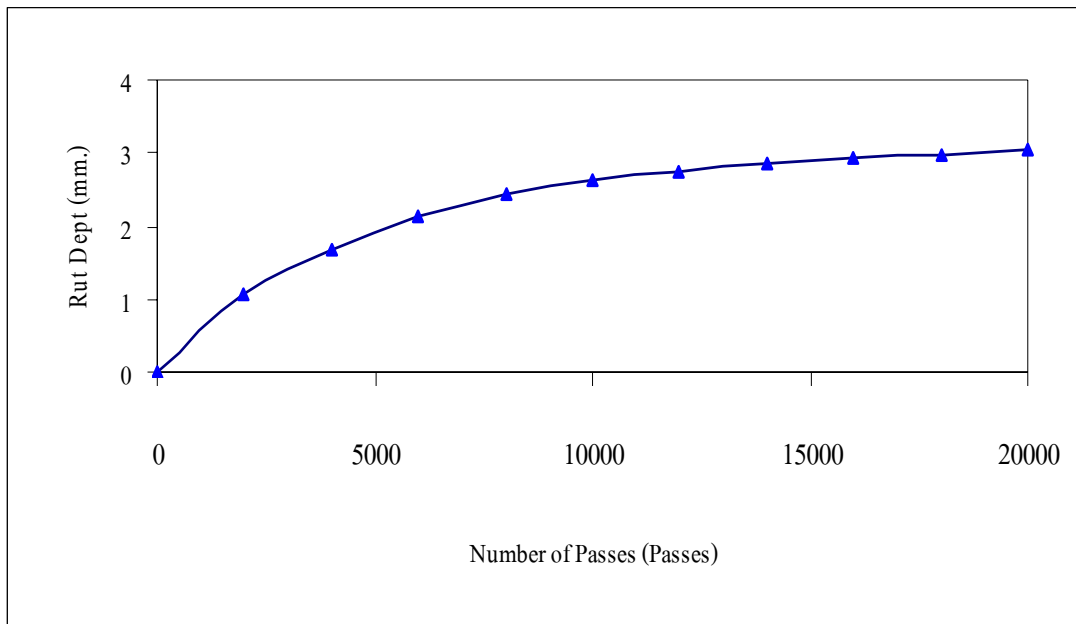
ภาพผนวกที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ ของการทดสอบสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้
วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี

ตารางผนวกที่ 1 ผลการทดสอบ Tensile Strength พอร์สแลนด์ โดยวิธี Indirect Tensile

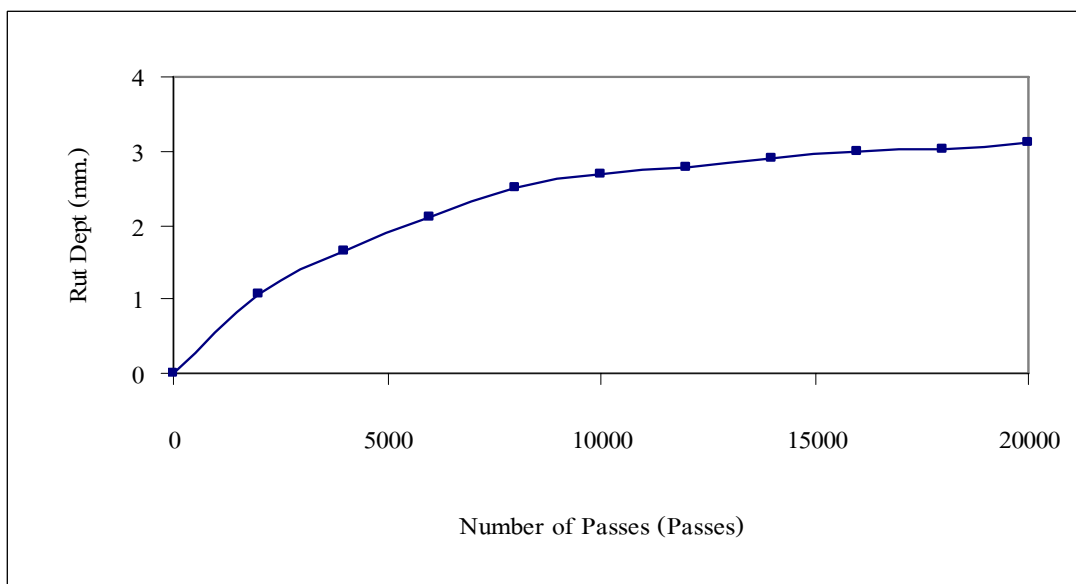
Type of Aggregate	No.	Temperature (°C)	Diameter (mm)	Heigh (mm)	Load (N)	Indirect Tensile (Mpa)
Limestone 1	1	25	102.39	76.1	5891	0.48
	2	25	101.63	75.1	5873	0.49
	3	25	101.45	75.0	5723	0.48
	1	30	102.15	74.8	4931	0.41
	2	30	102.70	75.1	4755	0.39
	3	30	101.53	75.3	4836	0.40
	1	35	102.27	76.2	3795	0.31
	2	35	102.71	75.9	3862	0.32
	3	35	101.83	75.5	3772	0.31
Limestone 2	1	25	101.25	74.3	5710	0.48
	2	25	101.48	75.2	5685	0.47
	3	25	102.16	75.4	5670	0.47
	1	30	102.60	75.8	4723	0.39
	2	30	102.41	75.4	4756	0.39
	3	30	102.11	74.5	4962	0.42
	1	35	101.78	74.5	3658	0.31
	2	35	101.46	74.3	3596	0.30
	3	35	102.36	74.8	3610	0.30
Slag	1	25	101.52	65.7	8486	0.81
	2	25	101.90	64.8	8325	0.80
	3	25	102.62	65.1	8379	0.80
	1	30	101.43	65.7	6758	0.65
	2	30	102.12	64.7	6538	0.63
	3	30	101.70	64.9	6625	0.64
	1	35	101.42	65.0	5237	0.51
	2	35	102.10	64.8	5076	0.49
	3	35	101.85	65.3	5053	0.48

ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดสอบ Tensile Strength สโตนมาสต์ิกแอสฟัลต์ โดยวิธี Indirect Tensile

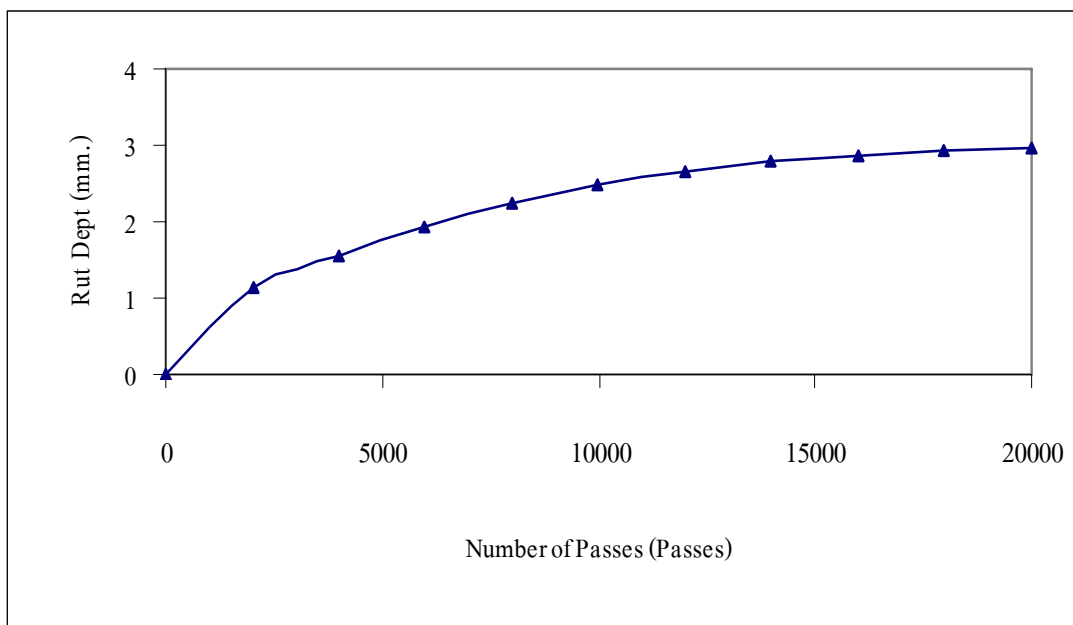
Type of Aggregate	No.	Temperature (°C)	Diameter (mm)	Heigh (mm)	Load (N)	Indirect Tensile (Mpa)
Limestone 1	1	25	101.7	62.3	5439	0.55
	2	25	102.26	63.5	5278	0.52
	3	25	102.16	62.3	5368	0.54
	1	30	101.65	62.8	4296	0.43
	2	30	101.59	63.2	4062	0.40
	3	30	101.85	63.5	4079	0.40
	1	35	101.55	63.5	3433	0.34
	2	35	102.12	63.2	3465	0.34
	3	35	102.23	62.8	3507	0.35
Limestone 2	1	25	101.60	62.3	5206	0.52
	2	25	102.53	63.4	5173	0.51
	3	25	102.14	63.1	5056	0.50
	1	30	101.81	62.5	3946	0.39
	2	30	101.36	62.9	3983	0.40
	3	30	102.56	62.1	4105	0.41
	1	35	101.45	62.4	3260	0.33
	2	35	101.90	62.8	3205	0.32
	3	35	101.75	61.8	3416	0.35
Slag	1	25	101.82	62.4	8125	0.81
	2	25	101.57	62.5	8032	0.81
	3	25	102.14	62.7	7953	0.79
	1	30	101.57	62.4	6533	0.66
	2	30	101.36	61.9	6458	0.66
	3	30	102.40	62.3	6512	0.65
	1	35	101.71	61.9	4986	0.50
	2	35	101.85	62.0	4853	0.49
	3	35	101.60	62.2	5023	0.51



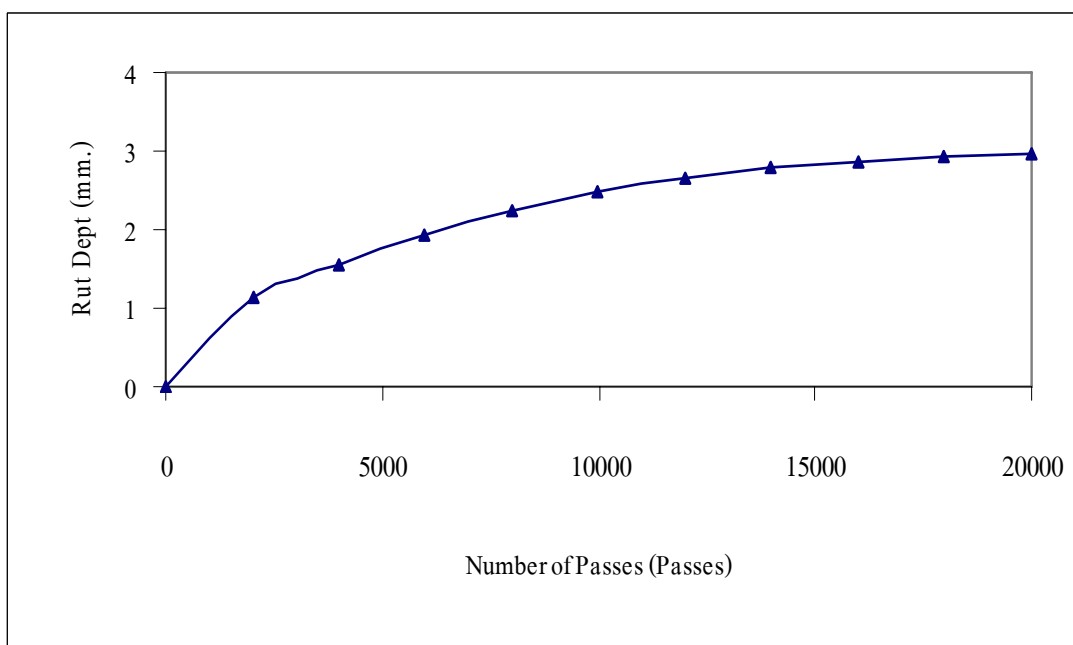
ภาพผนวกที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์ตแลนด์แอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน 1 จ.สระบุรี



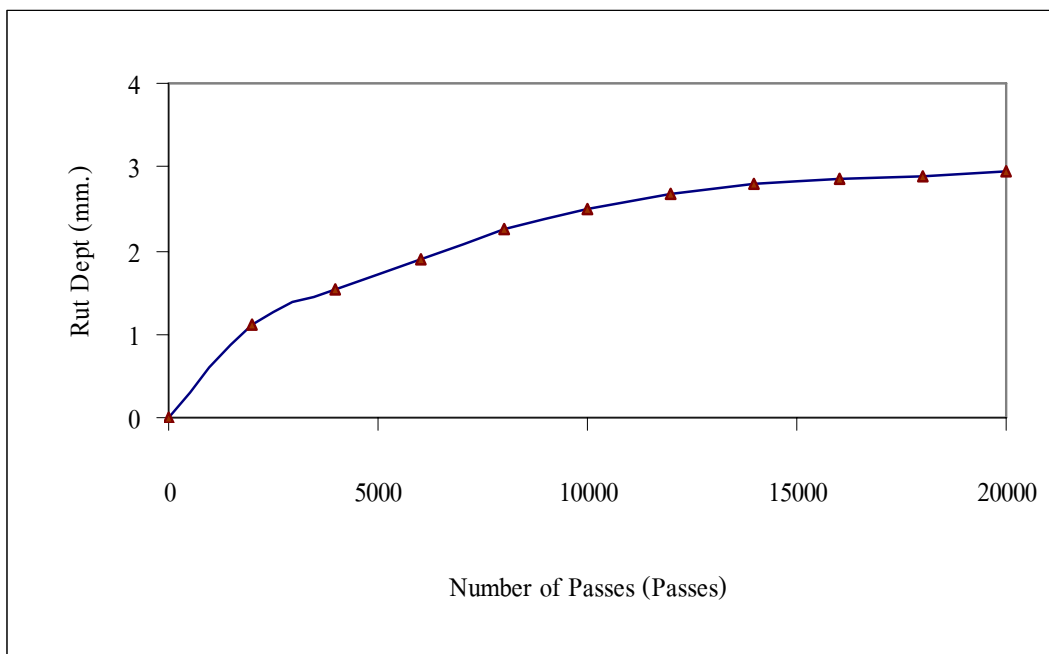
ภาพผนวกที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์ตแลนด์แอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน 2 จ.นครศรีธรรมราช



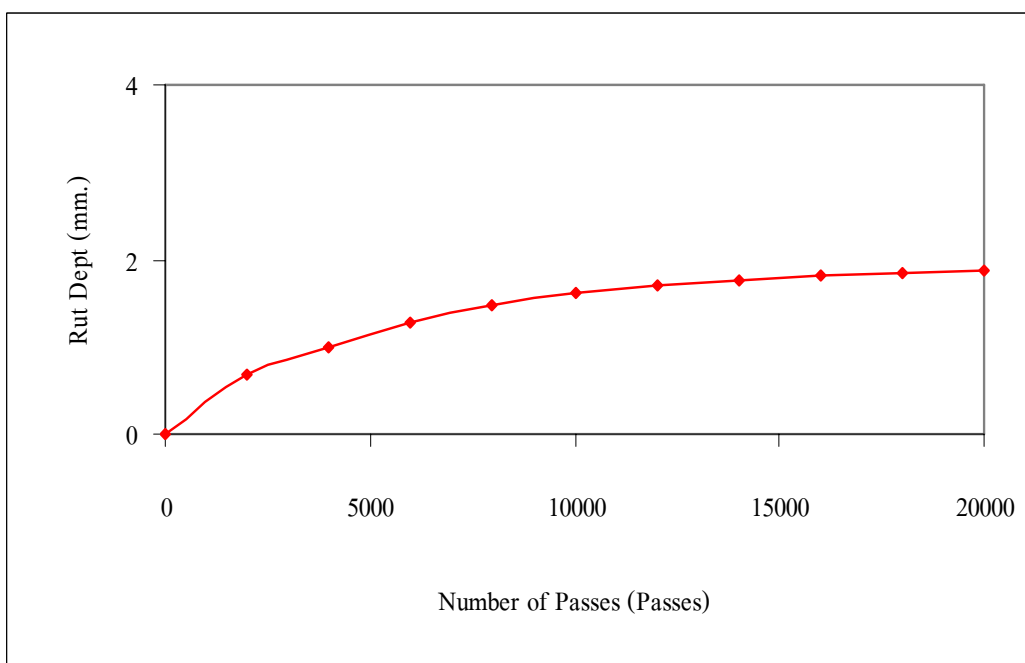
ภาพผนวกที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี



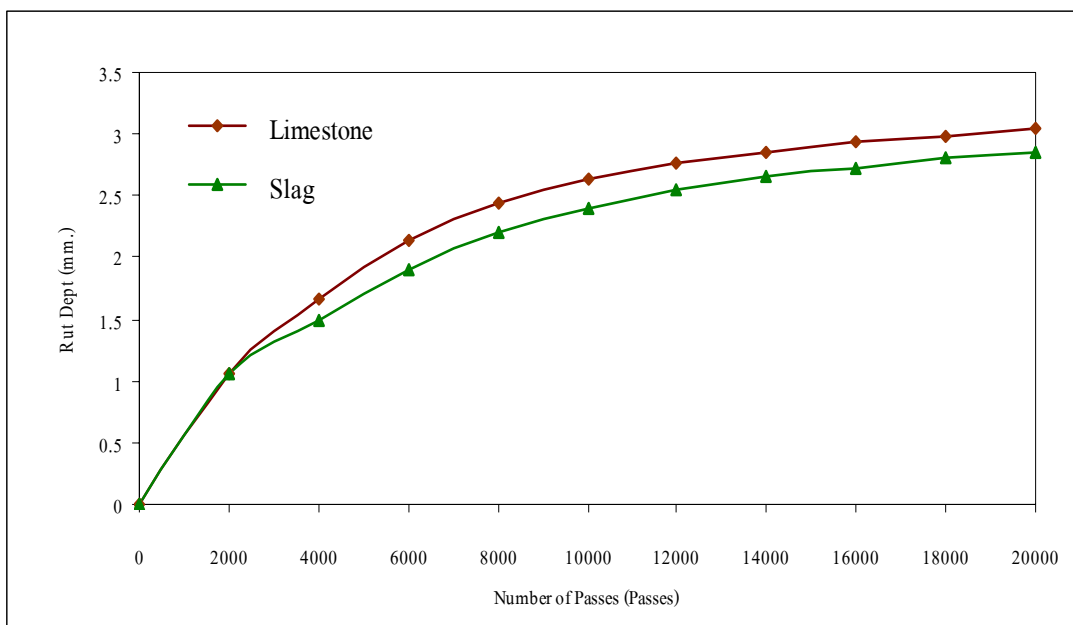
ภาพผนวกที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน 1 จ.สระบุรี



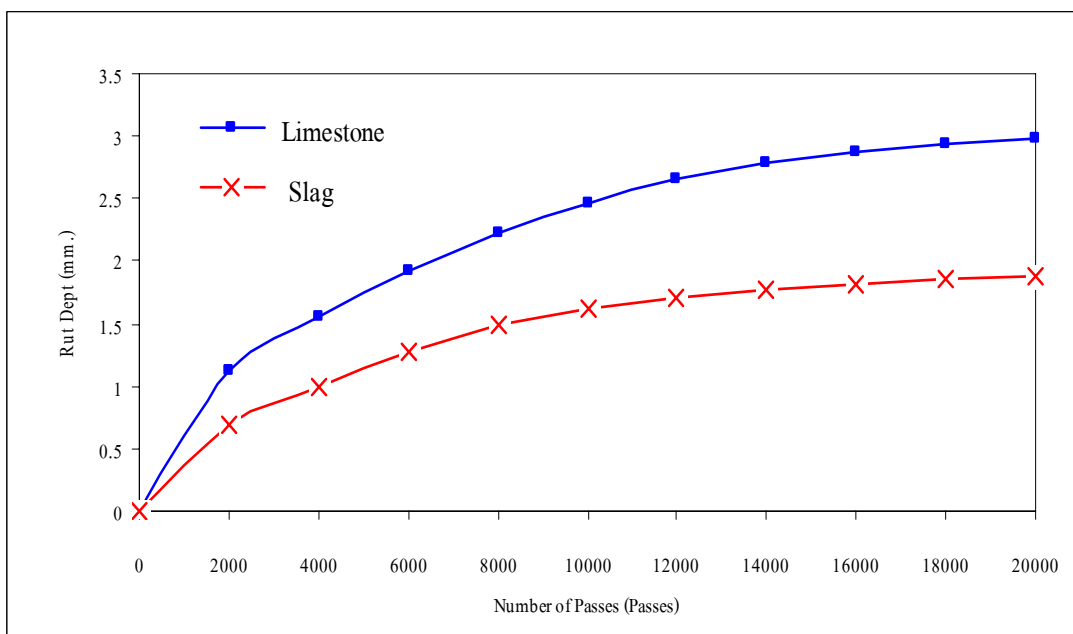
ภาพผนวกที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมหินปูน 2 จ.ชลบุรี



ภาพผนวกที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี



ภาพผนวกที่ 13 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของพอร์สแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลหินปูนกับรวมตะกรันเตาหลอม



ภาพผนวกที่ 14 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเที่ยวของล้อทดสอบกับความลึกของร่องล้อเฉลี่ยของสโตนมาสติกแอสฟัลต์ที่ใช้วัสดุมวลหินปูนกับรวมตะกรันเตาหลอม

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุ
มวลรวมหินปูน จ.สระบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	SSA1	102.18	72.84	1	6344			9.06		
					6210			9.19		
					6295	6297.4		9.33	9.13	
					6308			8.85		
					6330			9.22		
					6293			9.20		
					2	6230		9.01		
					6337			9.45		
					6323	6289.2		9.57	9.26	
					6270			9.34		
					6286			8.94		
	SSA2	102.27	73.67	1	6342			9.16		
					6272			9.21		
					6210	6260.2		9.31	9.17	
					6211			9.06		
					6266			9.11		
					6247			9.22		
					2	6345		9.02		
					6243			9.47		
					6185	6233.6		9.56	9.28	
					6285			9.32		
					6110			9.02		

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุ
มวลรวมหินปูน จ.สระบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	SSA1	102.18	72.84	1	4904			10.36		
					4816			10.6		
					4845	4861		10.69	10.65	
					4848			10.78		
					4892			10.83		
				2	4799		4860	10.54		10.67
					4899			10.43		
					4890	4858		11.02	10.68	
					4857			10.56		
					4845			10.85		
	SSA2	102.27	73.67	1	4927			10.45		
					4851			10.67		
					4872	4875.6		10.65	10.52	
					4864			10.53		
					4864			10.29		
				2	4902		4867	10.75		10.62
					4887			10.69		
					4793	4858.2		10.65	10.73	
					4858			10.75		
					4851			10.81		

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 35° C วัสดุ
มวลรวมหินปูน จ.สระบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	SSA1	102.18	72.84	1	3710			11.98		
					3621			12.40		
					3621	3617.8		12.55	12.41	
					3571			12.55		
					3566			12.58		
					3613					12.57
				2	3553			13.62		
					3522			12.27		
					3643	3607.2		12.60	12.73	
					3661			12.74		
					3657			12.40		
	SSA2	102.27	73.67	1	3702			12.23		
					3655			12.36		
					3635	3638.2		12.45	12.41	
					3596			12.56		
				2	3603			12.47		
					3607					12.51
					3557			13.05		
					3529			12.37		
					3601	3576.6		12.63	12.60	
					3598			12.65		
					3598			12.30		

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุ
มวลรวมหินปูน จ.นครสวรรค์

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain)		
					(MPa)			(MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	LIA1	102.18	75.1	1	3550			11.94		
					3551			11.23		
					3527	3535.6		11.44	11.54	
					3525			11.46		
					3525			11.64		
							3552			11.36
				2	3563			11.37		
					3571			11.01		
					3570	3568		11.04	11.17	
					3568			11.22		
					3568			11.23		
	LIA2	102.27	75.0	1	3537			11.29		
					3538			11.21		
					3530	3530.4		11.21	11.25	
					3527			11.25		
					3520			11.27		
							3533			11.25
				2	3542			11.25		
					3542			11.35		
					3535	3536.4		11.29	11.25	
					3534			11.11		
					3529			11.23		

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุ
มวลรวมหินปูนหลอม จ.นครสวรรค์

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	LIA1	102.18	72.84	1	2105			14.06		
					2109			14.08		
					2098	2101		14.05	14.05	
					2098			14.05		
					2095			14.02		
				2	2116		2107	14.12		14.10
					2116			14.15		
					2112	2112.2		14.15	14.14	
					2110			14.13		
					2107			14.16		
	LIA2	102.27	73.67	1	2123			14.06		
					2127			14.02		
					2125	2121.4		14.05	14.05	
					2116			14.07		
					2116			14.07		
				2						
					2129		2123	14.08		14.06
					2130			14.10		
					2125	2124.2		14.03	14.06	
					2123			14.03		
					2114			14.05		

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 35° C วัสดุ
มวลรวมหินปูน จ.นครสวรรค์

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	L1A1	102.18	72.84	1	1150			16.47		
					1165			16.42		
					1163	1159.8		16.42	16.44	
					1163			16.43		
					1158			16.45		
				2	1161		1162	16.42		16.44
					1167			16.44		
					1167	1163.6		16.44	16.44	
					1164			16.43		
					1159			16.46		
	L1A2	102.27	73.67	1	1132			16.37		
					1135			16.39		
					1134	1131.4		16.39	16.39	
					1129			16.41		
					1127			16.40		
				2	1138		1133	16.37		16.39
					1138			16.37		
					1135	1134.6		16.39	16.38	
					1132			16.36		
					1130			16.41		

ตารางผนวกที่ 9 ผลการทดสอบ โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุ
มวลรวมตะกอนดินเหนียว จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	S1A1	102.18	72.84	1	4367			9.25		
					4363			9.28		
					4365	4363		9.28	9.27	
					4367			9.26		
					4353			9.30		
							4365			9.26
				2	4375			9.21		
					4372			9.23		
					4365	4367.6		9.26	9.25	
					4365			9.26		
					4361			9.28		
	S1A2	102.27	73.67	1	4384			9.35		
					4393			9.32		
					4391	4386.4		9.33	9.35	
					4381			9.41		
					4383			9.35		
							4381			9.31
				2	4386			9.34		
					4375			9.22		
					4378	4374.6		9.24	9.27	
					4370			9.28		
					4364			9.27		

ตารางผนวกที่ 10 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุ
มวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	S1A1	102.18	72.84	1	3123			11.28		
					3125			11.26		
					3118	3119.6		11.30	11.29	
					3116			11.31		
					3116			11.31		
				2			3125			11.31
					3135			11.38		
					3130			11.36		
					3132	3130.6		11.33	11.33	
					3127			11.28		
					3129			11.31		
	S1A2	102.27	73.67	1	3150			11.36		
					3156			11.29		
					3148	3148		11.34	11.32	
					3146			11.32		
					3140			11.27		
				2			3151			11.32
					3158			11.23		
					3156			11.33		
					3153	3153.4		11.34	11.32	
					3152			11.34		
					3148			11.36		

ตารางผนวกที่ 11 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่อุณหภูมิ 35° C วัสดุ
มวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	S1A1	102.18	72.84	1	1862			13.39		
					1865			13.38		
					1862	1864.8		13.29	13.35	
					1860			13.32		
					1875			13.37		
				2	1871		1867	13.38		13.34
					1875			13.35		
					1869	1868.2		13.32	13.33	
					1865			13.28		
					1861			13.30		
	S1A2	102.27	73.67	1	1866			13.35		
					1870			13.38		
					1865	1864		13.24	13.31	
					1860			13.31		
					1859			13.29		
				2	1868		1866	13.33		13.33
					1868			13.33		
					1872	1867.6		13.37	13.34	
					1865			13.34		
					1865			13.35		

ตารางผนวกที่ 12 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์ กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain)		
					(MPa)			(MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
					สุดท้าย			สุดท้าย		
PMA	LS1A1	102.27	63.47	1	5176			11.49		
					5154			11.71		
					5129	5152		11.91	11.806	
					5152			11.95		
					5149			11.97		
				2	5153		5196	11.35		11.62
					5553			11.45		
					5198	5239.2		11.39	11.438	
					5188			11.51		
					5104			11.49		
		102.14	63.67	1	5114			11.99		
					5193			11.81		
					5191	5172.4		11.91	11.77	
					5181			11.65		
					5183			11.47		
				2	5135		5166	11.75		11.77
					5166			11.75		
					5172	5159.8		11.79	11.77	
					5139			11.71		
					5187			11.83		

ตารางผนวกที่ 13 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	L1A1	102.18	72.84	1	3956			13.23		
					3963			13.15		
					3954	3957.2		13.36	13.26	
					3948			13.32		
					3965			13.26		
				2	3968		3963	13.33		13.28
					3975			13.27		
					3971	3968.6		13.27	13.29	
					3971			13.29		
					3958			13.30		
	L1A2	102.27	73.67	1	3963			13.29		
					3971			13.28		
					3969	3962.2		13.26	13.29	
					3953			13.32		
					3955			13.31		
				2	3972		3964	13.36		13.32
					3966			13.35		
					3968	3965.4		13.32	13.35	
					3962			13.41		
					3959			13.30		

ตารางผนวกที่ 14 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 35° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.สระบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	L1A1	102.18	72.84	1	2217			15.52		
					2224			15.63		
					2258	2241.8		15.50	15.52	
					2249			15.48		
					2261			15.48		
					2244			15.54		
				2	2273			15.61		
					2253			15.64		
					2239	2247		15.52	15.57	
					2227			15.51		
					2243			15.55		
	L1A2	102.27	73.67	1	2232			15.63		
					2230			15.67		
					2259	2246.4		15.48	15.57	
					2254			15.55		
					2257			15.51		
				2	2249			15.56		
					2277			15.49		
					2251			15.56		
					2245	2250.6		15.62	15.55	
					2236			15.52		
					2244			15.56		

ตารางผนวกที่ 15 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	LS2A1	102.18	72.84	1	5262			11.49		
					5240			11.71		
					5215	5238		11.91	11.81	
					5238			11.95		
					5235			11.97		
					5239		5227	11.35		11.62
				2	5253			11.45		
					5186	5215.2		11.39	11.44	
					5196			11.51		
					5202			11.49		
	LS2A2	102.27	73.67	1	5200			11.53		
					5198			11.75		
					5193	5214		11.93	11.70	
					5210			11.90		
					5269			11.37		
					5221		5230	11.63		11.68
				2	5252			11.76		
					5258	5245.8		11.53	11.66	
					5225			11.95		
					5273			11.42		

ตารางผนวกที่ 16 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น	ความ	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว			ค่าการคืนตัว		
		ผ่าน	หนา		(Resilient Modulus)			(Resilient Strain)		
		ศูนย์กลาง	(มม.)		(MPa)			(MicroStrain)		
		(มม.)			ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	LS2A1	102.18	72.84	1	4053			13.25		
					4049			13.30		
					4051	4048.2		13.32	13.30	
					4051			13.25		
					4037			13.36		
					4058			13.31		
				2	4076			13.22		
					4071			13.34		
					4065	4068.0		13.33	13.33	
					4066			13.42		
					4062			13.32		
	LS2A2	102.27	73.67	1	4049			13.26		
					4050			13.32		
					4036	4041		13.36	13.33	
					4038			13.34		
					4032			13.38		
				2	4045			13.31		
					4055			13.26		
					4053			13.25		
					4049	4049.6		13.29	13.28	
					4049			13.28		
					4042			13.31		

ตารางผนวกที่ 17 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 35° C วัสดุมวลรวมหินปูน จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	LS2A1	102.18	72.84	1	2194			15.75		
					2182			15.68		
					2216	2203.6		15.81	15.74	
					2207			15.77		
					2219			15.69		
				2	2231		2204	15.88		15.76
					2211			15.76		
					2197	2205		15.81	15.78	
					2185			15.69		
					2201			15.77		
	LS2A2	102.27	73.67	1	2190			15.73		
					2188			15.75		
					2217	2204.4		15.71	15.71	
					2212			15.7		
					2215			15.64		
				2	2235		2207	15.9		15.75
					2209			15.81		
					2203	2208.6		15.81	15.80	
					2194			15.73		
					2202			15.76		

ตารางผนวกที่ 18 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 25° C วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	SSA1	102.18	72.84	1	6344			9.06		
					6210			9.19		
					6295	6297.4		9.33	9.13	
					6308			8.85		
					6330			9.22		
							6293			9.20
				2	6230			9.01		
					6337			9.45		
					6323	6289.2		9.57	9.26	
					6270			9.34		
					6286			8.94		
	SSA2	102.27	73.67	1	6342			9.16		
					6272			9.21		
					6210	6260.2		9.31	9.17	
					6211			9.06		
				2	6266			9.11		
					6345			9.02		
					6243			9.47		
					6185	6233.6		9.56	9.28	
					6285			9.32		
					6110			9.02		

ตารางผนวกที่ 19 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 30° C วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด	ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย แต่ละ ทิศทาง	เฉลี่ย ทั้งหมด
PMA	SSA1	102.18	72.84	1	4904			10.36		
					4816			10.6		
					4845	4861		10.69	10.65	
					4848			10.78		
					4892			10.83		
				2	4799		4860	10.54		10.67
					4899			10.43		
					4890	4858		11.02	10.68	
					4857			10.56		
					4845			10.85		
	SSA2	102.27	73.67	1	4927			10.45		
					4851			10.67		
					4872	4875.6		10.65	10.52	
					4864			10.53		
					4864			10.29		
				2	4902		4867	10.75		10.62
					4887			10.69		
					4793	4858.2		10.65	10.73	
					4858			10.75		
					4851			10.81		

ตารางผนวกที่ 20 ผลการทดสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของสโตนมาสติก
แอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 35° C วัสดุมวลรวมตะกรันเตาหลอม จ.ชลบุรี

ชนิด วัสดุ เชื่อม ประสาน	ชื่อ ก้อนตัว อย่าง	เส้น ผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความ หนา (มม.)	ทิศทาง	ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) (MPa)			ค่าการคืนตัว (Resilient Strain) (MicroStrain)		
					ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย		ค่าจาก 5 รอบ สุดท้าย	เฉลี่ย	
						แต่ละ	เฉลี่ย		แต่ละ	เฉลี่ย
						ทิศทาง	ทั้งหมด		ทิศทาง	ทั้งหมด
PMA	SSA1	102.18	72.84	1	3710			11.98		
					3621			12.40		
					3621	3617.8		12.55	12.41	
					3571			12.55		
					3566			12.58		
					3613				12.57	
					2	3553		13.62		
					3522			12.27		
					3643	3607.2		12.60	12.73	
					3661			12.74		
					3657			12.40		
	SSA2	102.27	73.67	1	3702			12.23		
					3655			12.36		
					3635	3638.2		12.45	12.41	
					3596			12.56		
					3603			12.47		
					3607				12.51	
					2	3557		13.05		
					3529			12.37		
					3601	3576.6		12.63	12.60	
					3598			12.65		
					3598			12.30		



ภาพผนวกที่ 15 เครื่องมือทดลองมาร์แชลล์ Stability Test



ภาพผนวกที่ 16 เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (UTM-5P)



ภาพผนวกที่ 17 เครื่องมือทดสอบ Universal Testing Machine (UTM-5P) ติดตั้งอุปกรณ์
ทดสอบ Static Indirect Tensile



ภาพผนวกที่ 18 การจัดเตรียมก้อนตัวอย่างทดสอบ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ



ภาพผนวกที่ 19 เครื่องมือบดอัดตัวอย่างในการทดสอบ Wheel Tracking Test



ภาพผนวกที่ 20 เครื่องมือทดสอบ Wheel Tracking Test

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล

สุธี รังสรรค์สุขโร

วัน เดือน ปี ที่เกิด

3 เมษายน พ.ศ. 2522

สถานที่เกิด

กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

เศรษฐศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

อส.บ.(โยธา) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

วศ.บ.(โยธา) มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์