การศึกษากระบวนการก่อสร้างและคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์

นางสาวจิตติมา อังษานาม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON CONSTRUCTION PROCESSES AND PROPERTIES OF RECYCLED PAVEMENT MATERIALS STABILIZED WITH FOAMED ASPHALT

Miss Jittima Angsanam

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการก่อสร้างและคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์
โดย	นางสาวจิตติมา อังษานาม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ธันวิน สวัสดิศานต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ธันวิน สวัสดิศานต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จิตติมา อังษานาม : การศึกษากระบวนการก่อสร้างและคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์. (A STUDY ON CONSTRUCTION PROCESSES AND PROPERTIES OF RECYCLED PAVEMENT MATERIALS STABILIZED WITH FOAMED ASPHALT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.เกษม ชูจารุกุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร.ธันวิน สวัสดิศานต์, 112 หน้า.

ในประเทศไทยได้มีการนำซีเมนต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่มาเป็นระยะเวลานานโดยกรมทางหลวง ซึ่งจากรายงานการก่อสร้างในหลายโครงการของกรมทางหลวง มักพบว่ามีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่อยู่บนชั้นวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ โดยรอยแตกที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของชั้นวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งสาเหตุของการหดตัวเกิดจากปริมาณของซีเมนต์ที่เพิ่มเข้าไปมีปริมาณสูง เพื่อที่จะทำให้วัสดุมีกำลังตามความต้องการ เนื่องจากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำโฟมแอสฟัลต์มาใช้เป็นสารปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปัญหาการแตกร้าว

เดือนพฤษภาคม ปี 2550 กรมทางหลวงประเทศไทย ได้มีโครงการบูรณะถนนที่ชำรุดเสียหาย โดยการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ ระยะทาง 5.347 กม. ในโครงการนี้ได้แบ่งการก่อสร้างออกเป็นสองส่วน โดยส่วนที่หนึ่งวัสดุที่ทำการปรับปรุงคุณภาพประกอบด้วย วัสดุโครงสร้างทางเดิมและหินฝุ่นในสัดส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก การนำหินฝุ่นมาผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงขนาดคละของวัสดุให้เป็นไปตามคำแนะนำในการออกแบบ ในส่วนที่สองเป็นวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพียงอย่างเดียว การศึกษาในครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษากระบวนการก่อสร้างและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมและโมดูลัสคืนตัว โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับข้อกำหนดในการก่อสร้าง และเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในห้องปฏิบัติการและในสนาม

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

4970256821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : FOAMED ASPHALT / COLD IN-PLACE RECYCLING / RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) / INDIRECT TENSILE STRENGTH / RESILIENT MODULUS

JITTIMA ANGSANAM : A STUDY ON CONSTRUCTION PROCESSES AND PROPERTIES OF RECYCLED PAVEMENT MATERIALS STABILIZED WITH FOAMED ASPHALT. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.KASEM CHOOCHARUKUL, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : TUNWIN SVASDISANT, Ph.D., 112 pp.

Pavement recycling using Portland cement as the stabilizing agent has been implemented in Thailand for a long time by Department of Highways (DOH). There have been reports for the advantages and disadvantages of the technique from several projects all over the country. One of the disadvantages is the reflective cracks in the overlaid asphalt layer continuing from the shrinkage cracks in the recycling material layer. The cause of the shrinkage cracks is the relatively high amount of cement added to the recycling materials to achieve the design strength. As a result, pavement recycling using foamed asphalt as the stabilizing agent to avoid the shrinkage crack problem.

In May 2007, DOH constructed a 5.347-km. long experimental project in which foamed asphalt was used as the stabilizing agent in cold in-place recycling (CIR). The project was divided into two sections. In the first section, the reclaimed asphalt pavement (RAP) was mixed with fresh dust-stones at the proportion of 70:30 by weight to achieve the gradation in the design manual. In the second section, the recycled material is composed of the RAP only. The objective of this research is to study the constructions processes of foamed asphalt cold in-place recycling and the properties of foamed recycling materials. Foamed asphalt samples were obtained from the field as loose and compacted materials. Specimens were prepared and tested for engineering properties including indirect tensile strength (ITS) and resilient modulus (MR). The properties of the specimens from the two sections will be compared with the design criteria and compared with each other. Further, the construction performance can be evaluated by comparing the properties of the foamed asphalt specimens prepared in the laboratory with the properties of those obtained from the field.

Department :	Civil Engineering	Student's Signature	Jittima Angsanam
Field of Study :	Civil Engineering	Advisor's Signature	
Academic Year :	2009	Co-Advisor's Signature	

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ธันวิน สวัสดิศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ตลอดจนกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิศวกรรมการขนส่ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ที่กรุณาให้ใช้ห้องปฏิบัติการในการเตรียมวัสดุตัวอย่างและความช่วยเหลือด้านเครื่องมือการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง ที่มอบความเป็นกันเองและคอยให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณวุฒิพงศ์ คำภูแสน สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนิสิตสาขาวิศวกรรมขนส่ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ดูแลสั่งสอน สนับสนุนและให้กำลังใจ จนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณ พี่สาว น้องสาว ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 3

1.3 ขอบเขตของการศึกษา..... 3

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา..... 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6

2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... 6

2.1.1 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่..... 6

2.1.2 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการผสมเย็น 8

2.1.3 โฟมแอสฟัลต์..... 13

2.1.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์..... 18

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 24

3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 32

3.1 การศึกษากระบวนการก่อสร้าง..... 32

3.2 การเก็บตัวอย่างวัสดุในสนาม..... 32

3.2.1 การเจาะเก็บก้อนตัวอย่าง..... 33

3.2.2 การเก็บตัวอย่างวัสดุจากเครื่องผสม..... 34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3.2.3 การเก็บตัวอย่างวัสดุเพื่อนำมาเตรียมก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ..... 35
3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม..... 36
3.3.1 การทดสอบหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม..... 36
3.3.2 การทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด..... 37
3.4 การทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์..... 38
3.5 การเตรียมก้อนตัวอย่างส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์..... 38
3.5.1 การเตรียมก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากในสนาม..... 38
3.5.2 การเตรียมก้อนตัวอย่างจากวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 40
3.5.3 การเตรียมก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ..... 40
3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์..... 43
3.6.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม..... 43
3.6.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว..... 45

4 การศึกษาการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์..... 47
4.1 ที่ตั้งของโครงการ..... 47
4.2 รายละเอียดของโครงการ..... 48
4.3 รูปตัดของถนน..... 49
4.4 ส่วนผสมที่ใช้ในการก่อสร้าง..... 50
4.5 ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้าง..... 52
4.6 เครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง..... 52
4.7 กระบวนการการก่อสร้าง..... 56
4.8 การตรวจสอบคุณภาพของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในการก่อสร้าง..... 64
4.9 สรุปผลการศึกษาการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์..... 65

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล..... 67
5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม..... 67
5.1.1 ผลการทดสอบหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม..... 67
5.1.2 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด..... 70
5.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์..... 72
5.3 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ..... 74
5.3.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมและบดอัดในสนาม..... 74
5.3.2 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 78
5.3.3 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 80
5.4 ผลการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ 82
5.4.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม..... 82
5.4.2 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว..... 87

6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ..... 91
6.1 สรุปผลการศึกษา..... 91
6.2 ข้อเสนอแนะ..... 93

รายการอ้างอิง..... 95

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

ภาคผนวก..... 97

ภาคผนวก ก การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม..... 98

ภาคผนวก ข การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์..... 103

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 112

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการปรับปรุงสภาพ..... 10

2.2 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันในการปรับปรุงสภาพ..... 10

2.3 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพ..... 11

2.4 ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามประเภทวัสดุมวลรวม..... 17

2.5 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ตามประเภทวัสดุมวลรวม..... 17

2.6 ค่าโมดูลัสคืนตัว ตามประเภทวัสดุมวลรวม..... 18

2.7 การบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory Compactor ที่ Maccarrone ใช้ในการศึกษา..... 26

2.8 วิธีการออกแบบและวิธีการประเมินค่าส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ของประเทศต่าง ๆ..... 29

2.9 การก่อสร้างและมาตรฐานของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ที่ Wijk และ Wood ศึกษา..... 30

4.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการก่อสร้าง..... 51

4.2 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม..... 51

4.3 ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้าง..... 52

4.4 รายละเอียดของเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง..... 52

4.5 การตรวจสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในการก่อสร้างช่วง RAP 70..... 64

4.6 การตรวจสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในการก่อสร้างช่วง RAP 100..... 65

5.1 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น)..... 67

5.2 สัดส่วนผสมระหว่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น)..... 68

5.3 ขนาดคละของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา..... 69

5.4 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของแต่ละส่วนผสม..... 72

5.5 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170°C..... 73

5.6 คุณลักษณะที่เหมาะสมของโฟมแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170°C..... 74

5.7 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 โดยผสมและบดอัดในสนาม..... 76

5.8 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 โดยผสมและบดอัดในสนาม..... 76

5.9 คุณสมบัติของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ออกแบบและข้อกำหนดในการก่อสร้าง..... 77

5.10 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.11 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 79
5.12 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 81
5.13 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 81
5.14 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม..... 82
5.15 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม..... 82
5.16 การพัฒนากำลังของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ..... 84
5.17 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากในสนาม ที่อายุ 4 วัน ที่ได้จากการคำนวณ..... 85
5.18 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ..... 85
5.19 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม..... 87
5.20 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม..... 87
5.21 การพัฒนากำลังของค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C..... 89
5.22 การเปรียบเทียบอัตราการพัฒนากำลังของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมกับอัตราการพัฒนากำลังของค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์..... 90

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 การปรับปรุงคุณภาพแบบผสมที่โรงงาน (In-Plant Recycling)..... 7

2.2 การปรับปรุงคุณภาพแบบผสมในที่ (In-Place Recycling)..... 8

2.3 กระบวนการผสมสารปรับปรุงสภาพเข้ากับวัสดุมวลรวม..... 12

2.4 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงสภาพ..... 12

2.5 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานที่ใช้โฟมแอสฟัลต์เป็นสารปรับปรุงสภาพ..... 13

2.6 กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์..... 14

2.7 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์..... 15

2.8 ลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้น..... 15

2.9 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่เกิดขึ้นตามปริมาณน้ำที่ใช้..... 16

2.10 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง..... 18

2.11 ลักษณะการกระจายของความเค้นดึงและความเค้นอัดในการทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม..... 20

2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบ Repeated – Load Indirect Tensile Test..... 21

2.13 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแบบควบคุมความเค้น (Stress-Control Test)..... 22

2.14 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแบบควบคุมความเครียด (Strain-Control Test)..... 23

3.1 การเจาะเก็บก้อนตัวอย่างในสนาม..... 33

3.2 ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากสนาม..... 33

3.3 การเก็บตัวอย่างวัสดุจากเครื่องผสม..... 34

3.4 การเก็บตัวอย่างวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์แล้ว..... 34

3.5 การเก็บตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม..... 35

3.6 วัสดุโครงสร้างทางเดิม..... 35

3.7 การเก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) จากกองวัสดุหน้างาน..... 36

3.8 การทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด..... 37

3.9 การทำเครื่องหมายเพื่อแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็นสองส่วน..... 39

3.10 การนำก้อนตัวอย่างเข้าเครื่องตัดตัวอย่าง..... 39

3.11 ก้อนตัวอย่างที่ตัดเรียบร้อย..... 39

3.12 การวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง..... 40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

3.13 การเตรียมส่วนผสมตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้..... 41
3.14 เครื่องฉีดโฟมแอสฟัลต์และเครื่องผสมในห้องปฏิบัติการ..... 41
3.15 การนำส่วนผสมที่ได้ไปใส่ใน Mold ที่เตรียมไว้..... 42
3.16 การบดอัดส่วนผสมโดยวิธีมาร์แซล..... 42
3.17 การทิ้งก้อนตัวอย่างไว้ใน Mold..... 42
3.18 เครื่องมือทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม..... 43
3.19 การจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม..... 44
3.20 เครื่องมือทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว..... 46
3.21 การจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว..... 46
4.1 แผนที่แสดงที่ตั้งของโครงการ..... 47
4.2 การเจาะสำรวจความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม..... 48
4.3 รูปตัดของถนนก่อนการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์..... 49
4.4 รูปตัดของถนนหลังการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์..... 50
4.5 รถบรรทุกยางแอสฟัลต์เกรด 60-70 เพื่อใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์..... 53
4.6 เครื่องผสมซีเมนต์..... 53
4.7 เครื่องกัดและผสมในตัว..... 54
4.8 รถบดสั่นสะเทือนล้อเหล็ก..... 54
4.9 รูปแบบขบวนเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง..... 54
4.10 ขบวนเครื่องจักรในการก่อสร้าง..... 55
4.11 กระบวนการผสมโฟมแอสฟัลต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิม..... 55
4.12 บริเวณห้องผสมของเครื่องกัดและผสม..... 56
4.13 วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพและปูทับโดยเครื่องปูผิว..... 56
4.14 การเตรียมพื้นที่ในการก่อสร้าง..... 57
4.15 การเพิ่มหินฝุ่นหนา 6 ซม. ลงบนโครงสร้างทางเดิม..... 57
4.16 การขูดไสโครงสร้างทางเดิม กว้างครั้งละ 2.20 ม..... 58
4.17 หัวกัดของเครื่องกัดและผสมที่ใช้ในการขูดไสวัสดุโครงสร้างทางเดิม..... 59
4.18 การตรวจสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่บริเวณหน้างาน..... 59
4.19 การบดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 25 ตัน..... 60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.20 การบดอัดด้วยรถบดล้อยาง น้ำหนัก 12 ตัน..... 60
4.21 รถน้ำสเปรย์น้ำ..... 61
4.22 การใช้รถเกรดเกลี่ยปรับระดับและความลาดเอียง..... 61
4.23 การบดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 18 ตัน..... 62
4.24 การบดอัดด้วยรถบดล้อยาง น้ำหนัก 12 ตัน..... 62
4.25 การสเปรย์น้ำเพื่อบ่มชั้นพื้นทางใหม่..... 62
4.26 การ Prime Coat ชั้นพื้นทางใหม่..... 63
4.27 ปูผิวแอสฟัลต์คอนกรีต..... 63
5.1 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP)..... 68
5.2 ขนาดคละของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา..... 70
5.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของส่วนผสม 1 (RAP 70)..... 71
5.4 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของส่วนผสม 2 (RAP 100)..... 71
5.5 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์..... 73
5.6 ลักษณะก้อนตัวอย่างที่มีอายุน้อยกว่า 7 วัน ที่เจาะเก็บในสนาม..... 75
5.7 ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนามที่ตัดออกเป็นสองส่วน..... 75
5.8 การนำส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามมาบดอัดโดยวิธีมาร์แชล..... 78
5.9 ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ..... 79
5.10 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์โดยพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม..... 83
5.11 ค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์โดยพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม..... 88

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการคมนาคมขนส่งทางบกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ผิวทางเกิดการชำรุดเสียหาย จึงจำเป็นที่จะต้องบูรณะปรับปรุงทางให้อยู่ในสภาพดี เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายลุกลามต่อไป โดยการบูรณะปรับปรุงผิวทางนั้นจะต้องพิจารณาจากสาเหตุที่ก่อให้เกิดความเสียหาย ซึ่งความเสียหายของผิวทางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประการคือ ความเสียหายทางด้านการใช้งาน (Functional Failure) และความเสียหายทางด้านโครงสร้าง (Structural Failure)

ในอดีตการบูรณะปรับปรุงทางชนิดผิวทางลาดยางแอสฟัลต์ที่เกิดความเสียหายทางด้านโครงสร้าง (Structural Failure) เช่น ผิวทางทรุดเป็นร่องตามแนวล้อ (Ruts) จะปรับปรุงโดยการขุดรื้อชั้นผิวทางแอสฟัลต์ ชั้นพื้นทางและชั้นรองพื้นทางเก่าออกเพื่อก่อสร้างโดยใช้วัสดุใหม่ แต่ในปัจจุบันเนื่องจากวัสดุมวลรวมจำพวก หิน ทราย มีปริมาณลดน้อยลง ทำให้การก่อสร้างในบางครั้งต้องขนส่งวัสดุมวลรวมเหล่านี้มาจากแหล่งวัสดุที่อยู่ห่างไกลจากพื้นที่ก่อสร้าง ประกอบกับราคาน้ำมันที่สูงขึ้น จึงได้มีการปรับปรุงเทคนิคการก่อสร้างโดยการนำเอาวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุอย่างคุ้มค่าและยังทำให้ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีการนำวัสดุไปผสมใหม่ที่โรงงานผลิต (In-Plant Recycling) หรือวิธีการผสมวัสดุแบบในที่ (In-Place Recycling) ซึ่งการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการผสมวัสดุแบบในที่มีข้อดีอันสำคัญคือ สามารถรื้อถอนวัสดุชั้นทางและทำการปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมใหม่ในพื้นที่ก่อสร้างได้ทันที ลดขั้นตอนในการก่อสร้าง ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยลงและลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุชั้นทาง

เนื่องจากปัจจุบันเชื้อเพลิงมีราคาสูง ประกอบกับปัญหาทางด้านมลภาวะ การนำเอาวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม กระบวนการนี้จะกระทำโดยขุดรื้อวัสดุชั้นทางเก่าขึ้นมา พร้อมกับทำให้ละเอียด แล้วเติมสารปรับปรุงสภาพหรือเพิ่ม

วัสดุมวลรวมใหม่ก่อนที่จะนำกลับไปปูใหม่ ซึ่งส่วนใหญ่จะนำกลับไปใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Recycled Base) สำหรับสารปรับปรุงสภาพ อาจใช้เป็นปูนซีเมนต์หรือแอสฟัลต์อิมัลชัน จากการศึกษาวิจัยของ Zulakmal et al. (2005) พบว่า การใช้สารปรับปรุงสภาพทั้งสองชนิดมีข้อจำกัดคือ การใช้ปูนซีเมนต์หากใช้ในปริมาณที่มากเกินไป ก็จะทำให้ถนนมีความเปราะสูง เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของถนน ส่วนการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันนั้นจะต้องให้ความชื้นแก่วัสดุมวลรวมในปริมาณที่สูงเพื่อช่วยในการผสมให้เข้ากัน ซึ่งส่วนผสมที่มีความชื้นสูงจะก่อให้เกิดปัญหาในการบดอัดได้

จากการตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดริเริ่มนำสารปรับปรุงสภาพชนิดใหม่คือ โฟมแอสฟัลต์ ซึ่งได้รับการพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยสำนักบริหารบำรุงทางร่วมกับสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ และสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม ได้จัดสรรงบประมาณในการบูรณะทางหลวงหมายเลข 304 โดยการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่แบบผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ บริเวณจุดเริ่มทางเลี่ยงเมืองปักธงชัย อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ระหว่าง กม.95+653 - กม.101+000 (อำเภอปักธงชัยมุ่งหน้าสู่อำเภอวังน้ำเขียว) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดความเสียหายโดยมีลักษณะเป็นร่องล้อ ซึ่งโครงการดังกล่าวถือเป็นโครงการนำร่องทางด้านโฟมแอสฟัลต์ในประเทศไทย เพื่อศึกษาวิจัยแนวทางการนำโฟมแอสฟัลต์มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่และเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนางานบูรณะบำรุงทางในประเทศไทย

การวิจัยในครั้งนี้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการและรายละเอียดในการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่แบบผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ รวมไปถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการคำนวณออกแบบโครงสร้างถนนโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนที่นิยมใช้กันในหลายประเทศ อีกทั้งกรมทางหลวงยังมีนโยบายที่จะพัฒนาปรับปรุงวิธีการออกแบบโครงสร้างถนนจากเดิมที่ออกแบบโดยการใช้สูตรคำนวณที่ได้มาจากวิธีเชิงประสบการณ์ (Empirical Method) มาเป็นการออกแบบโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical Method) เพื่อให้ได้โครงสร้างถนนที่มีความถูกต้องเหมาะสมและมีความทันสมัยมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ประกอบด้วย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในประเทศไทย

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาประกอบด้วย

1.3.1 กระบวนการก่อสร้าง

กระบวนการก่อสร้างที่ศึกษาเป็นกระบวนการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่แบบผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ของกรมทางหลวง ในการบูรณะทางหลวงหมายเลข 304 ระหว่าง กม.95+653 – กม.101+000 (ด้านขาล่อง) อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา

1.3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษานำมาจากโครงการบูรณะทางหลวงหมายเลข 304 ระหว่าง กม.95+653 – กม.101+000 (ด้านขาล่อง) อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ วัสดุโครงสร้างทางเดิมและวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น)
- ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
- แอสฟัลต์ที่ใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60-70

1.3.3 ส่วนผสมที่ศึกษา ประกอบด้วย 2 ส่วนผสม คือ

- ส่วนผสม 1 สัดส่วน วัสดุโครงสร้างทางเดิม: วัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) เท่ากับ 70: 30 โดยน้ำหนัก
- ส่วนผสม 2 สัดส่วน วัสดุโครงสร้างทางเดิม: วัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) เท่ากับ 100: 0 โดยน้ำหนัก

1.3.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ที่ศึกษา ประกอบด้วย

- การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม
- การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

1.4.1 RAP หมายถึง วัสดุโครงสร้างทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) ที่ถูกขูดไสขึ้นมาโดยเครื่องกัดถนน (Milling Machine) ซึ่งเป็นวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

1.4.2 RAP 70 หมายถึง วัสดุโครงสร้างทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) ที่ถูกขูดไสขึ้นมาโดยเครื่องกัดถนน (Milling Machine) และปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยมีสัดส่วนของ วัสดุโครงสร้างทางเดิม: วัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) เท่ากับ 70: 30 โดยน้ำหนัก

1.4.3 RAP 100 หมายถึง วัสดุโครงสร้างทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) ที่ถูกขูดไสขึ้นมาโดยเครื่องกัดถนน (Milling Machine) และปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยมีสัดส่วนของ วัสดุโครงสร้างทางเดิม: วัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) เท่ากับ 100: 0 โดยน้ำหนัก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงขั้นตอนและกระบวนการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างเดิมกลับมาใช้ใหม่แบบผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง

1.5.2 ทราบถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ

1.5.3 ทราบถึงผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์

1.5.4 ผลจากการศึกษาในครั้งนี้ จะเป็นแนวทางในการพัฒนาการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ของประเทศไทยในอนาคต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling)

เทคโนโลยีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) เป็นการบูรณะปรับปรุงถนน โดยการขุดรื้อวัสดุโครงสร้างเดิมของถนนขึ้นมา เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพนั้นทำได้โดยการเติมวัสดุใหม่และสารปรับปรุงสภาพ (Stabilizing Agents) เพื่อให้วัสดุมีกำลังตามที่ต้องการ

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะที่ใช้ในการแบ่ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- แบ่งตามความลึกในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

- การปรับปรุงคุณภาพเฉพาะผิวทาง (Surface Recycling) คือ การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุชั้นทางเดิม ในช่วงความลึกประมาณ 80 - 150 มม. หรือการนำวัสดุผิวทางเดิมที่เสียหายมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการกำจัดรอยแตกร้าวบนชั้นผิวทาง และเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นทาง

- การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทาง (Deep Recycling) คือ การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุชั้นทางเดิม ในช่วงความลึกมากกว่า 150 มม. หรือการนำวัสดุทั้งผิวทางและพื้นทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างทางรวมทั้งปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุชั้นทางเดิมให้มีคุณภาพดีขึ้น

- แบ่งตามวิธีการผสม

- การปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการผสมร้อน (Hot Recycling) คือ การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทางเดิม โดยการนำความร้อนมาใช้ในการผสมส่วนผสมต่าง ๆ เช่นเดียวกับการผสมร้อนในส่วนผสมแอสฟัลติกคอนกรีตโดยวิธีการปกติ

- การปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling) คือ การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทางเดิม โดยการผสมกับวัสดุผสมเพิ่มเติมต่าง ๆ ซึ่งในขั้นตอนการผสมไม่ต้องผ่านกระบวนการให้ความร้อน ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะนำกลับไปใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Recycled Base)

- แบ่งตามรูปแบบการก่อสร้าง

- การปรับปรุงคุณภาพแบบผสมที่โรงงาน (In-Plant Recycling) คือ การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทางเดิม โดยการขุดรื้อวัสดุชั้นทางเดิมตามระดับความลึกที่กำหนด แล้วใช้รถบรรทุกขนย้ายวัสดุไปกองที่โรงงาน เพื่อรอการผสมกับกับวัสดุผสมเพิ่มเติมต่าง ๆ ในโรงผสม แล้วนำกลับมาที่หน้างานเพื่อก่อสร้างต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2.1

ภาพที่ 2.1 การปรับปรุงคุณภาพแบบผสมที่โรงงาน (In-Plant Recycling)
ที่มา : www.wirtgengroup.com

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- การปรับปรุงคุณภาพแบบผสมในที่ (In-Place Recycling) คือ การปรับปรุงคุณภาพวัสดุชั้นทางเดิม โดยที่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพทุกขั้นตอนจะกระทำบริเวณหน้างานที่ทำการก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 2.2

ภาพที่ 2.2 การปรับปรุงคุณภาพแบบผสมในที่ (In-Place Recycling)
ที่มา : www.wirtgengroup.com

2.1.2 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling)

ในช่วงทศวรรษที่ 50 การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการผสมเย็นได้ริเริ่มขึ้น โดยการนำวัสดุบิทูเมน (Bitumen) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland cement) มาผสมกับผิวทางเก่าที่ขุดรื้อขึ้นมาโดยใช้เครื่องจักรธรรมดา ผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผิวทางให้ดีขึ้น ซึ่งลักษณะที่สำคัญของวิธีการนี้คือ ในขั้นตอนการผสมไม่จำเป็นที่จะต้องให้ความร้อนกับวัสดุมวลรวม จึงทำให้ลดการใช้เชื้อเพลิงและมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

ในการปรับปรุงสภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีการผสมเย็นสามารถแบ่งตามรูปแบบการก่อสร้างได้ 2 ประเภทคือ

- แบบผสมเย็นที่โรงงาน (Cold In-Plant Recycling) เหมาะสำหรับการก่อสร้างที่มีจุดที่เสียหายใต้ชั้นทาง ซึ่งจะต้องแก้ไขก่อนโดยการขุดรื้อชั้นทางด้านบนออก แล้วซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย ถ้าไม่ซ่อมแซมก่อนอาจทำให้ถนนใหม่เสียหายภายหลังจากการใช้งานได้ไม่นาน

- แบบผสมเย็นในที่ (Cold In-Place Recycling) เนื่องจากการก่อสร้างแบบผสมเย็นในที่ เป็นกระบวนการก่อสร้างที่ทำแล้วเสร็จในบริเวณหน้างานที่ทำการก่อสร้างจึงเป็นวิธีที่รวดเร็วกว่า ประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการขนส่งวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามการก่อสร้างแบบผสมเย็นในที่ก็จะต้องใช้เครื่องจักรพิเศษที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ

2.1.2.1 สารปรับปรุงสภาพในงานผสมเย็น

สารปรับปรุงสภาพ (Stabilizing Agents) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ โดยสารปรับปรุงสภาพจะทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานต่อความเสียหายเนื่องจากความชื้น (Moisture Resistance) ให้แก่ส่วนผสม ดังนั้นการเลือกชนิดและปริมาณของสารปรับปรุงสภาพที่เหมาะสมเป็นเรื่องที่สำคัญมาก แต่อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารปรับปรุงสภาพนั้นขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย เช่น ราคา การหาใช้ได้ง่าย และ สภาพของวัสดุมวลรวม เป็นต้น สารปรับปรุงสภาพที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ กลุ่มซีเมนต์ (Cementitious Stabilizing Agents) และกลุ่มแอสฟัลต์ (Asphalt Stabilizing Agents)

กลุ่มซีเมนต์ (Cementitious Stabilizing Agents) ประกอบไปด้วยปูนขาว และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สำหรับปูนขาวมักนำมาใช้กับดินที่มีขนาดเม็ดเล็กหรือดินที่มีสภาพพลาสติกสูง (ค่า Plastic Index มากกว่า 10) ได้แก่ ดินที่ประกอบด้วยเม็ดดินเหนียวในปริมาณสูง เนื่องจากปูนขาวจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับเม็ดดินขนาดเล็ก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ดินจับเป็นก้อนโตขึ้นและเพิ่มกำลังรับน้ำหนักให้แก่ดิน ส่วนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีข้อดีที่ให้กำลังสูงและเร็วกว่าปูนขาว แต่ไม่เหมาะกับดินที่มีสภาพพลาสติกสูง (ค่า Plastic Index มากกว่า 10) อีกทั้งการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณที่มากไป จะทำให้วัสดุมีสภาพเปราะหรือขาดความยืดหยุ่นที่ดี ส่งผลให้ลดความต้านทานความล้าของชั้นทาง (Fatigue Resistance) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประการ คือ ประการแรกเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ ส่วนประการที่สองเป็นผลมาจากน้ำหนักกระทำซ้ำของการจราจรที่เคลื่อนผ่านบริเวณนั้น

กลุ่มแอสฟัลต์ (Asphalt Stabilizing Agents) ซึ่งประกอบด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันและโฟมแอสฟัลต์นั้น เป็นวัสดุที่เหมาะสมในหลายด้านทั้งด้านแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมรับได้ ความยืดหยุ่นและช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งข้อดีของการใช้สารปรับปรุงสภาพในกลุ่มนี้คือ จะทำให้ชั้นทางมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แต่สำหรับการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน มีข้อเสียคือเกิดความชื้นสูงในส่วนผสม ทำให้เกิดปัญหาในการบดอัดและการพัฒนากำลังช้า

การเลือกใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แอสฟัลต์อิมัลชันและโฟมแอสฟัลต์เป็นสารปรับปรุงสภาพนั้น มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการปรับปรุงสภาพ

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	
ข้อดี	ข้อเสีย
1. สามารถหาใช้ได้ง่ายจากที่ต่าง ๆ ทั่วโลก 2. ราคาต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ 3. สามารถใช้ได้ทั้งในรูปผงและในรูปของเหลวที่อยู่ในรูปของน้ำปูน 4. ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานรองรับ 5. เพิ่มความต้านทานต่อการเสียหายเนื่องจากความชื้นให้วัสดุ	1. ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวได้ (Shrinkage Cracking) แต่สามารถลดการแตกร้าวได้เมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม 2. ลดความต้านทานความล้าของวัสดุเนื่องจากชั้นทางขาดความยืดหยุ่น 3. ต้องการการบ่มที่เหมาะสม การเปิดใช้ผิวจราจรทันทีสามารถก่อให้เกิดความเสียหายได้

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันในการปรับปรุงสภาพ

แอสฟัลต์อิมัลชัน	
ข้อดี	ข้อเสีย
1. ให้ความยืดหยุ่นที่ดีแก่ชั้นทาง ทำให้ช่วยเพิ่มความต้านทานความล้า 2. สะดวกในการปฏิบัติงานปรับปรุงสภาพ 3. ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานรองรับ	1. โรงงานผลิตต้องมีการควบคุมคุณภาพสูง อีกทั้งสารอิมัลซิไฟเออร์ ที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันยังมีราคาที่สูง 2. ถ้าวัสดุที่ได้จากชั้นทางเก่ามีปริมาณความชื้นสูงเมื่อผสมเข้ากับแอสฟัลต์อิมัลชันจะทำให้ได้ส่วนผสมที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ 3. การบ่มใช้เวลานานเนื่องจากกำลังของวัสดุจะพัฒนาขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป

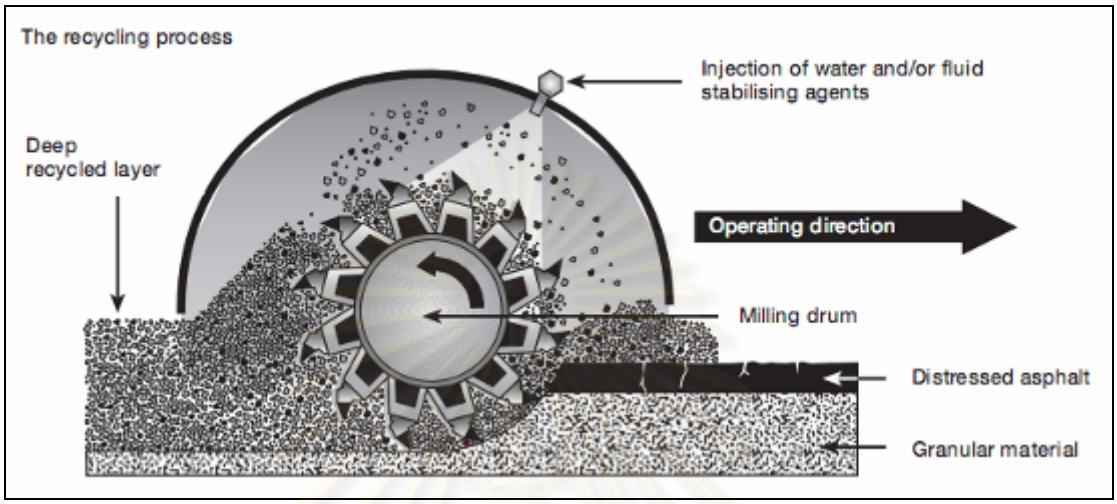
ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพ

โฟมแอสฟัลต์	
ข้อดี	ข้อเสีย
1. ปฏิบัติงานปรับปรุงสภาพได้ง่ายและสะดวก 2. ให้ความยืดหยุ่นที่ดีแก่ชั้นทางเนื่องจากโฟมแอสฟัลต์จะไปเป็นตัวยึดเกาะที่ยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคเล็ก ๆ ของวัสดุ จึงช่วยเพิ่มทั้งความต้านทานความล้าและความต้านทานยุบตัวถาวร 3. โฟมแอสฟัลต์ผลิตจากแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดมาตรฐาน ทำให้ราคาต่ำและหาได้ง่าย 4. สามารถเปิดทางใช้งานได้ทันทีหลังจากการบดอัดเสร็จ 5. สามารถนำไปใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท 6. การเก็บส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ไว้ในที่รักษาความชื้น สามารถเก็บส่วนผสมไว้ได้นาน ก่อนการบดอัดโดยไม่เกิดการแยกตัว	1. จำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะสำหรับการผลิตโฟมแอสฟัลต์ 2. วัสดุที่อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำและมีปริมาณฝุ่นละเอียดไม่เพียงพอ จะไม่เหมาะสมกับการใช้โฟมแอสฟัลต์

2.1.2.2 กระบวนการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยวิธีผสมเย็น

เครื่องจักรกลสำหรับงานปรับปรุงสภาพโดยวิธีการผสมเย็น ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลาหลายปี จากการพัฒนาทำให้ได้เครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่ มีกำลังสูง และมีกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในงานการปรับปรุงสภาพในที่ เครื่องจักรดังกล่าวสามารถทำงานได้แล้วเสร็จด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพียงครั้งเดียว ซึ่งสิ่งสำคัญของการทำงานของขบวนเครื่องจักรอยู่ที่ขนาดและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สามารถขุดรื้อชั้นทางเก่าขึ้นมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เมื่อกระบวนการขุดรื้อชั้นทางเก่าเกิดขึ้น น้ำจากท่อจะฉีดเข้าไปในห้องผสม (Mixing Chamber) เพื่อผสมกับวัสดุชั้นทางเก่า ซึ่งปริมาณน้ำจะได้รับการควบคุมให้ได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมพอดี

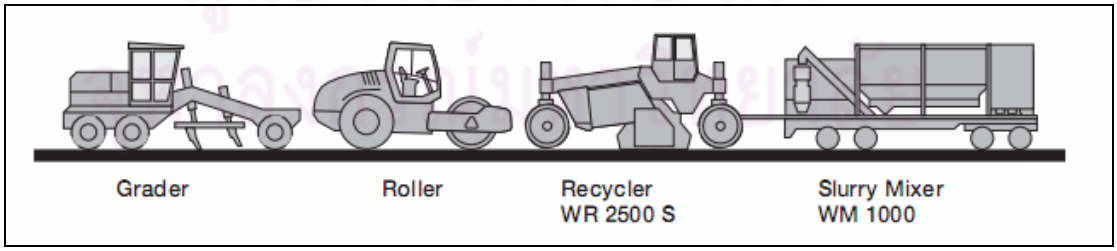
สำหรับการบดอัด จากนั้นสารปรับปรุงสภาพที่อยู่ในรูปของเหลว เช่น น้ำปูน (Cement Slurry) แอสฟัลต์อิมัลชัน หรือ โฟมแอสฟัลต์ จะถูกฉีดเข้าไปผสมกับวัสดุชั้นทางเก่า



ภาพที่ 2.3 กระบวนการผสมสารปรับปรุงสภาพเข้ากับวัสดุมวลรวม

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

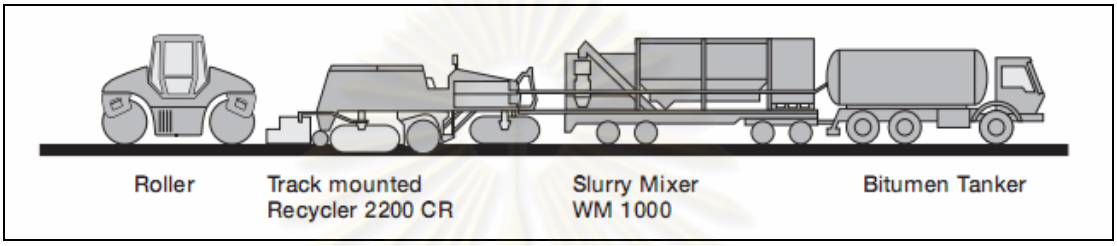
ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานปรับปรุงสภาพโดยวิธีการผสมเย็น จะมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสารปรับปรุงสภาพที่ใช้ ขบวนเครื่องจักรที่แสดงในภาพที่ 2.4 ใช้ในงานที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงสภาพ โดยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และน้ำจะผสมกันที่ห้องผสม (Slurry Mixer) ก่อนนำไปผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมต่อไป



ภาพที่ 2.4 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงสภาพ

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

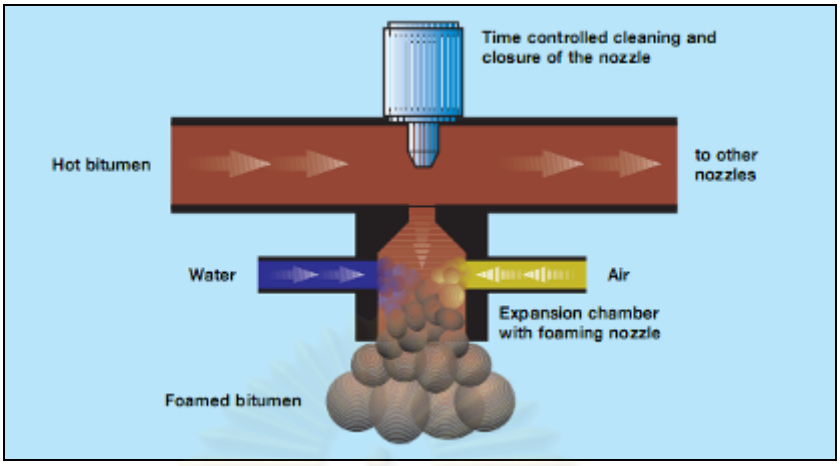
สำหรับงานปรับปรุงสภาพที่ใช้โฟมแอสฟัลต์ผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะมีขบวนเครื่องจักร ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ในกรณีที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์โรยไว้บนผิวทางเดิมที่จะทำการขุดรื้อนั้น รถบรรทุกแอสฟัลต์จะต่อกับเครื่องกัดถนนโดยตรง และด้านหน้าสุดของขบวนจะต้องมีรถบรรทุกน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์ และสำหรับงานปรับปรุงสภาพที่ใช้แอสฟัลต์อิมัลชันจะมีขบวนเครื่องจักรเช่นเดียวกับงานปรับปรุงสภาพที่ใช้โฟมแอสฟัลต์



ภาพที่ 2.5 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานที่ใช้โฟมแอสฟัลต์เป็นสารปรับปรุงสภาพ
ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

2.1.3 โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt)

โฟมแอสฟัลต์ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Prof. Ladis Csanyi จากมหาวิทยาลัย Iowa State เมื่อปี ค.ศ. 1956 ภายหลังเทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาต่อโดย Mobil Oil Organization ซึ่งได้สิทธิบัตรจาก Prof. Ladis Csanyi การผลิตโฟมแอสฟัลต์ทำได้โดยการฉีดแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนอุณหภูมิประมาณ 160-180˚C อากาศและน้ำในปริมาณที่พอเหมาะเข้าไปผสมกัน เมื่อน้ำกระทบเข้ากับความร้อนจะระเหยเป็นไออย่างรวดเร็ว ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะแทรกตัวอยู่ในเนื้อแอสฟัลต์ ผลที่ตามมาทำให้แอสฟัลต์มีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะฟองโฟม และทำให้ความหนืดของแอสฟัลต์ลดลง แอสฟัลต์ที่อยู่ในรูปโฟมจะมีความสามารถในการเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่มีสภาพชื้นและเย็นได้ดี ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

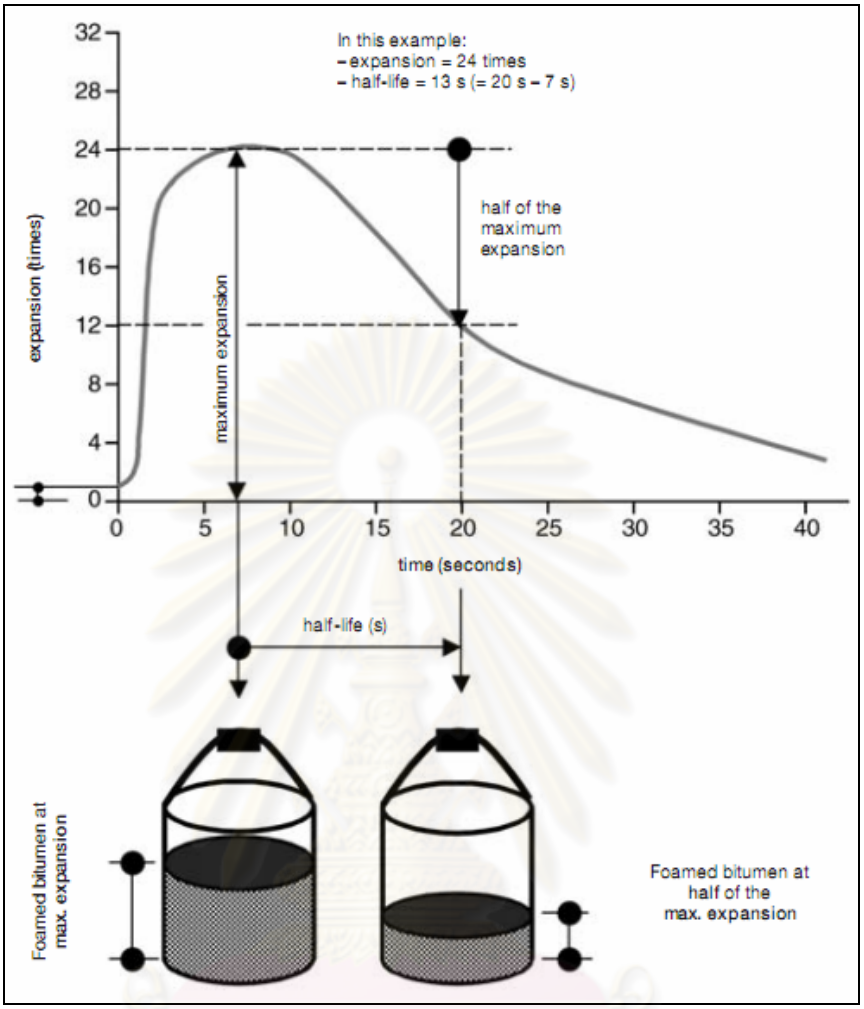
2.1.3.1 คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่สำคัญประกอบด้วย

- ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อปริมาตรแอสฟัลต์เดิม

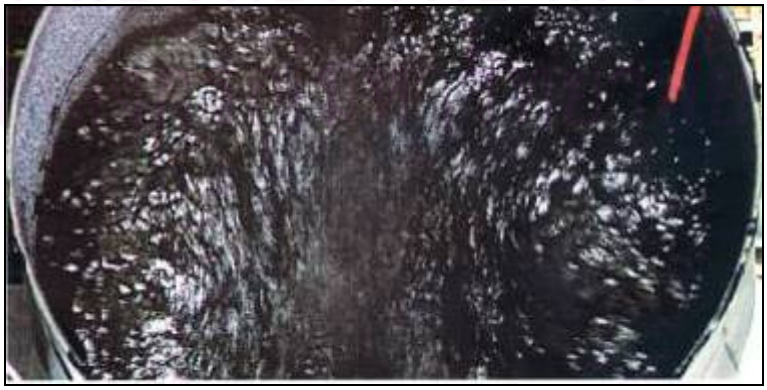
- ค่าครึ่งชีวิต (Half-life) คือ ค่าที่แสดงถึงเวลามีหน่วยเป็นวินาที ที่ปริมาตรสูงสุดของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นยุบตัวลงเหลือครึ่งหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2.7

เมื่อแอสฟัลต์ร้อนผสมกับน้ำที่ฉีดเข้าไป ปริมาตรของแอสฟัลต์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในรูปของโฟม ดังแสดงในภาพที่ 2.8 หลังจากนั้นปริมาตรจะค่อย ๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นคุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ที่ดี จึงควรจะมีค่าการขยายตัวที่สูงพอที่จะสามารถกระจายตัวเข้าไปผสมในมวลรวมได้ดี และมีค่าครึ่งชีวิตที่นานพอที่จะคงสภาพโฟมให้สามารถผสมกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิห้องได้



ภาพที่ 2.7 ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ของโฟมแอสฟัลต์

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

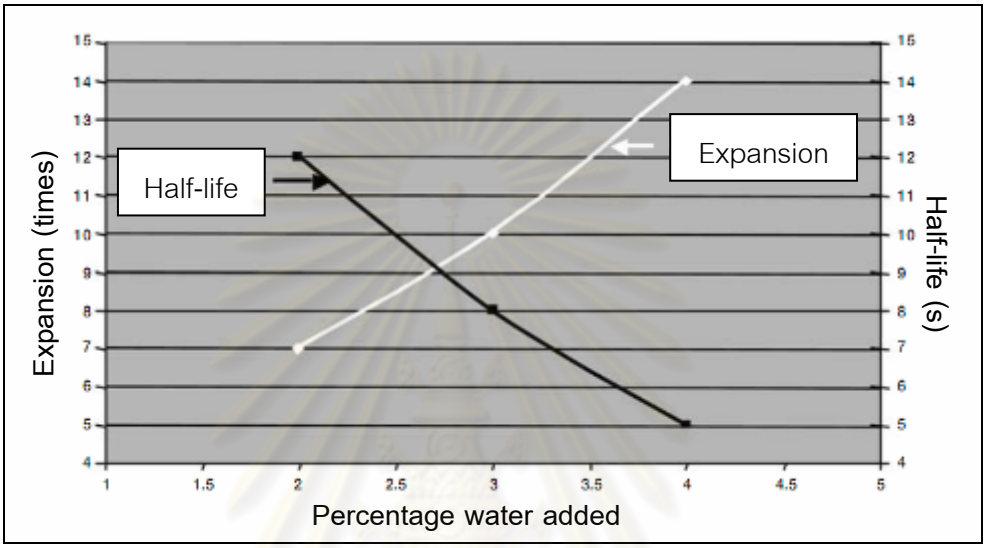


ภาพที่ 2.8 ลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้น

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

- ปริมาณน้ำ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าครึ่งชีวิตที่จะลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่เกิดขึ้นตามปริมาณน้ำที่ใช้

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

- เกรดของแอสฟัลต์ แอสฟัลต์ที่มีเกรดอ่อนกว่า (Soft Asphalt) หรือมีค่าเพนิเทรชันเกรดสูงกว่าจะให้คุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ที่ดีกว่า โดยทั่วไปแอสฟัลต์ที่ใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์จะมีค่าเพนิเทรชันระหว่าง 80 ถึง 150 แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้งานในบริเวณพื้นที่ที่มีอากาศร้อน เพื่อความเหมาะสมควรใช้แอสฟัลต์ที่มีค่าเพนิเทรชันต่ำกว่า 100

- อุณหภูมิของแอสฟัลต์ ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้คุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ดีขึ้นแต่จะเหมาะสมที่สุดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 160-180°C

- สารผสมเพิ่ม (Additives) มีหลากหลายชนิดทั้งช่วยลดและช่วยเพิ่มการเกิดโฟม เช่น สารประกอบซิลิโคน เป็นสารลดสภาพโฟม (Anti-foaming agent) จะลดสภาพการเกิดโฟมของแอสฟัลต์ลง และสารเพิ่มการเกิดโฟม (Foamants) จะใช้เมื่อต้องการนำแอสฟัลต์ที่มีสารลดสภาพโฟมผสมอยู่กลับมาใช้ใหม่

- ความดันที่ต่ำกว่า 3 MPa จะทำให้ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตลดลง

จากการศึกษาและวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวัสดุมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ ควรมีวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) อย่างน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากวัสดุมวลละเอียดจะสามารถจับตัวกับโฟมแอสฟัลต์ และทำหน้าที่เหมือนมอร์ต้ายึดเชื่อมระหว่างมวลรวมที่มีขนาดใหญ่

2.1.3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์เป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นเครื่องบ่งบอกประสิทธิภาพในการใช้งานจริง ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์จะมีคุณสมบัติดีที่สุด เมื่อมีโฟมแอสฟัลต์ผสมอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม โดยทราบได้จากขั้นตอนการออกแบบส่วนผสม อย่างไรก็ตามวัสดุมวลรวมในแต่ละประเภทจะมีความต้องการโฟมแอสฟัลต์ในปริมาณที่แตกต่างกันไป โดยทั่วไปจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามประเภทวัสดุมวลรวม

วัสดุโครงสร้างทางเดิม: หินคลุก (50:50)	1.5 – 3.0 %
หินคลุก	2.5 – 4.0 %
กรวดธรรมชาติ (PI<10, CBR>30)	3.4 – 4.5 %

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

ความแข็งแรงของส่วนผสม (Strength) จะได้รับการบ่งชี้ด้วยค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ก้อนตัวอย่างที่บดอัดตามมาตรฐานมาร์แชลจะได้รับการทดสอบในอุณหภูมิ 25˚C โดยทั่วไปจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ตามประเภทวัสดุมวลรวม

วัสดุโครงสร้างทางเดิม: หินคลุก (50:50)	350 – 800 kPa
หินคลุก	400 – 900 kPa
กรวดธรรมชาติ (PI<10, CBR>30)	250 – 500 kPa

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความอ่อนไหวในการตอบสนองต่อน้ำหนักกระทำซ้ำต่อวัสดุ โดยทั่วไปจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าโมดูลัสคืนตัว ตามประเภทวัสดุมวลรวม

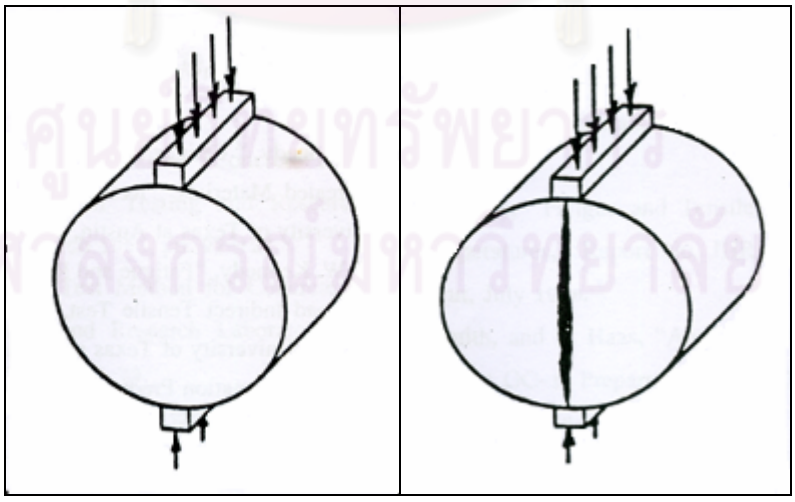
วัสดุโครงสร้างทางเดิม:หินคลุก (50:50)	2,500 – 5,000 MPa
หินคลุก	3,000 – 6,000 MPa
กรวดธรรมชาติ (PI<10, CBR>30)	2,000 – 4,000 MPa

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

2.1.4 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ประกอบด้วยการทดสอบดังต่อไปนี้

2.1.4.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) กระทำโดยการให้น้ำหนักทดสอบที่เป็นแรงกด (Compression load) ซึ่งอาจเป็นไปได้ทั้งแบบอัตราคงที่ (Static load) หรือแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) โดยที่ให้น้ำหนักกระทำตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การให้น้ำหนักกระทำก้อนตัวอย่างและลักษณะการแตกร้าวของก้อนตัวอย่าง

ที่มา : ชัยธันว์ พรหมศร และคณะ (2546)

ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ที่เกิดขึ้นกับก้อนตัวอย่าง สามารถหาได้จากสมการ 2.1

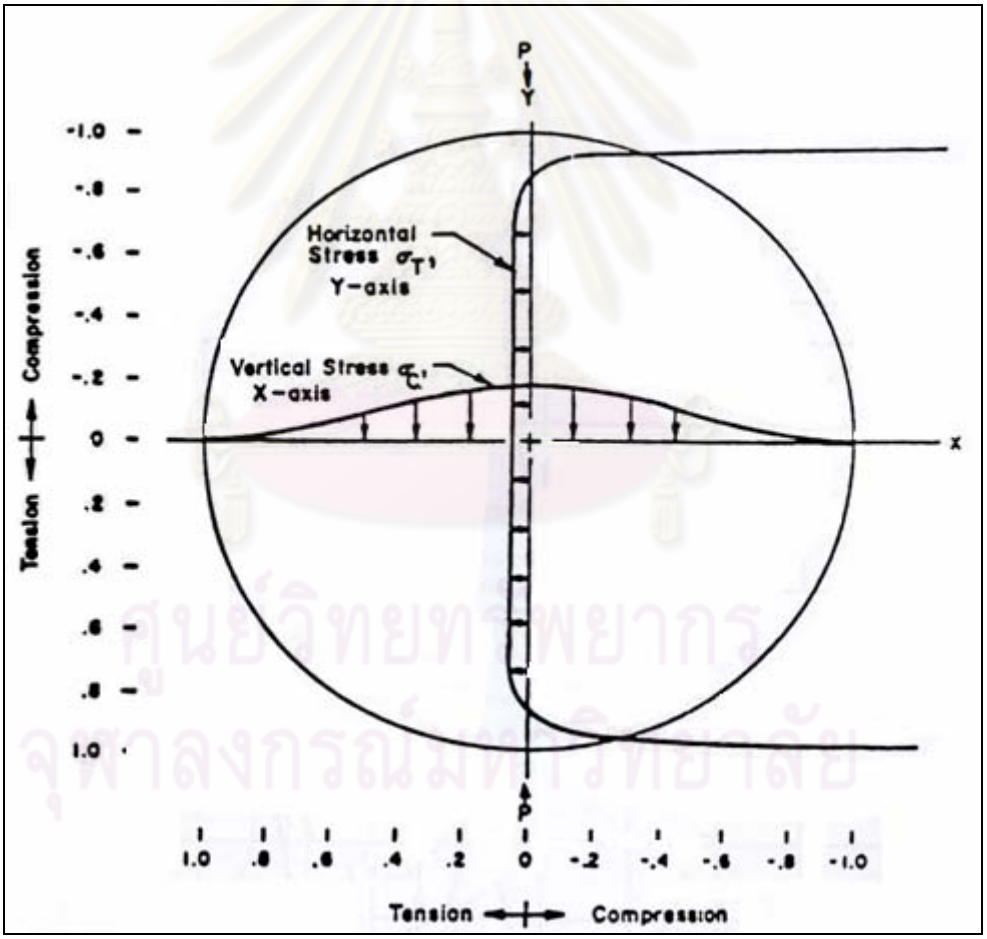
$$ITS = \frac{2P}{\pi DT} \qquad (2.1)$$

เมื่อ ITS คือ ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (เมกกะปาสคาล)
P คือ แรงกระทำสูงสุด (นิวตัน)
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
T คือ ความหนาเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

การให้น้ำหนักต้องกระทำผ่านแท่งกดน้ำหนักที่เป็นสแตนเลสที่มีขนาดแนะนำให้ใช้ดังนี้ สำหรับกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร ควรใช้แท่งกดที่มีความกว้างประมาณ 13 มิลลิเมตร และสำหรับกรณีที่ก้อนตัวอย่างมีความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 มิลลิเมตรควรใช้แท่งกดที่มีความกว้างประมาณ 19 มิลลิเมตร โดยที่แท่งกดน้ำหนักดังกล่าวมีด้านสัมผัสกับผิวของก้อนตัวอย่างทดสอบเป็นส่วนโค้งที่รัศมีเท่ากับรัศมีของก้อนตัวอย่างทำให้สามารถแนบชิดกันได้พอดี เพื่อประโยชน์ในการกระจายน้ำหนักและในการรักษาพื้นที่ที่น้ำหนักกระทำให้คงที่ ซึ่งการให้น้ำหนักในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแนวของการให้น้ำหนักหรือแนวเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่ง ซึ่งในที่สุดจะส่งผลให้ก้อนตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวขึ้นมาตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเนื่องจากการให้น้ำหนักแบบคงที่หรือการให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำก็ตาม โดยมีลักษณะการกระจายของความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นภายในก้อนตัวอย่างทดสอบทั้งในแนวราบและแนวดิ่งขณะทำการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.11 และจะสังเกตเห็นได้ว่าที่บริเวณกึ่งกลางของก้อนตัวอย่างทดสอบความเค้นอัด (Compression Stress) ที่เกิดขึ้นในแนวดิ่งจะมีขนาดประมาณ 3 เท่าของความเค้นดึง (Tensile Stress) ที่เกิดขึ้นในแนวราบ ดังนั้นจึงทำให้แน่ใจได้ว่าผลการทดสอบที่ได้รับเป็นคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุ มิได้มีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวิธีการทดสอบแต่อย่างใด

ชัยธันว์ พรหมศร และคณะ (2546) ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทดสอบวัสดุแบบแรงดึงทางอ้อมโดยสามารถสรุปถึงข้อดีของวิธีการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

- วิธีการทดสอบมีลักษณะเรียบง่ายไม่ซับซ้อน
- ลักษณะการแตกร้าวของวัสดุ เกิดขึ้นที่บริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ
- การทดสอบไม่มีผลจากสภาพผิวของวัสดุทดสอบ ทำให้แน่ใจได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง

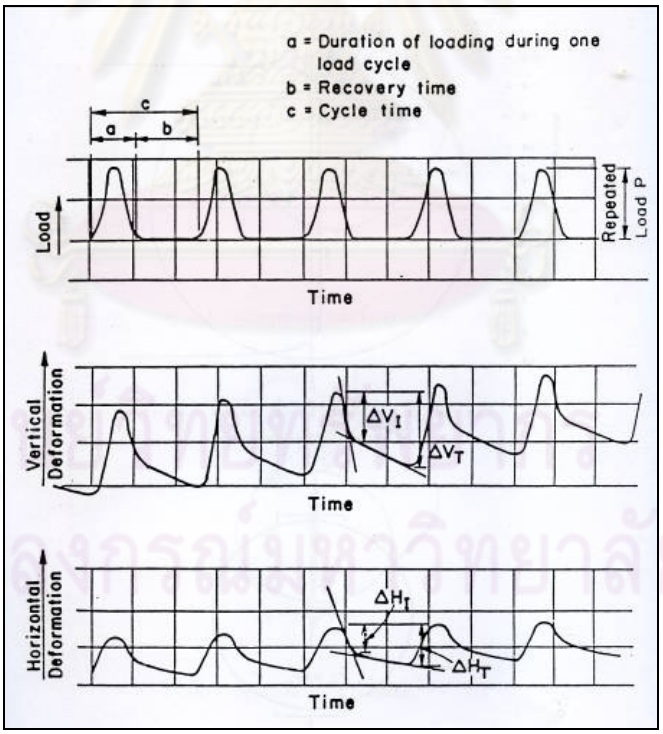


ภาพที่ 2.11 ลักษณะการกระจายของความเค้นดึงและความเค้นอัด
ในการทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม
ที่มา : ชัยธันว์ พรหมศร และคณะ (2546)

2.1.4.1 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) เป็นรูปแบบการให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (Repeated load) กับก้อนตัวอย่างในลักษณะ Haversine ซึ่งจะมีการรักษาค่า Preload ไว้ในปริมาณเล็กน้อย เพื่อรักษาสภาพในการสัมผัสที่สม่ำเสมอระหว่างแท่งกดน้ำหนักกับผิวของก้อนตัวอย่างโดยการกระทำการให้น้ำหนักสลับกับการหยุดพักน้ำหนักซ้ำไปมา โดยตรวจสอบและบันทึกค่า Deformation ทั้งแนวราบและแนวดิ่ง แต่จะให้ความสนใจเฉพาะในส่วนของค่า Recoverable Deformation ซึ่งพิจารณาได้จากสมมติฐานที่ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Deformation มีลักษณะเป็นเส้นตรงตามที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.12

ค่าเหล่านี้จะนำมาใช้การคำนวณหาค่า Resilient Modulus of Elasticity นอกจากนี้การทดสอบแบบนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่า Permanent Deformation ที่อาจจะเกิดขึ้นเนื่องมาจาก Repeated Load ได้อีกด้วย

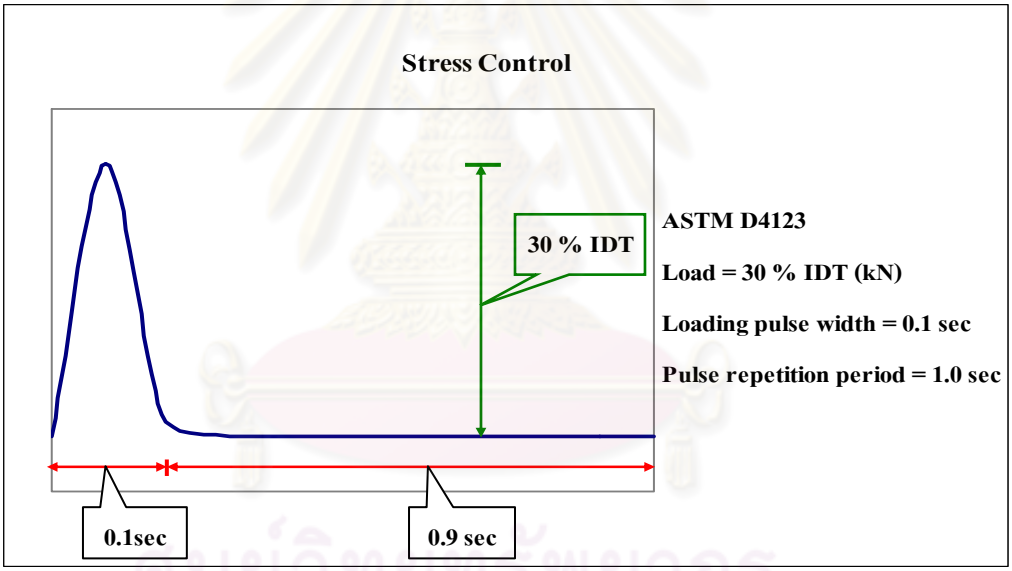


ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load – Deformation ที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบ Repeated – Load Indirect Tensile Test

ที่มา: ชัยธันว์ พรหมศร (2541)

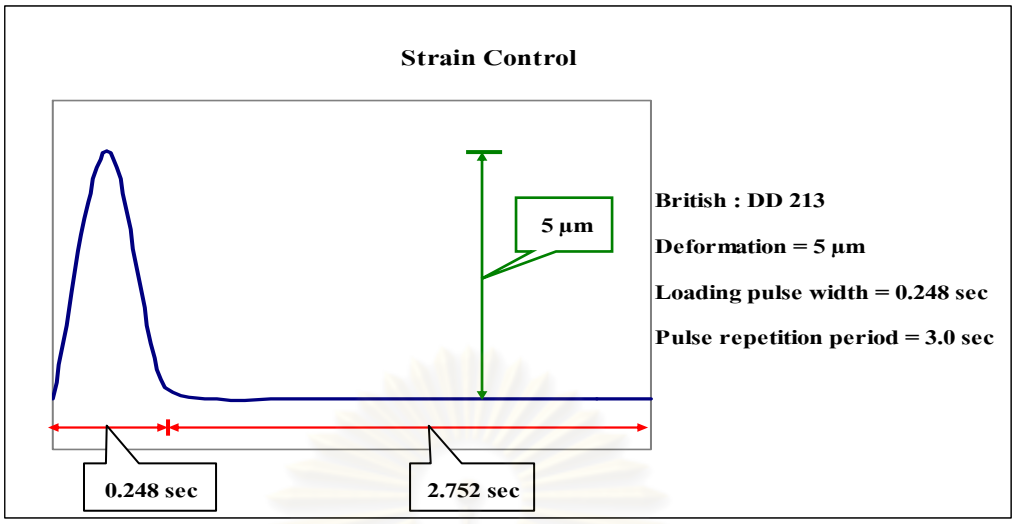
การให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำสามารถแบ่งลักษณะแรงกระทำออกเป็น 2 วิธีคือ การทดสอบแบบควบคุมความเค้นที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (Stress-Control Test) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา และอีกวิธีหนึ่งคือการทดสอบแบบควบคุมความเครียดที่กระทำต่อก้อนตัวอย่าง (Strain-Control Test) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตค่อนข้างบาง (ชัยธันว์ พรหมศร, 2541)

มาตรฐาน ASTM D4123 มีภาพแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในภาพแบบ Haversine Wave ทุก ๆ 1 วินาที ซึ่งแบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยให้น้ำหนักกระทำเท่ากับร้อยละ 30 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (IDT) ในอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ



ภาพที่ 2.13 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแบบควบคุมความเค้น (Stress-Control Test)

มาตรฐาน British: DD213 มีภาพแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในภาพแบบ Haversine Wave ทุก ๆ 3 วินาที ซึ่งแบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 0.248 วินาที และเวลาพักเท่ากับ 2.752 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบโดยประมาณเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (μm)



ภาพที่ 2.14 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแบบควบคุมความเครียด (Strain-Control Test)

จากมาตรฐานที่ได้กล่าวมาข้างต้น การศึกษานี้ได้ประยุกต์การให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (µm) ตามมาตรฐาน British: DD 213 เนื่องจากถนนลาดยางของประเทศไทยมีความหนาที่ค่อนข้างบาง แต่ได้เปลี่ยนช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเท่ากับ 0.1 วินาที และเวลาพักเท่ากับ 0.9 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM D4123 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สามารถจำลองความถี่ที่เกิดจากปริมาณจราจรได้ใกล้เคียงมากกว่า โดยค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถคำนวณได้จากค่าความสัมพันธ์ของสมการ 2.2 และสมการ 2.3

$$E = \frac{P(\upsilon + 0.27)}{h_c H} \tag{2.2}$$

$$\varepsilon = \frac{H}{D} \tag{2.3}$$

โดยที่ E คือ ค่าโมดูลัสคืนตัวโดยประมาณ (เมกกะปาสคาล)

P คือ น้ำหนักกระทำสูงสุด (นิวตัน)

υ คือ ค่า Poisson's Ratio โดยประมาณ

h_c คือ ความสูงของก้อนตัวอย่างโดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)

H คือ ระยะการคืนตัวในแนวนอนทั้งหมด (มิลลิเมตร)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

ε คือ ค่าการคืนตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมเกียรติ เตรียมแจ้งอรุณ (2527) ศึกษาพบว่า แม้การปรับปรุงสภาพโดยการผสมเย็น (Cold Recycling) จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงลง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในการผสม แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ คือการกระจายขนาดของวัสดุมวลรวมไม่ทั่วถึงกัน ไม่สามารถผสมวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material) เหมือนเช่นการผสมร้อนแอสฟัลต์เก่าและใหม่ไม่สามารถละลายและไหลให้เข้ากันได้ดี

ดังนั้นการปรับปรุงสภาพโดยการผสมเย็นจึงไม่แข็งแรงเท่ากับการปรับปรุงสภาพโดยการผสมร้อน (Hot-Mix Recycling) ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมักใช้วัสดุที่ทำการปรับปรุงสภาพโดยการผสมเย็นกับถนนที่มีการจราจรต่ำ

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากเมื่อใช้วิธีการผสมเย็นได้แก่ การเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารปรับปรุงสภาพที่ถูกต้อง ความเข้าใจในลักษณะโครงสร้างของชั้นทาง การจราจรเดิม ความต้องการแก้ไขโครงสร้างชั้นทางและการเพิ่มวัสดุมวลรวมใหม่ ควรมีการทดสอบคุณสมบัติที่เหมาะสม การใช้ขบวนการหรือโรงงานในการผสมที่ถูกต้อง

Khweir et al. (2002) ศึกษาพบว่า ในกระบวนการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ต้องทำให้ส่วนผสมมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการใช้โฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพของชั้นทางเก่านั้น ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งเพราะจะส่งผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสม คือ ขนาดคละของมวลรวม (Aggregate Grading) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และปริมาณโฟมแอสฟัลต์ในส่วนผสม

สำหรับขนาดคละของมวลรวมจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากจะเป็นตัวกำหนดความพรุนของส่วนผสม ซึ่งจะส่งผลต่อความทนทาน (Durability) ของส่วนผสมด้วย นอกจากนี้มวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. จะต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้โฟมแอสฟัลต์สามารถยึดเกาะส่วนผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปริมาณความชื้นในส่วนผสม จะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการบดอัดของส่วนผสม ปริมาณความชื้นที่มากเกินไปจะขัดขวางการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมทำให้การบดอัดส่วนผสมได้ค่าความหนาแน่นที่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องพยายามให้ส่วนผสมมีระดับความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ซึ่งจะทำให้สามารถบดอัดส่วนผสมให้เข้าใกล้ความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) ได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่

เหมาะสมในส่วนผสม ยังส่งผลถึงความแข็งแรงและความทนทานของส่วนผสม (Strength and Durability) ด้วย

Akeroyd (1989) ศึกษาพบว่า ขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับโฟมแอสฟัลต์ ควรจะมีปริมาณส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) อย่างน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ต้องไม่มากเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ วัสดุมวลรวมที่มีส่วนประกอบของดินเหนียว (Clay) หรือมีความชื้นอยู่มากเกินไป สามารถนำปูนขาวมาผสมเพื่อลดอิทธิพลจากสิ่งดังกล่าวได้ ในทางเศรษฐศาสตร์พบว่า การใช้โฟมแอสฟัลต์ในงานบำรุงทางสามารถช่วยลดงบประมาณลง 25 เปอร์เซ็นต์ และลดปริมาณการใช้พลังงานลงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการบำรุงทางด้วยวิธีผสมร้อน (Hot Recycling)

Ruckel et al. (1983) ศึกษาพบว่า ปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวม (Aggregate Moisture) เป็นข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสม เนื่องจากความชื้นมีส่วนช่วยในการบดอัด โดยจะไปทำลายการจับตัวเป็นก้อนของมวลรวมและทำให้โฟมแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวได้ทั่วถึงทั้งส่วนผสม ค่าปริมาณความชื้นของมวลรวมที่เหมาะสม (Optimum Aggregate Moisture) สามารถหาได้จากค่าปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ทำให้ส่วนผสมมีค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) ภายหลังการบดอัดแล้ว เมื่อทราบค่าปริมาณความชื้นของมวลรวมที่เหมาะสมแล้ว จะทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณโฟมแอสฟัลต์ในหลาย ๆ ค่า เพื่อหาปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมต่อไป

Maccarrone et al. (1995) ศึกษาส่วนผสมเย็น (Cold Mix) ทั้งที่ได้จากการผสมโฟมแอสฟัลต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน และให้คำแนะนำว่า การเคลือบมวลรวมของแอสฟัลต์เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในงานผสมเย็น เพื่อให้แน่ใจว่าส่วนผสมนั้นมีความต้านทานต่อความชื้นที่เพียงพอ ในกรณีของชั้นผิวทาง วัสดุมวลรวมจำเป็นจะต้องถูกเคลือบในทุกส่วนไม่ว่าขนาดใหญ่หรือเล็ก ขณะที่ในกรณีของชั้นพื้นทาง การเคลือบวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่ จะไม่ใช่จุดที่ต้องเน้นมากนัก เพียงแต่ต้องมั่นใจว่า ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำในชั้นผิวทางและระบบระบายน้ำมีคุณภาพเพียงพอ

การกระจายตัวเข้าไปเคลือบวัสดุมวลรวมของแอสฟัลต์นั้น ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของมวลรวม ดังนั้น แอสฟัลต์มีแนวโน้มที่จะกระจายตัวเข้าไปเคลือบวัสดุที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่า นอกจากนี้ความสามารถในการกระจายตัวของแอสฟัลต์ยังขึ้นอยู่กับความหนืดด้วย โดยพบว่า แอสฟัลต์ที่มีความหนืดต่ำจะมีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีกว่า

Maccarrone et al. (1994) ร่วมกันทำการศึกษาเกี่ยวกับโฟมแอสฟัลต์ พบว่า ที่ปริมาณน้ำ 2.6% ที่ฉีดเข้าไปในแอสฟัลต์ร้อน ทำให้เกิดโฟมที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด คือมีค่าการขยายตัวประมาณ 15 เท่า และค่าครึ่งชีวิต ประมาณ 60 วินาที โดยมีการผสมสารผสมเพิ่ม (Additive) เข้าไป 0.7 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลให้โฟมที่เกิดขึ้นมีคุณภาพสูง

สำหรับการเตรียมตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้เน้นกระทำโดยใช้เครื่องบดอัดแบบ Gyratory Compactor ซึ่งอ้างอิงจำนวนรอบและแรงกดในการบดอัด ตามมาตรฐาน Standards Australia (1993 a) ดังตารางที่ 2.7 ภายหลังจากการบดอัด ตัวอย่างจะนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 60˚C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งสภาพการบ่มดังกล่าว ได้รับการแนะนำว่าเป็นการจำลองถึงสภาพจริงในสนามภายหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จเป็นเวลาประมาณ 12 เดือน

ตารางที่ 2.7 การบดอัดด้วยเครื่อง Gyratory Compactor ที่ Maccarrone ใช้ในการศึกษา

Mold diameter (mm)	Gyratory Compaction condition
100	150 cycle (2˚ and 240 kPa)
150	150 cycle (3˚ and 540 kPa)

ที่มา : Maccarrone et al. (1994)

วรภัทร เกตุนุติ (2546) ได้ศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการนำโฟมแอสฟัลต์มาปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย ในการศึกษาพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุชั้นทางเก่าในปริมาณที่แตกต่างกันโดยกำหนดสัดส่วนร้อยละ 80 50 และ 0 ผสมเข้ากับวัสดุมวลรวมใหม่ ผลการออกแบบพบว่าส่วนผสมต้องการปริมาณโฟมแอสฟัลต์ในอัตราส่วนร้อยละ 2.1 2.6 และ 3.4 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม ตามลำดับ แม้ว่าส่วนผสมที่มีวัสดุเก่าผสมอยู่ปริมาณมากกว่าจะมีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต่ำ แต่จะมีอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงหลังจากการแช่น้ำ

การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน สำหรับความต้านทานต่อการล้าและการยุบตัวถาวร ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้สมรรถนะในการใช้งาน พบว่าการผสมวัสดุชั้นทางเก่าลงในส่วนผสมสามารถกระทำได้ถึงร้อยละ 50 โดยที่ความสามารถในการต้านทานต่อการล้าและการยุบถาวรของส่วนผสมไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก

Roberts et al. (1984) ได้ร่วมกันศึกษาโดยมีจุดประสงค์เพื่อประเมินค่าความเป็นไปได้ของการใช้โฟมแอสฟัลต์ในงานปรับปรุงสภาพชั้นทางเก่าด้วยวิธีผสมเย็น (Cold Recycling) การวิจัยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) จากวิธีการบ่ม (Curing Method) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt Content) ในส่วนที่สองเปรียบเทียบส่วนผสมที่ใช้โฟมแอสฟัลต์กับส่วนผสมที่ใช้คัทแบคแอสฟัลต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน จากผลการทดสอบพบว่า

- อุณหภูมิในการบ่มที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสมมีค่าสูงขึ้น
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสมมีค่าลดลงมากกว่า 50% ภายหลังจากการบ่มและทดสอบที่สภาพผ่านการแช่น้ำ (Wet Condition)
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นถึง 75% หลังจากบ่มเป็นเวลา 4 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าอุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 75°F เป็น 140°F ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มในอัตราที่น้อยกว่าส่วนผสมที่เริ่มบ่มที่อุณหภูมิ 140°F
- ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์สามารถบดอัดได้ความหนาแน่นสูงกว่าส่วนผสมอื่น ๆ

Chiu et al. (2002) ร่วมกันศึกษาคุณสมบัติของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์เพื่อประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุงานทางสำหรับประเทศไต้หวัน โดยนำโฟมแอสฟัลต์เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่เตรียมขึ้นใน 2 สัดส่วน คือ สัดส่วนที่ 1 ใช้วัสดุชั้นทางเก่าผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่ในอัตราส่วน 80 : 20 สัดส่วนที่ 2 ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของการเติมวัสดุผสมเพิ่มต่อส่วนผสมโดยการเพิ่มส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ 1.5% กับเถ้าลอย 1.5% และ การเพิ่มส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ 1.5% กับตะกรันเหล็ก 1.5% ลงในส่วนผสม ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนของมวลรวมที่มีส่วนประกอบของวัสดุเก่าต้องการปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่น้อยกว่า เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมของวัสดุเก่า นอกจากนี้ส่วนผสมที่ได้ยังมีอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพผ่านการแช่น้ำต่อสภาพแห้ง (Retained Strength) สูงกว่าส่วนผสมที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมด แสดงให้เห็นข้อดีของการนำวัสดุเก่ามาเป็นส่วนผสม สำหรับผลของการผสมเพิ่มที่ใช้พบว่า การใช้ตะกรันเหล็กจะทำให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาสมรรถนะในการใช้งานของส่วนผสมโดยการทดสอบหาความต้านทานต่อการล้าพบว่า ส่วนผสมที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมดมีความต้านทานสูงกว่ามาก ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณภาพของวัสดุเป็นสำคัญ

Muthen (1999) ศึกษาพบว่า ข้อดีในการใช้โฟมแอสฟัลต์เป็นสารปรับปรุงสภาพมีดังนี้

1. ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงเฉือนให้ส่วนผสม ช่วยให้ความแข็งแรงของส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ แต่ส่วนผสมจะมีความยืดหยุ่นและความต้านทานต่อการล้าที่ดีกว่า

2. โฟมแอสฟัลต์สามารถนำไปปรับปรุงสภาพวัสดุมวลรวมได้หลายประเภท

3. ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ใช้แอสฟัลต์จำนวนน้อยเป็นส่วนผสม ดังนั้นจึงสามารถลดค่าแอสฟัลต์และการขนส่งลง

4. ภายหลังจากการบดอัดในการก่อสร้าง โดยมากจะสามารถเปิดการจราจรได้ทันที

5. ประหยัดเชื้อเพลิงเนื่องจากไม่ต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม

6. ลดปัญหาด้านมลพิษจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

7. กระบวนการก่อสร้างสามารถกระทำในสภาพเย็นจัดหรือมีฝนตกเล็กน้อยได้

8. ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์สามารถเก็บไว้ได้นานก่อนการบดอัดโดยปราศจากการแยกตัวของแอสฟัลต์

Koender et al. (2002) พบว่า โฟมแอสฟัลต์นอกจากจะนำไปใช้ในการปรับปรุงสภาพชั้นทางเก่าในงานผสมเย็น (Cold Recycling) แล้ว ยังนำไปใช้ในกระบวนการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 80 -120˚C) โดยใช้วิธีการผสมแอสฟัลต์ที่มีเกรดอ่อน (Soft Grade) กับแอสฟัลต์ที่มีเกรดแข็ง (Hard Grade) รวมเข้ากับวัสดุมวลรวมในสองขั้นตอน

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการผสมแอสฟัลต์ที่มีเกรดอ่อนกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิประมาณ 100˚C จากนั้นจึงนำแอสฟัลต์เกรดแข็งที่อยู่ในรูปของโฟมแอสฟัลต์เข้าไปผสม จากการทดสอบส่วนผสมที่ได้ในห้องปฏิบัติการ ทั้งความสามารถในการบดอัด (Workability) ที่วัดจากเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ค่าเสถียรภาพของส่วนผสม (Mixture Stability) ที่ได้จากการทดสอบ Dynamic Creep Test และความต้านทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) พบว่าส่วนผสมที่ได้ มีคุณสมบัติและคุณภาพที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ได้จากกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูง (Hot mix) อีกทั้งยังมีข้อดีคือ สามารถช่วยประหยัดเชื้อเพลิง และลดปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการผลิต

Ramanujam (1997) ได้ศึกษาคุณสมบัติส่วนผสมของโฟมแอสฟัลต์ในภาคสนาม พบว่าค่าการโก่งตัว (Deflection) ของชั้นทางโฟมแอสฟัลต์ ภายหลังการปูแล้วเสร็จเป็นเวลา 1 วัน มีค่าน้อยกว่า 0.72 มม. บ่งชี้ให้เห็นว่า ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์สามารถพัฒนากำลัง และมีประสิทธิภาพ

ในการรองรับการจราจรได้อย่างรวดเร็ว โดยที่ผิวหน้าของชั้นทางโฟมแอสฟัลต์ไม่ปรากฏร่องรอยของความเสียหาย ถึงแม้จะปูชั้นผิวทางทับหลังจากนั้นเป็นเวลาถึง 2 สัปดาห์

Ruckel et al. (1982) พบว่า ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์แม้จะนำไปปูเป็นชั้นผิวทาง (Surface Course) เป็นระยะทางกว่า 100 ไมล์ ในแถบอเมริกาเหนือ แต่โดยทั่วไปแล้วส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์จะนำไปใช้เป็นชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง (Base or Subbase Course) ซึ่งภายหลังจะปูทับด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นผิวทางอีกชั้นหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าประเทศต่าง ๆ ที่มีการพัฒนาการใช้งานโฟมแอสฟัลต์ ต่างอ้างอิงวิธีการออกแบบและวิธีการประเมินค่าส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เกิดปัญหาด้านการวิจัยและพัฒนาร่วมกัน ดังแสดงตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 วิธีการออกแบบและวิธีการประเมินค่าส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ของประเทศต่าง ๆ

วิธีการออกแบบและวิธีการประเมินค่าส่วนผสม	ประเทศที่ใช้
Hveem	ออสเตรีย, นิวซีแลนด์, แอฟริกาใต้
Resilient modulus	ออสเตรีย, แอฟริกาใต้
Marshall	เยอรมนี, สหราชอาณาจักร, ญี่ปุ่น
Split Tensile	ฝรั่งเศส
Vane shear	แอฟริกาใต้
CBR	ออสเตรีย, นิวซีแลนด์
Unconfined	ฝรั่งเศส

ที่มา : Ruckel et al. (1982)

Wijk และ Wood (1983) ในปี ค.ศ. 1981 รัฐอินเดียนา ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการริเริ่มก่อสร้างถนนระยะทาง 14 กิโลเมตร โดยนำโฟมแอสฟัลต์มาปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าให้กลับมาใช้งานใหม่ ใช้วิธีการปรับปรุงสภาพด้วยวิธีการผสมเย็น (Cold-mix Recycling) ชั้นทางเก่าจะถูกขุดรื้อแล้วขนส่งไปยังโรงงานเพื่อนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregate) ในอัตราส่วน 3 : 1 วัสดุมวลรวมที่ได้นำไปผสมกับโฟมแอสฟัลต์ในอัตราส่วน 1.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม สำหรับวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 2.9

จากการศึกษาพบว่า ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของส่วนผสมในระหว่างการบดอัดเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและการก่อสร้าง และจากผลการทดสอบหลังการเปิดใช้ถนนไป 8 เดือนพบว่า ถนนยังคงอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดี ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการนำโฟมแอสฟัลต์มาปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าให้กลับมาใช้นั้น น่าจะแพร่หลายในอนาคต

ตารางที่ 2.9 การก่อสร้างและมาตรฐานของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ที่ Wijk และ Wood ศึกษา

Item	Specification
Foamed asphalt	
Asphalt Concrete	AC-5
Mixing temperature	330° ± 15°F
Amount of water	2 percent by weight of asphalt
Expansion ratio	10
Half-life	20 sec
Temperature during processing	> 50°F
Milled material	
Maximum size	3 in.
Free moisture during mixing	2.5 - 3.5 percent
Additional aggregate	
Grading	Meeting section 903 of ISHC standard specification
Course aggregate	Meeting requirements of class C aggregate
Free moisture during mixing	2.5 - 3.5 percent
Geometry of pavement	
Minimum thickness of recycled base	5 in.
Construction	Constructed section must be open to two-way traffic during nonwork periods and be graded and compacted

Note: ISHC-Indiana State Highway Construction.

ที่มา : Wijk และ Wood (1983)

Bergeron (1992) ศึกษาการทดสอบภาคสนามพบว่า ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ต้องการเวลาในการบ่มน้อย เมื่อเทียบกับการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน จึงส่งผลกระทบต่อการจราจรไม่มากนัก อีกทั้งพบว่าอัตราการบ่ม (Curing Rate) หรืออัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ จะได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศไม่มากนัก ในขณะที่สภาพอากาศที่ชื้นและเย็นในช่วงการก่อสร้าง จะส่งผลอย่างชัดเจนต่ออัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ คือ การศึกษากระบวนการก่อสร้าง การเก็บตัวอย่างวัสดุในสนาม การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม การทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ การเตรียมก้อนตัวอย่างส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ และการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษากระบวนการก่อสร้าง

ศึกษากระบวนการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่แบบผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) ในการบูรณะทางหลวงหมายเลข 304 บริเวณจุดเริ่มทางเลี่ยงเมืองปักธงชัย อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ระหว่าง กม.95+653 - กม.101+000 (อำเภอปักธงชัยมุ่งหน้าสู่อำเภอวังน้ำเขียว) ก่อสร้างโดยงบประมาณของกรมทางหลวง ซึ่งเป็นโครงการแรกในประเทศไทยที่นำโฟมแอสฟัลต์ ซึ่งได้รับการพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่

รวบรวมข้อมูลรายละเอียดของกระบวนการก่อสร้างในสนาม เช่น เครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง ขั้นตอนการก่อสร้าง และปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง

3.2 การเก็บตัวอย่างวัสดุในสนาม

เนื่องจากการศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

- รูปแบบที่ 1 ผสมและบดอัดในสนาม
- รูปแบบที่ 2 ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ
- รูปแบบที่ 3 ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

การเก็บตัวอย่างวัสดุในสนาม จึงแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ กล่าวคือ

3.2.1 การเจาะเก็บก้อนตัวอย่าง (Coring)

การเจาะเก็บก้อนตัวอย่าง (Coring) คือ การจัดเก็บวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมโฟมแอสฟัลต์ และได้ผ่านขั้นตอนการบดอัดในสนามเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 3.1 และ 3.2

ภาพที่ 3.1 การเจาะเก็บก้อนตัวอย่างในสนาม

ภาพที่ 3.2 ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากสนาม

3.2.2 การเก็บตัวอย่างวัสดุจากเครื่องผสม (Pug Mill)

การเก็บตัวอย่างวัสดุจากเครื่องผสม (Pug Mill) คือ การจัดเก็บวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ โดยการผสมโฟมแอสฟัลต์แล้ว แต่ยังไม่ได้ผ่านขั้นตอนการบดอัดในสนาม ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งการจัดเก็บวัสดุที่ผ่านขั้นตอนการผสมโฟมแอสฟัลต์แล้วนั้นจะต้องรักษาปริมาณความชื้นของส่วนผสมไว้ เนื่องจากปริมาณความชื้นในส่วนผสมมีผลต่อการบดอัด ดังนั้นในการจัดเก็บวัสดุดังกล่าวจึงต้องนำวัสดุใส่ถุงและมัดปากถุงให้สนิท เพื่อรักษาปริมาณความชื้นของส่วนผสม ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ภาพที่ 3.3 การเก็บตัวอย่างวัสดุจากเครื่องผสม (Pug Mill)

ภาพที่ 3.4 การเก็บตัวอย่างวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์แล้ว

3.2.3 การเก็บตัวอย่างวัสดุเพื่อนำมาเตรียมก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

การเก็บวัสดุเพื่อนำมาเตรียมก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ จะเก็บวัสดุจากบริเวณหน้างานที่ก่อสร้าง ซึ่งประกอบด้วย

- วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ถูกขูดไสขึ้นมาโดยเครื่องกัดถนน (Milling Machine) ซึ่งเป็นวัสดุที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3.5 และ 3.6
- วัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) เก็บจากกองวัสดุบริเวณหน้างานที่ก่อสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.5 การเก็บตัวอย่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม

ภาพที่ 3.6 วัสดุโครงสร้างทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP)

ภาพที่ 3.7 การเก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) จากกองวัสดุหน้างาน

3.3 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

วัสดุมวลรวมที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย วัสดุโครงสร้างทางเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) โดยมีส่วนผสม 2 ส่วนผสม คือ

- ส่วนผสม 1 สัดส่วน วัสดุโครงสร้างทางเดิม: วัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) เท่ากับ 70: 30 โดยน้ำหนัก
- ส่วนผสม 2 สัดส่วน วัสดุโครงสร้างทางเดิม: วัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) เท่ากับ 100: 0 โดยน้ำหนัก

3.3.1 การทดสอบหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม

ขนาดคละของวัสดุมวลรวมมีผลต่อการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ วัสดุมวลรวมที่เหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ ควรมีวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) อย่างน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากวัสดุมวลละเอียดจะสามารถจับตัวกับโฟมแอสฟัลต์ และทำหน้าที่เหมือนมอร์ต้ายึดเชื่อมระหว่างมวลรวมที่มีขนาดใหญ่

วัสดุมวลรวมที่มีวัสดุมวลละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ไม่เพียงพอ สามารถที่จะเพิ่มปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ลงไปในส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตามไม่ควรใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เกิน 2 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากจะทำให้ส่วนผสมมีความเปราะหรือลดความยืดหยุ่นลง ส่งผลถึงความต้านทานต่อความล้าของส่วนผสม (Fatigue Resistance)

วัดสุโครงสร้างทางเดิม (RAP) และหินฝุ่นที่นำมาจากบริเวณหน้างานก่อสร้าง จะนำมาทดสอบหาขนาดคละ โดยวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO T 27-70 และมาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท 204/2516

3.3.2 การทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด

ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบดอัดส่วนผสม ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม จะช่วยในการกระจายตัวของโฟมแอสฟัลต์ให้เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมได้ดี และทำให้บดอัดได้ความหนาแน่นที่สูงขึ้น ซึ่งในทางกลับกันปริมาณความชื้นที่มากเกินไป จะขัดขวางการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุมวลรวม ทำให้การบดอัดส่วนผสมได้ค่าความหนาแน่นที่ต่ำลง ดังนั้นจึงต้องพยายามให้ส่วนผสมมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content)

วัสดุมวลรวมที่ปรับขนาดคละได้ตามที่ต้องการแล้ว จะนำมาทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) โดยวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO T180 และ มาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท 108/2517 ดังแสดงในภาพที่ 3.8

ภาพที่ 3.8 การทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด

3.4 การทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ได้รับการบ่งชี้ด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญสองค่า คือค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อปริมาตรแอสฟัลต์เดิม และค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ซึ่งแสดงถึงเวลามีหน่วยเป็นวินาที ที่ปริมาตรสูงสุดของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นยุบตัวลงเหลือครึ่งหนึ่ง

คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่ดี ควรจะมีค่าการขยายตัวที่สูงพอที่จะสามารถกระจายตัวเข้าไปผสมในมวลรวมได้ดี และมีค่าครึ่งชีวิตที่นานพอที่จะคงสภาพโฟมให้สามารถผสมกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิห้องได้ ซึ่งคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ทั้งสองประการนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงคือ อุณหภูมิของแอสฟัลต์และปริมาณน้ำในส่วนผสม

ดังนั้นการทดสอบหาคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสม คือ การทดสอบหาอุณหภูมิของแอสฟัลต์และปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ที่มีค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสม โดยใช้วิธีการทดสอบอ้างอิงตาม Wirgten Cold Recycling Manual (2004)

3.5 การเตรียมก้อนตัวอย่างส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

การเตรียมก้อนตัวอย่างส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ก่อนการทดสอบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ กล่าวคือ

3.5.1 การเตรียมก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากในสนาม

เมื่อเจาะเก็บก้อนตัวอย่างมาจากในสนาม จะต้องนำก้อนตัวอย่างมาจัดเตรียมให้พร้อมก่อนที่จะทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- บันทึกรายละเอียดของก้อนตัวอย่างก่อนทำการตัด โดยจะบันทึกขนาดโดยรวมของก้อนตัวอย่าง พร้อมทั้งระบุแหล่งที่มาของก้อนตัวอย่าง
- ทำเครื่องหมายบนก้อนตัวอย่าง โดยแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็นสองส่วนคือส่วนบนและส่วนล่าง และนำก้อนตัวอย่างเข้าเครื่องตัดตัวอย่าง ซึ่งการตัดที่ดีนั้นก้อนตัวอย่างที่ได้จะต้องมีผิวหน้าที่เรียบและตั้งฉากกับผิวด้านข้าง ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ถึง 3.11
- ทำเครื่องหมายบนก้อนตัวอย่างที่ตัดแล้ว เพื่อวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 3.12 และชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง แล้วบันทึกค่าเพื่อใช้ในการทดสอบ

ภาพที่ 3.9 การทำเครื่องหมายเพื่อแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็นสองส่วน

ภาพที่ 3.10 การนำก้อนตัวอย่างเข้าเครื่องตัดตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ 3.11 ก้อนตัวอย่างที่ตัดเรียบร้อย

ภาพที่ 3.12 การวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง

3.5.2 การเตรียมก้อนตัวอย่างจากวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนาม และบดอัดในห้องปฏิบัติการ

เมื่อจัดเก็บวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมโฟมแอสฟัลต์ใส่ถุงมัดปากสนิทแล้ว การบดอัดในห้องปฏิบัติการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- นำส่วนผสมที่จัดเก็บมาจากในสนามไปใส่ใน Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (10 ซม.) โดยหนึ่งก้อนตัวอย่างจะใช้ส่วนผสมประมาณ 1,050 กรัม แล้วบดอัดโดยวิธีมาร์แชล (ด้านละ 75 ครั้ง)
- ทิ้งก้อนตัวอย่างไว้ใน Mold เป็นเวลา 24 ชม. แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างออก
- บ่มก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60˚C เป็นเวลา 72 ชม. แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างที่ได้ออกมาทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง เพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.5.3 การเตรียมก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

การเตรียมก้อนตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- จัดเตรียมวัสดุโครงสร้างทางเดิม ปูนซีเมนต์ น้ำ ตามสัดส่วนผสมที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพที่ 3.13 และนำมาผสมกับโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากเครื่องทำโฟมแอสฟัลต์ในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 3.14

- นำส่วนผสมที่ได้ไปใส่ใน Mold ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว (10 ซม.) โดยหนึ่งก้อนตัวอย่างจะใช้ส่วนผสมประมาณ 1,050 กรัม แล้วบดอัดโดยวิธีมาร์แชล (ด้านละ 75 ครั้ง) ดังแสดงในภาพที่ 3.15 และ 3.16
- ทิ้งก้อนตัวอย่างไว้ใน Mold เป็นเวลา 24 ชม. ดังแสดงในภาพที่ 3.17
- นำก้อนตัวอย่างออกจาก Mold และบ่มก้อนตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60˚C เป็นเวลา 72 ชม. แล้วจึงนำก้อนตัวอย่างที่ได้ออกมาทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง เพื่อรอการทดสอบต่อไป

ภาพที่ 3.13 การเตรียมส่วนผสมตามสัดส่วนที่ออกแบบไว้

ภาพที่ 3.14 เครื่องฉีดโฟมแอสฟัลต์และเครื่องผสมในห้องปฏิบัติการ

ภาพที่ 3.15 การนำส่วนผสมที่ได้ไปใส่ใน Mold ที่เตรียมไว้

ภาพที่ 3.16 การบดอัดส่วนผสมโดยวิธีมาร์แชล

ภาพที่ 3.17 การทิ้งก้อนตัวอย่างไว้ใน Mold

3.6 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

3.6.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength)

ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) คือ ค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของส่วนผสม สำหรับวิธีการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D6931 Standard Test Method for Indirect Tensile Strength of Bituminous Mixtures ในการทดสอบจะใช้เครื่องมือทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.18 โดยป้อนน้ำหนักกระทำด้วยอัตราเร็วคงที่ (Static Load) เท่ากับ 2 นิ้ว/นาที จนกระทั่งก้อนตัวอย่างพัง บันทึกค่าน้ำหนักกระทำสูงสุด เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมโดยใช้สูตรคำนวณตามสมการ 3.1 โดยมีลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.19

$$ITS = \frac{2P}{\pi DT} \qquad (3.1)$$

เมื่อ ITS คือ ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (เมกกะปาสคาล)

P คือ แรงกระทำสูงสุด (นิวตัน)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

T คือ ความหนาเฉลี่ยของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

ภาพที่ 3.18 เครื่องมือทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ภาพที่ 3.19 การจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

- รูปแบบที่ 1 ผสมและบดอัดในสนาม
- รูปแบบที่ 2 ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ
- รูปแบบที่ 3 ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบจะแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) ในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked ITS) และในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ (Soaked ITS) โดยจะทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C สำหรับการทดสอบในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำนั้น จะนำก้อนตัวอย่างแช่น้ำไว้ที่อุณหภูมิ 25˚C เป็นเวลา 24 ชม. ก่อนการทดสอบ

ในส่วนของการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ การทดสอบจะกระทำที่อุณหภูมิ 25˚C และ 40 °C เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 4, 7, 14, 28 และ 56 วัน นับจากวันที่นำออกจาก Mold โดยจะทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) เฉพาะในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked ITS) เท่านั้น

3.6.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

โมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus: MR) คือ ค่าที่แสดงถึงความอ่อนไหวในการตอบสนองต่อน้ำหนักที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งแสดงออกมาในรูปของค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม อ้างอิงตามมาตรฐาน British DD 213 Method for determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures และมาตรฐาน ASTM D 4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures

รูปแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในรูปแบบ Haversine Wave ทุก ๆ 1 วินาที (1 Hz.) ซึ่งแบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที โดยให้น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวราบโดยประมาณเท่ากับ 5 ไมโครเมตร (μm)

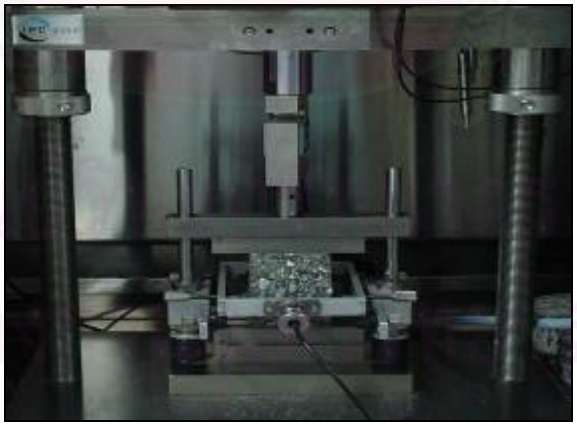
การเก็บข้อมูลและการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของเครื่อง UTM-5P ทำการคำนวณ โดยค่าโมดูลัสคืนตัวที่ใช้จะทำการทดสอบที่ 200 รอบก่อน แล้วทำการเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ย 5 ค่าสุดท้ายที่มีค่าการคืนตัวคงที่

โดยการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว จะต้องใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ช่วยในการคำนวณ ในการทดสอบครั้งนี้จะใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.35 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C และ 0.40 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 40°C

การคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวในการทดสอบจะกระทำจนกระทั่งจำนวนครั้งของการป้อนน้ำหนักถึงรอบที่ 200 ตามมาตรฐานกำหนดค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ผล จะได้จากค่าเฉลี่ยของ 5 ค่าสุดท้าย โดยใช้เครื่องมือทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.20 และมีลักษณะการจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.21

การทดสอบจะกระทำที่อุณหภูมิ 25°C และ 40°C เมื่อก้อนตัวอย่างโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการมีอายุ 4, 7, 14, 28 และ 56 วัน นับจากวันที่นำออกจาก Mold

ภาพที่ 3.20 เครื่องมือทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว



ภาพที่ 3.21 การจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

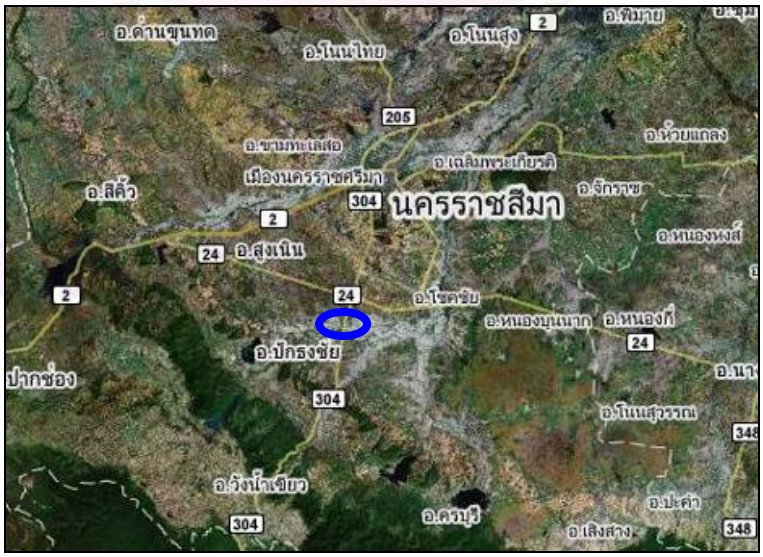
บทที่ 4

การศึกษาการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์

การศึกษาการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ ประกอบไปด้วย ที่ตั้งของโครงการ รายละเอียดของโครงการ รูปตัดของถนน ส่วนผสมที่ใช้ในการก่อสร้าง ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้าง เครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง กระบวนการก่อสร้าง และการตรวจสอบคุณภาพของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในการก่อสร้าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ที่ตั้งของโครงการ

โครงการงานจ้างเหมาทำการบูรณะทางผิวแอสฟัลต์โดยการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ ชนิดผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) ตั้งอยู่บริเวณทางหลวงหมายเลข 304 บริเวณจุดทางเลี่ยงเมืองปักธงชัย ระหว่าง กม. 95+653 - กม.101+000 (ด้านขาล่อง) อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 แผนที่แสดงที่ตั้งของโครงการ

ที่มา : http://maps.google.com

4.2 รายละเอียดของโครงการ

โครงการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์โดยการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ ชนิดผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) ดำเนินการโดยการขุดไสผิวทางเดิมลึก 15 เซนติเมตร ขึ้นมาปรับปรุงคุณภาพโดยใช้โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt) และปูผิวแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 5 เซนติเมตร โดยแบ่งลักษณะการก่อสร้างออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การก่อสร้างช่วงแรก (RAP 70) บริเวณช่วง กม. 98+300 – กม. 101+000 ด้านขาล่อง ก่อสร้างโดยการเพิ่มหินฝุ่นหนา 6 เซนติเมตร (เพื่อปรับปรุงขนาดคละให้มีวัสดุมวลละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ระหว่าง 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์) และขุดไสรวมกับโครงสร้างทางเดิมหนา 9 เซนติเมตร (วัสดุผิวทางเดิม 70 % : หินฝุ่น 30 % โดยน้ำหนัก)
2. การก่อสร้างช่วงหลัง (RAP 100) บริเวณช่วง กม. 95+653 – กม. 98+300 ด้านขาล่อง ก่อสร้างโดยการขุดไสโครงสร้างทางเดิมหนา 15 เซนติเมตร (วัสดุโครงสร้างทางเดิม 100 %)

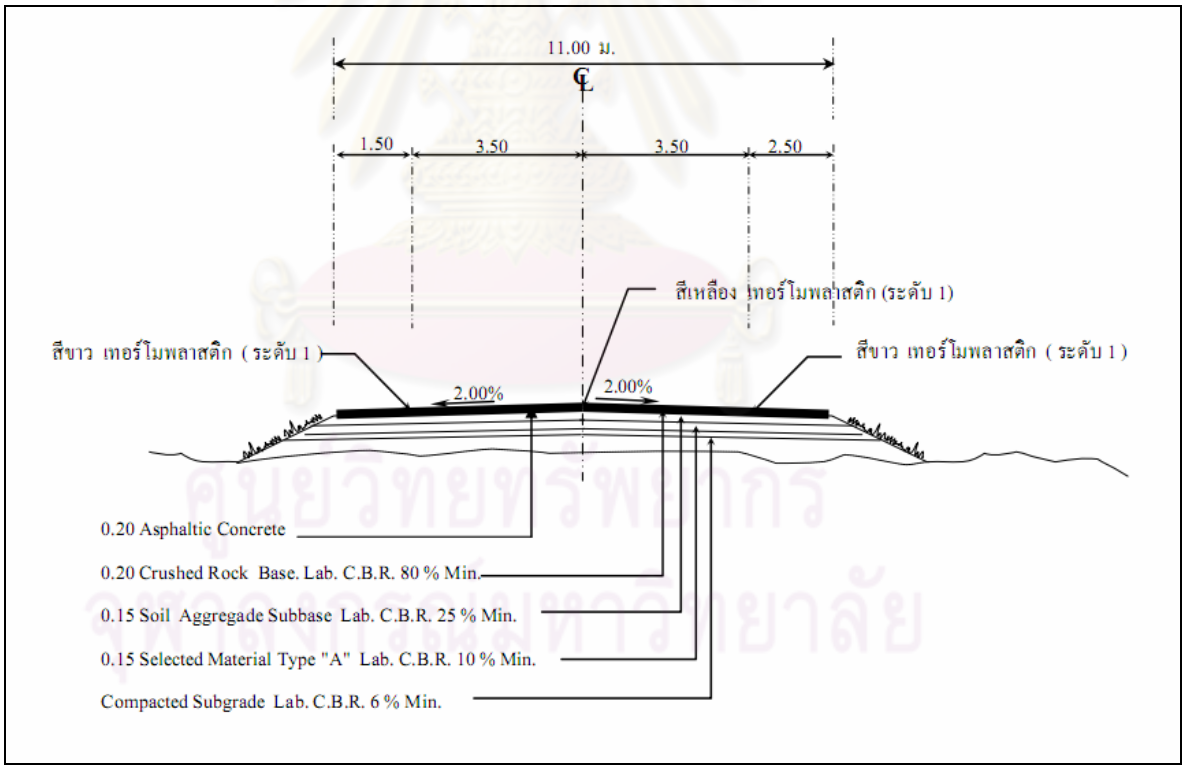
จากการตรวจสอบข้อมูลประวัติสายทางที่แขวงการทางนครราชสีมาที่ 2 พบว่า ทางหลวงหมายเลข 304 บริเวณ กม. 97+000 - กม. 98+300 (ด้านขาล่อง) มีชั้นโครงสร้างทางที่แตกต่างจากบริเวณอื่น จึงได้มีการเจาะสำรวจความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมบริเวณดังกล่าว พบว่า ชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมมีความหนาประมาณ 5 - 7 เซนติเมตร บนชั้นพื้นทางประเภท Soil Cement ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งกรณีดังกล่าวจะทำให้ส่วนประกอบของวัสดุมวลรวมเดิมที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ แตกต่างไปจากที่ระบุไว้ในการออกแบบส่วนผสม

ภาพที่ 4.2 การเจาะสำรวจความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม

จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้มีการปรับเปลี่ยนพื้นที่ก่อสร้างของโครงการตามที่ระบุไว้ จาก กม. 95+653 - กม. 101+000 (ด้านขาล่อง) เป็น กม. 94+253 - กม. 97+091 (ด้านขาล่อง) และ กม. 98+350 - กม. 101+000 (ด้านขาล่อง) แทน

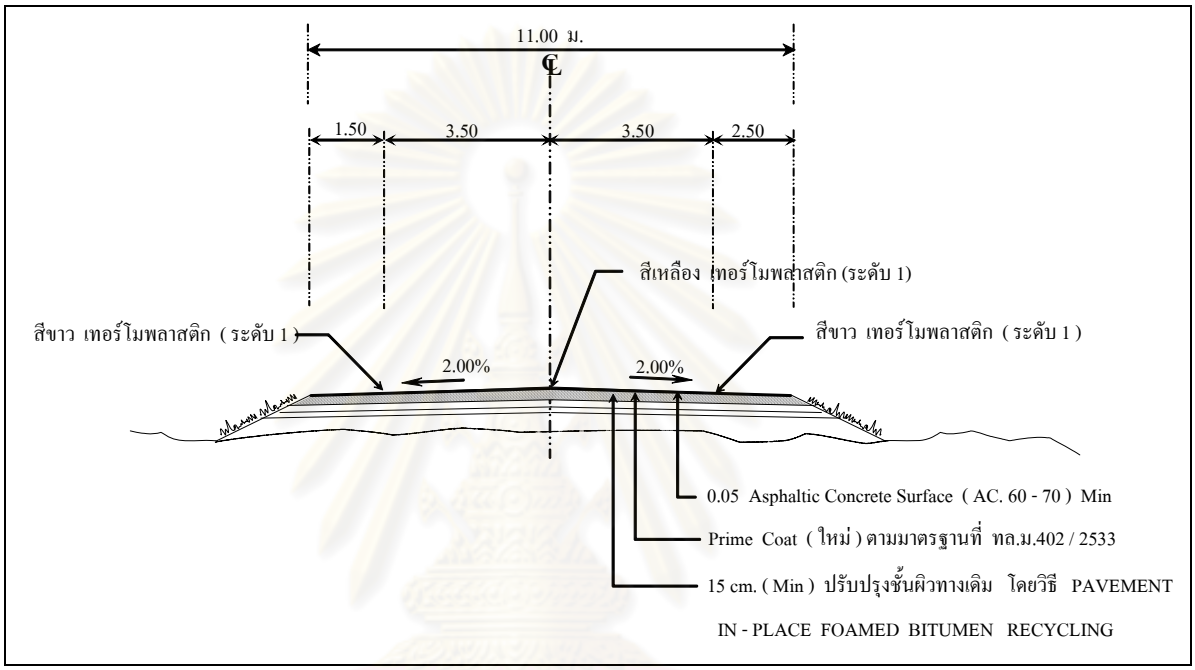
4.3 **รูปตัดของถนน** (Cross Section)

โครงสร้างของถนนก่อนการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์ประกอบด้วยชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 20 ซม. ชั้นพื้นทางหินคลุกหนา 20 ซม. ชั้นรองพื้นทางหนา 15 ซม. ชั้นวัสดุคัดเลือกประเภท ก. หนา 15 ซม. และชั้นดินเดิม ถนนมีความกว้างทั้งหมด 11 ม. แบ่งออกเป็นสองช่องจราจร กว้างช่องละ 3.50 ม. และมีไหล่ทางด้านในกว้าง 2.50 ม. ไหล่ทางด้านนอกกว้าง 1.50 ม. ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 รูปตัดของถนนก่อนการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์

โครงสร้างของถนนหลังการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์ประกอบด้วยชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตหนา 5 ซม. และชั้นพื้นทางใหม่ที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพของชั้นผิวทางเดิม หนา 15 ซม. ส่วนจำนวนช่องจราจร ความกว้างของช่องจราจรและไหล่ทางยังคงเหมือนเดิม ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 รูปตัดของถนนหลังการบูรณะผิวทางแอสฟัลต์

4.4 ส่วนผสมที่ใช้ในการก่อสร้าง

โครงการ Pavement Recycling โดยใช้ Foamed Asphalt ในการบูรณะทางหลวงหมายเลข 304 ตอน กม.55+207 (ต่อเขตแขวงฯ ปราจีน) - จุดเริ่มทางเลี่ยงเมืองปักธงชัย ระหว่าง กม.95+653 - กม.101+000 (ด้านขาล่อง) การก่อสร้างใช้สัดส่วนผสมที่ออกแบบโดยสำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองสัดส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสมมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมที่ใช้ในการก่อสร้าง

ลำดับที่	คุณสมบัติ	RAP : หินฝุ่น	RAP : หินฝุ่น
		70 : 30	100 : 0
1.	ปริมาณวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรง # 200	5.80%	0.70%
2.	ปริมาณยางแอสฟัลต์โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม	2.00%	
3.	ปริมาณปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม	1.00%	
4.	Indirect Tensile Strength (ITS)	352.6 kPa	306.7 kPa
5.	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	2.061 t/m^3	2.004 t/m^3
6.	Optimum Moisture Content	6.20%	6.00%
7.	สัดส่วนของน้ำในโฟมแอสฟัลต์	3.50%	
8.	อัตราการไหลของน้ำขณะทำโฟมแอสฟัลต์	12.6 l/h	
9.	แรงดันน้ำ	6.0 bars	
10.	แรงดันอากาศ	7.0 bars	
11.	อุณหภูมิของแอสฟัลต์	170 °C	
12.	Expansion Ratio	10 เท่า	
13.	Half Life	9 วินาที	

ตารางที่ 4.2 ขนาดคละของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบส่วนผสม

Sieve Sizes	% Passing by Weight		
	RAP	หินฝุ่น	RAP 70 : หินฝุ่น 30
3/4"	100.0		100
1/2"	86.6		92.0
3/8"	74.5	100.0	84.7
# 4	47.5	98.7	68.0
# 8	24.4	77.6	45.7
#16	12.6	48.4	26.9
#30	5.4	29.9	15.2
#50	2.5	21.8	10.2
#100	1.1	16.1	7.1
#200	0.7	13.5	5.8

4.5 ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้าง

ในการก่อสร้างต้องมีการควบคุมปริมาณวัสดุมวลรวม ยางแอสฟัลต์ที่ใช้เป็นส่วนผสมในการก่อสร้างให้มีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้วัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพมีคุณสมบัติตามที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อกำหนดในการควบคุมการก่อสร้าง

ลำดับที่	คุณสมบัติ	RAP : หินฝุ่น	RAP : หินฝุ่น
		70 : 30	100
1.	ปริมาณวัสดุมวลรวมที่ผ่านตะแกรง # 200	5.0 % - 7.5 %	< 5.0 %
2.	ปริมาณยางแอสฟัลต์โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม	2.0 % - 3.0 %	2.0 % - 2.5 %
3.	Indirect Tensile Strength (ITS)	> 317.3 kPa	> 276.0 kPa
4.	ความหนาแน่น	≥ 97 % Modified Proctor	

4.6 เครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ ชนิดผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) จะต้องใช้เครื่องกัดและผสมในตัว (Recycler) ซึ่งเป็นเครื่องจักรพิเศษที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ เครื่องจักรเกลี่ยปรับระดับ เครื่องจักรปูวัสดุ เครื่องจักรบดทับ และเครื่องจักรอื่น ๆ ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดของเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง

ลำดับที่	รายการ	ยี่ห้อ	รุ่น
1.	เครื่องกัดและผสมในตัว (Recycler)	Wirtgen	2200 CR
2.	เครื่องผสมซีเมนต์ (Cement Slurry Mixer)	Wirtgen	WM 1000
3.	เครื่องปูผิวทาง (Paver)	VOGELE	1800
4.	รถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 25 ตัน	BOMAG	BW 225 D
5.	รถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 18 ตัน	DYNAPAC	CC 42 A
6.	รถบดล้อยาง 9 ล้อ น้ำหนัก 12 ตัน	DYNAPAC	CP 201
7.	รถเกรดเกลี่ยแต่งดิน	CAT	140 H

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดของเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง (ต่อ)

ลำดับที่	รายการ	ยี่ห้อ	รุ่น
8.	รถตัก	CAT	950
9.	รถบรรทุก 10 ล้อ	NISSAN	CW 12 M
10.	รถบรรทุกน้ำ 10 ล้อ	NISSAN	CW 12 M
11.	รถบรรทุกน้ำมัน 6 ล้อ	NISSAN	CP 180
12.	รถพ่นยาง	HINO	KR 360
13.	รถไถใช้ลากหัวไม้กวาด	FORD	6640
14.	หัวไม้กวาดทำความสะอาดถนน	MIDWAY	34 TD

จากตารางที่ 4.4 เครื่องจักรหลักที่ใช้ในการก่อสร้าง ประกอบไปด้วยรถบรรทุกแอสฟัลต์ (AC 60-70) เครื่องผสมซีเมนต์ (Cement Slurry Mixer) เครื่องกัดและผสมในตัว (Recycler) และรถบดล้อเหล็ก (Smooth Drum Roller) ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ถึง 4.8 ตามลำดับ

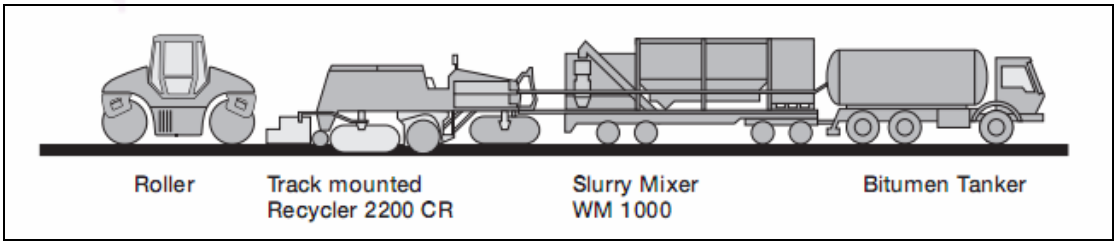
ภาพที่ 4.5 รถบรรทุกยางแอสฟัลต์เกรด 60-70 เพื่อใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์

ภาพที่ 4.6 เครื่องผสมซีเมนต์ (Cement Slurry Mixer)

ภาพที่ 4.7 เครื่องกัดและผสมในตัว (Recycler)

ภาพที่ 4.8 รถบดสั่นสะเทือนล้อเหล็ก (Smooth Drum Roller)

ในการก่อสร้างเครื่องจักรดังกล่าวจะต่อกันเป็นขบวนดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 โดยจากรถบรรทุกยางแอสฟัลต์และเครื่องผสมซีเมนต์จะมีท่อต่อตรงไปยังเครื่องกัดและผสม เพื่อลำเลียงยางแอสฟัลต์ที่ใช้ในการผลิตโฟมแอสฟัลต์และน้ำปูน (Cement Slurry) ไปยังบริเวณห้องผสม (Mixing Chamber) ของเครื่องกัดและผสมในตัว (Recycler)

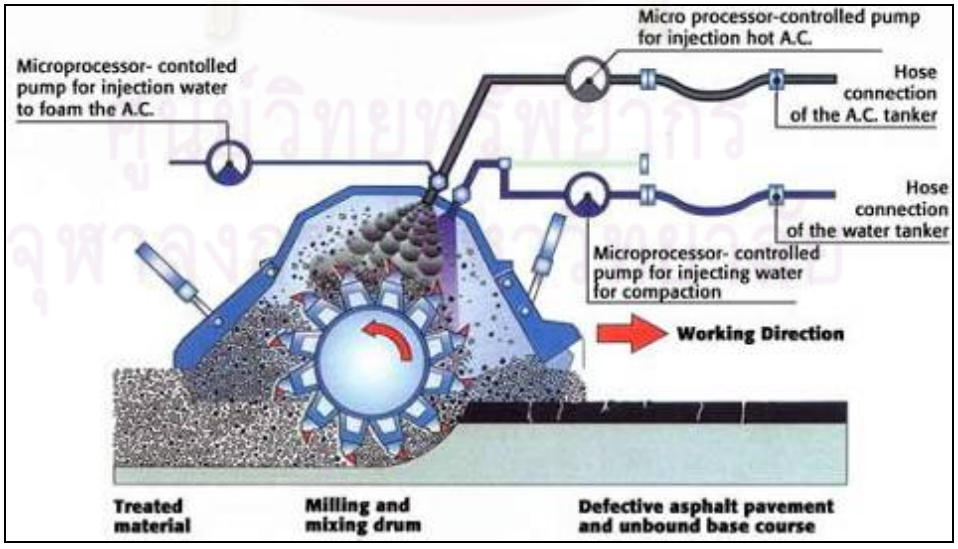


ภาพที่ 4.9 รูปแบบขบวนเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้าง

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

ภาพที่ 4.10 ขบวนเครื่องจักรในการก่อสร้าง

ขั้นตอนในการก่อสร้างจะเริ่มจากการเติมน้ำและปูนซีเมนต์ลงในเครื่องผสมซีเมนต์ (Cement Slurry Mixer) เพื่อให้ได้เป็นน้ำปูน (Cement Slurry) เมื่อขบวนเครื่องจักรเคลื่อนที่ หัวกัด (Milling Drum) ก็จะขูดไสวัสดุโครงสร้างทางเดิมขึ้นมา พร้อมกับหัวฉีด (Nozzle) บริเวณห้องผสมก็จะฉีดยางแอสฟัลต์ (AC 60-70) อุณหภูมิประมาณ 170˚C พร้อมกับน้ำและอากาศเพื่อก่อให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ รวมทั้งน้ำปูนที่ได้จากเครื่องผสมลงไปในห้องผสม ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และ 4.12 โดยอัตราเร็วของการฉีดยางแอสฟัลต์และน้ำปูนจะเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติโดยการควบคุมของระบบคอมพิวเตอร์เพื่อให้สัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องกัด วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะถูกปูทับโดยเครื่องปูผิว (Paver) ที่ติดอยู่ที่ด้านท้ายของเครื่องกัดและผสม ดังแสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.11 กระบวนการผสมโฟมแอสฟัลต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพวัสดุโครงสร้างทางเดิม

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

ภาพที่ 4.12 บริเวณห้องผสม (Mixing Chamber) ของเครื่องกัดและผสม

ภาพที่ 4.13 วัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพและปูทับโดยเครื่องปูผิว (Paver)

4.7 กระบวนการก่อสร้าง

การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ ชนิดผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) มีขั้นตอนในการก่อสร้างดังต่อไปนี้

1. การเตรียมพื้นที่ในการก่อสร้าง (Clearing) ก่อนการดำเนินการก่อสร้าง ต้องนำเอาดินหรือวัชพืชที่อยู่บริเวณขอบทางออก เพื่อให้เห็นขอบเขตพื้นที่ของการก่อสร้างได้ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.14

ภาพที่ 4.14 การเตรียมพื้นที่ในการก่อสร้าง (Clearing)

2. การเพิ่มวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) ในการก่อสร้างช่วงแรก (RAP 70) โดยการนำหินฝุ่นมากองบนผิวทางเดิมและเกลี่ยทับให้ได้ระดับ โดยมีความสูงประมาณ 6 ซม. (เฉพาะการก่อสร้างช่วง กม. 98+350 - กม. 101+000 ด้านขาล่อง) เพื่อขูดไสรวมกับโครงสร้างทางเดิมหนา 9 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 4.15

ภาพที่ 4.15 การเพิ่มหินฝุ่นหนา 6 ซม. ลงบนโครงสร้างทางเดิม

การเพิ่มหินฝุ่นทำโดยการใช้รถบรรทุกเทราดหินฝุ่นลงบนโครงสร้างทางเดิมที่จะทำการปรับปรุงคุณภาพ แล้วใช้รถเกรดเกลี่ยเพื่อปรับระดับให้หนาประมาณ 6 ซม. ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวนี้ ทำให้หินฝุ่นซึ่งเป็นส่วนผสมใหม่ที่เพิ่มเข้าไปในการก่อสร่างช่วง RAP 70 ในแต่ละตำแหน่งอาจมีปริมาณคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจส่งผลให้ส่วนผสมไม่เป็นไปตามสัดส่วนที่ต้องการได้

3. การขูดไส (Milling) โครงสร้างทางเดิมลึก 15 ซม. (การก่อสร้างช่วง RAP 100) และปรับปรุงโครงสร้างทางเดิมด้วยโฟมแอสฟัลต์พร้อมทั้งปูเป็นชั้นพื้นทางใหม่ ซึ่งมีความกว้างต่อครั้งในการขูดไสเท่ากับ 2.20 ม. ดังแสดงในภาพที่ 4.16

ภาพที่ 4.16 การขูดไสโครงสร้างทางเดิม กว้างครั้งละ 2.20 ม.

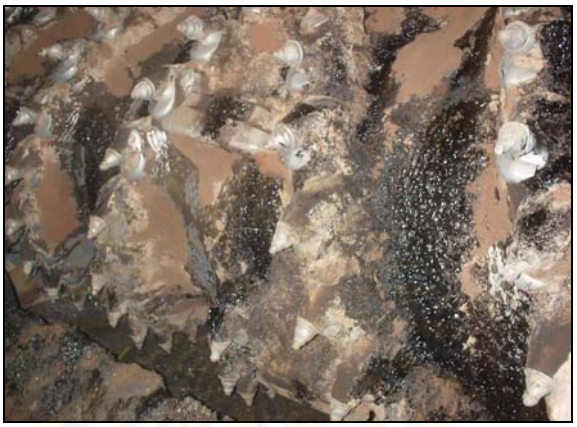
ในขั้นตอนการขูดไสโครงสร้างทางเดิมแล้วทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์นี้ สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือ

- ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดและผสม (Recycler) หากเครื่องกัดเดินเร็วเกินไปจะทำให้วัสดุที่กัดขึ้นมามีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้ส่วนผสมที่ได้มีขนาดคละที่ไม่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งจะส่งผลให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้มีคุณสมบัติต่ำกว่าการออกแบบ

- สภาพของหัวกัด (Milling Drum) หัวกัดเป็นส่วนที่เครื่องกัดและผสมใช้ในการขูดไสวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ต้องการปรับปรุงคุณภาพ ดังแสดงในภาพที่ 4.17 ซึ่งหากหัวกัดสึกกร่อนเกินไปไม่อยู่ในสภาพที่ดี จะทำให้วัสดุที่กัดได้มีขนาดที่ใหญ่เกินไป

- อุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ ในขณะที่ฉีดโฟมยางแอสฟัลต์ควรมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 160˚C เนื่องจากอุณหภูมิของยางแอสฟัลต์มีผลต่อความสมบูรณ์ของการเกิดโฟมแอสฟัลต์ ซึ่งในการก่อสร้างมีการตรวจสอบค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์ที่บริเวณหน้างาน ดังแสดงในภาพที่ 4.18 เนื่องจากค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์เป็นคุณลักษณะที่มีผลต่อความสามารถในการกระจายตัวเข้าไปยึดเกาะกับวัสดุมวลรวมของโฟม

แอสฟัลต์ หากโฟมแอสฟัลต์ที่ได้ไม่สมบูรณ์ คือมีค่าการขยายตัวหรือค่าครึ่งชีวิตที่ต่ำกว่าการออกแบบ จะส่งผลให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้



ภาพที่ 4.17 หัวกัดของเครื่องกัดและผสมที่ใช้ในการขูดไสวัสดุโครงสร้างทางเดิม

ภาพที่ 4.18 การตรวจสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่บริเวณหน้างาน

4. การบดอัด (Compaction) ในขั้นตอนการบดอัดหลังจากวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ขูดไสขึ้นมาได้รับการปรับปรุงคุณภาพเรียบร้อยแล้ว ไม่ควรทิ้งช่วงการบดอัดหลังจากการผสมไว้นานจนเกินไป เนื่องจากจะทำให้ความชื้นของส่วนผสมลดลง ซึ่งจะส่งผลให้การบดอัดไม่มีประสิทธิภาพ ไม่สามารถบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดตามที่ต้องการได้ โดยในโครงการก่อสร้างนี้ มีขั้นตอนในการบดอัดดังต่อไปนี้

4.1 บดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 25 ตัน จำนวน 7 เที่ยว (ไป-กลับ) และบดอัดตามด้วยรถบดล้อยาง 9 ล้อ น้ำหนัก 12 ตัน ประมาณ 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

ภาพที่ 4.19 การบดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 25 ตัน

ภาพที่ 4.20 การบดอัดด้วยรถบดล้อยาง น้ำหนัก 12 ตัน

4.2 สเปรย์น้ำหลังจากการบดอัด แล้วใช้รถเกรดเกลี่ยเพื่อปรับแต่งชั้นพื้นทางใหม่ให้ได้ระดับและความลาดเอียงตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ

ภาพที่ 4.21 รถน้ำสเปรย์น้ำ

ภาพที่ 4.22 การใช้รถเกรดเกลี่ยปรับระดับและความลาดเอียง

4.3 บดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 18 ตัน จำนวน 10 เที่ยว (ไป-กลับ) และบดอัดตามด้วยรถบดล้อยาง 9 ล้อ น้ำหนัก 12 ตัน ประมาณ 30 นาที ดังแสดงในภาพที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ

5. การสเปรย์น้ำเพื่อบ่มชั้นพื้นทางใหม่ หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการบดอัดแล้ว สเปรย์น้ำเพื่อบ่มชั้นพื้นทางใหม่ จนกว่าจะทำการ Prime Coat ดังแสดงในภาพที่ 4.25

ภาพที่ 4.23 การบดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กสั่นสะเทือน น้ำหนัก 18 ตัน

ภาพที่ 4.24 การบดอัดด้วยรถบดล้อยาง น้ำหนัก 12 ตัน

ภาพที่ 4.25 การสเปรย์น้ำเพื่อบ่มชั้นพื้นทางใหม่

6. การ Prime Coat ชั้นพื้นทางใหม่ จากการพิจารณาชั้นพื้นทางใหม่ที่ได้จากการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์แบบผสมเย็นในที่ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) นั้น พบว่ามีลักษณะคล้ายกับแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete) กล่าวคือ มีลักษณะผิวที่ค่อนข้างเรียบแน่น ดังนั้นในการสเปรย์ Prime Coat จึงควรใช้ปริมาณยางน้อยกว่าปกติที่ใช้กับการสเปรย์บนวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ (Cement Recycling) โดยอาจใช้ปริมาณยาง Prime Coat ใกล้เคียงกับปริมาณยาง Tack Coat หรือประมาณ 0.4 ลิตรต่อตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.26

ภาพที่ 4.26 การ Prime Coat ชั้นพื้นทางใหม่

7. การปูผิวแอสฟัลต์คอนกรีตทับชั้นพื้นทางใหม่ หนาเฉลี่ย 5 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 4.27

ภาพที่ 4.27 ปูผิวแอสฟัลต์คอนกรีต

4.8 การตรวจสอบคุณภาพของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในการก่อสร้าง

การตรวจสอบคุณภาพของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในการก่อสร้าง ทำโดยการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ผสมกับโฟมแอสฟัลต์จากเครื่อง Pug Mill มาบดอัดโดยวิธีมาร์แชลในห้องปฏิบัติการและนำมาทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ของก้อนตัวอย่าง ที่อายุ 4 วัน สัดส่วนละ10 ก้อน โดยแบ่งออกเป็นการทดสอบในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ (Soaked) จำนวน 5 ก้อน และการทดสอบในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked) จำนวน 5 ก้อน พบว่า ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การตรวจสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในการก่อสร้างช่วงแรก (RAP 70)

สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
	เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
แช่น้ำ	2.239	0.5%	231	28.3%	1.02
ไม่แช่น้ำ	2.127	0.7%	226	29.6%	

จากตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของส่วนผสม RAP 70 มีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ออกแบบไว้ (2.061 t/m^3) แต่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่ทดสอบในสภาพไม่แช่น้ำ ($ITS_{Unoaked}$) มีค่าเท่ากับ 226 kPa ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดการก่อสร้าง (317.3 kPa) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เครื่องจักรเริ่มงานในช่วงแรกยังทำงานไม่เข้าที่ จึงต้องหยุดการก่อสร้างไว้ชั่วคราวและทำการปรับปรุงกระบวนการทำงานของเครื่องจักรโดย

- ลดความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรลง จากความเร็วประมาณ 7 เมตรต่อนาที เหลือประมาณ 5 เมตรต่อนาที เพื่อให้หัวกัดกัดวัสดุโครงสร้างทางเดิมให้มีขนาดเล็กกว่า 3/4 นิ้ว เนื่องจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรและสภาพของหัวกัดมีผลต่อขนาดของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่กัดได้

- ปรับอุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ที่อยู่ในรถบรรทุกยางให้สูงขึ้นเพื่อให้ยางแอสฟัลต์มีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 160°C ในขณะที่ทำการฉีดโฟมแอสฟัลต์

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการทำงานของเครื่องจักรในการก่อสร้างช่วงหลัง (RAP 100) เมื่อนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ผสมกับโฟมแอสฟัลต์จากเครื่อง Pug Mill มาบดอัดโดยวิธีมาร์แชลในห้องปฏิบัติการและนำมาทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อายุ 4 วัน พบว่า ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การตรวจสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในการก่อสร้างช่วงหลัง (RAP 100)

สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
	เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
แช่น้ำ	2.111	1.1%	216	17.5%	0.72
ไม่แช่น้ำ	2.103	1.1%	298	17.8%	

จากตารางที่ 4.6 หลังจากการปรับปรุงกระบวนการทำงานของเครื่องจักร ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของส่วนผสม RAP 100 มีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดที่ออกแบบไว้ (2.004 t/m^3) และค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่ทดสอบในสภาพไม่แช่น้ำ ($ITS_{Unoaked}$) มีค่าเท่ากับ 298 kPa ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดการก่อสร้าง (276 kPa) แสดงให้เห็นว่า การควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรและอุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ เป็นสิ่งที่ต้องตระหนักถึงในกระบวนการก่อสร้าง

4.9 สรุปผลการศึกษาการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์

การศึกษาวิจัยนี้ได้ศึกษาการบูรณะทางผิวแอสฟัลต์โดยการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ ชนิดผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ ดำเนินการโดยการขูดไสโครงสร้างทางเดิมลึก 15 เซนติเมตร ขึ้นมาปรับปรุงคุณภาพโดยใช้โฟมแอสฟัลต์ โดยแบ่งลักษณะการก่อสร้างออกเป็นสองช่วง คือ

1. ช่วง RAP 70 ก่อสร้างโดยการเพิ่มหินฝุ่นหนา 6 เซนติเมตร และขูดไสรวมกับโครงสร้างทางเดิมหนา 9 เซนติเมตร (วัสดุผิวทางเดิม 70 % : หินฝุ่น 30 % โดยน้ำหนัก)

2. ช่วง RAP 100 ก่อสร้างโดยการขูดไสโครงสร้างทางเดิมหนา 15 เซนติเมตร (วัสดุโครงสร้างทางเดิม 100 %)

ส่วนผสมที่ใช้ในการก่อสร้าง ประกอบด้วย วัสดุโครงสร้างทางเดิม หินฝุ่นซึ่งเป็นวัสดุที่ผสมเพิ่มเข้าไปสำหรับการก่อสร้างช่วง RAP 70 ในการผสมจะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ 1% และปริมาณยางแอสฟัลต์ 2% โดยน้ำหนักของวัสดุมวลรวม อุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ในขณะฉีดโฟมแอสฟัลต์มีค่าเท่ากับ 170°C ซึ่งให้ค่าการขยายตัวเท่ากับ 10 เท่า และค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 9 วินาที

เครื่องจักรหลักที่ใช้ในการก่อสร้าง ประกอบด้วย รถบรรทุกแอสฟัลต์ (AC 60-70) เครื่องผสมซีเมนต์ (Cement Slurry Mixer) เครื่องกัดและผสมในตัว (Recycler) รดเกรดสำหรับเกลี่ยปรับระดับ และรถบดสำหรับบดอัดวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ

จากการศึกษากระบวนการก่อสร้างพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ มีดังต่อไปนี้

- ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดและผสม (Recycler)
- สภาพของหัวกัด (Milling Drum)
- อุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ในการฉีดโฟมแอสฟัลต์
- การทิ้งช่วงการบดอัดหลังการปรับปรุงคุณภาพวัสดุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบประกอบไปด้วย ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม ผลการทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ และผลการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

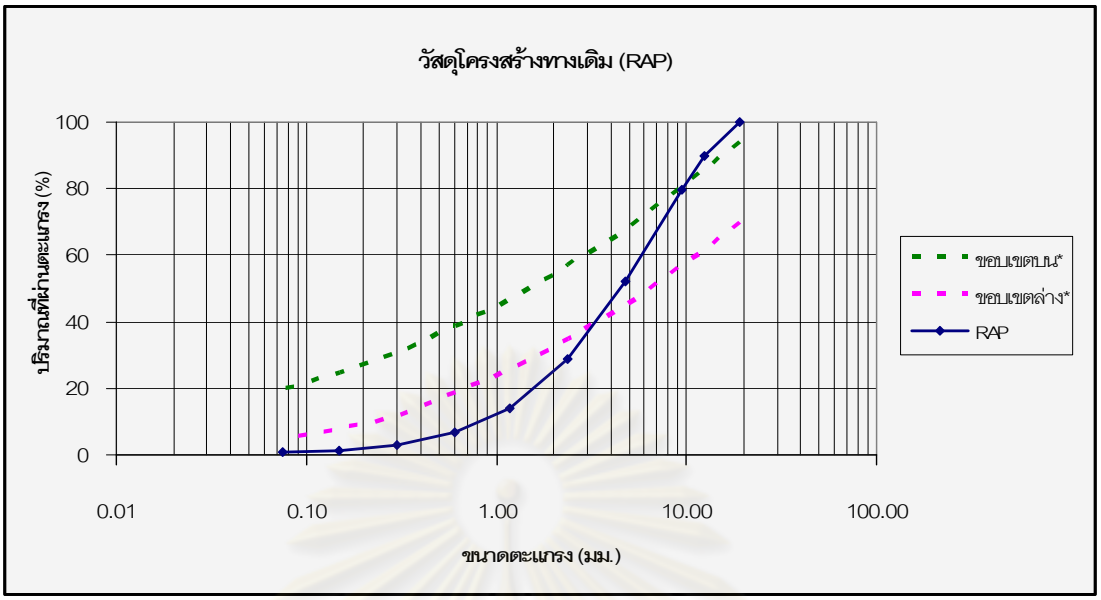
5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

5.1.1 ผลการทดสอบหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม

จากการนำวัสดุมวลรวมทั้งสองประเภท คือ วัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น) มาวิเคราะห์หาขนาดคละ พบว่าวัสดุทั้งสองประเภทมีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น)

ขนาดตะแกรง (เบอร์)	ขนาดตะแกรง (มม.)	ปริมาณที่ผ่านตะแกรง (%)	
		RAP	หินฝุ่น
3/4"	19.00	100	100
1/2"	12.50	89.8	100
3/8"	9.50	79.6	100
# 4	4.75	52.3	98.4
# 8	2.36	28.6	65.6
#16	1.18	14.1	40.8
#30	0.60	6.9	29.0
#50	0.30	3.0	21.9
#100	0.15	1.3	17.4
#200	0.08	0.9	15.1



ภาพที่ 5.1 ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP)

ที่มา : * Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

จากภาพที่ 5.1 แสดงขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) และขอบเขตขนาดคละที่เหมาะสมตามคำแนะนำของ Wirtgen Cold Recycling Manual (2004) เมื่อพิจารณาจากภาพดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) ที่ขุดรื้อขึ้นมามีขนาดคละที่ไม่เหมาะสม โดยมีปริมาณมวลละเอียดไม่เพียงพอ จึงต้องมีการเติมวัสดุมวลรวมใหม่เพิ่มเข้าไป เพื่อปรับขนาดคละให้เหมาะสมในการนำไปใช้กับโฟมแอสฟัลต์ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้ปรับขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) โดยการเพิ่มวัสดุมวลรวมใหม่เข้าไปคือ หินฝุ่น ซึ่งสัดส่วนที่ใช้ประกอบไปด้วยสองสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สัดส่วนผสมระหว่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับวัสดุมวลรวมใหม่ (หินฝุ่น)

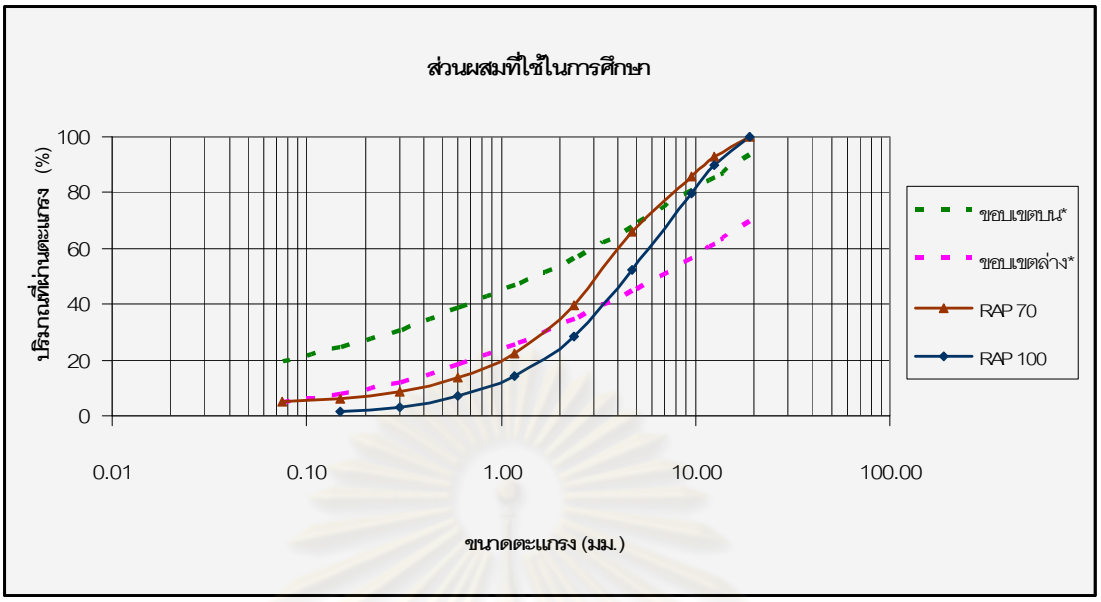
ประเภทวัสดุมวลรวม	สัดส่วนผสมของวัสดุมวลรวม (%)	
	ส่วนผสมที่ 1	ส่วนผสมที่ 2
RAP	70	100
หินฝุ่น	30	0

ส่วนผสมทั้งสองแบบ ที่ใช้ในการศึกษา มีขนาดคละดังแสดงในตารางที่ 5.3 และในภาพที่ 5.2 แม้ว่าส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษาจะมีขนาดคละไม่อยู่ในขอบเขตคำแนะนำของ Wirtgen Cold Recycling Manual (2004) ทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตาม ส่วนผสมที่ 1 (RAP 70) ยังคงมีปริมาณวัสดุมวลละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) 5.1 % ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า วัสดุมวลรวมที่เหมาะสมกับการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์นั้น ควรจะมีวัสดุมวลละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ระหว่างร้อยละ 5 ถึง ร้อยละ 20

สำหรับส่วนผสมที่ 2 (RAP 100) ที่ใช้ในการศึกษามีปริมาณวัสดุมวลละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) 0.9 % เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ต้องเพิ่มวัสดุมวลรวมใหม่เข้าไป เป็นการลดขั้นตอนในการก่อสร้าง

ตารางที่ 5.3 ขนาดคละของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดตะแกรง		ปริมาณที่ผ่านตระแกรง (%)	
(เบอร์)	(มม.)	ส่วนผสมที่ 1 (RAP 70)	ส่วนผสมที่ 2 (RAP 100)
3/4"	19.00	100	100
1/2"	12.50	92.9	89.8
3/8"	9.50	85.7	79.6
# 4	4.75	66.2	52.3
# 8	2.36	39.7	28.6
#16	1.18	22.1	14.1
#30	0.60	13.5	6.9
#50	0.30	8.7	3.0
#100	0.15	6.1	1.3
#200	0.08	5.1	0.9



ภาพที่ 5.2 ขนาดคละของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

ที่มา : * Wirtgen Cold Recycling Manual (2004)

ส่วนผสมทั้งสองแบบ ได้รับการผสมปูนซีเมนต์เพิ่มเข้าไป 1% ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม ซึ่งการเพิ่มปูนซีเมนต์ให้กับวัสดุมวลรวมนั้น มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

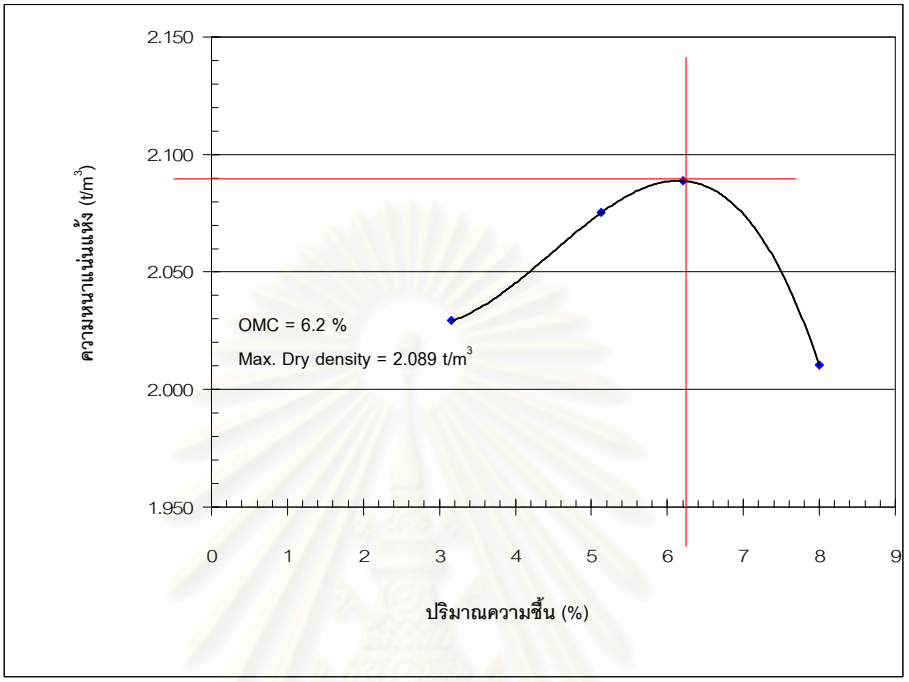
- เพิ่มปริมาณวัสดุมวลละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ให้แก่ส่วนผสม เพื่อปรับขนาดคละของวัสดุมวลรวมให้เหมาะสมสำหรับโฟมแอสฟัลต์
- การทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ทำให้ผิวของวัสดุมวลที่มีขนาดใหญ่ไม่เรียบสม่ำเสมอ ทำให้ยึดเกาะกับโฟมแอสฟัลต์ได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ

5.1.2 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัด

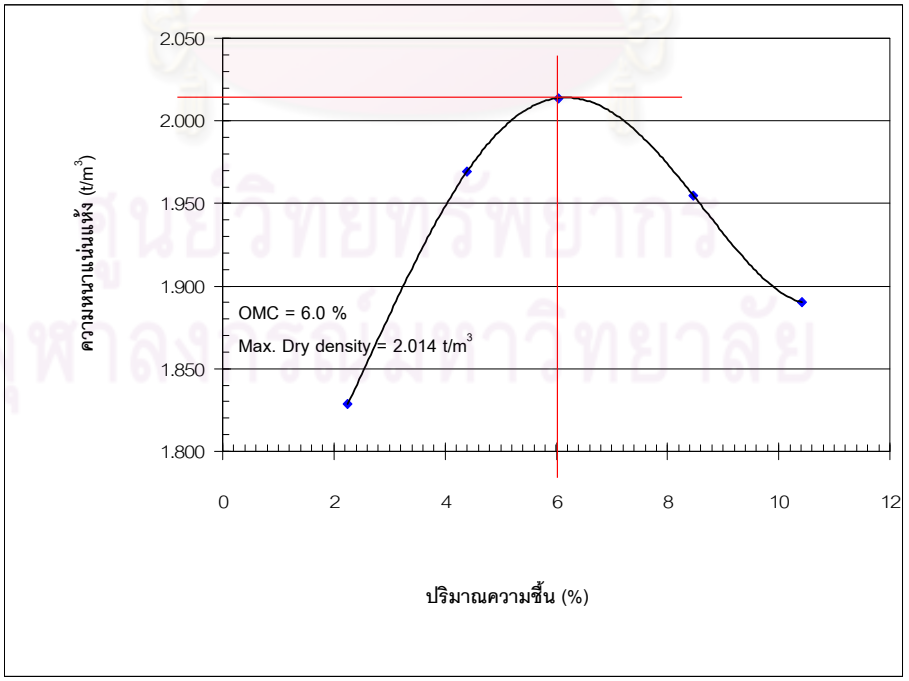
ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบดอัดส่วนผสม ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) จะช่วยในการกระจายตัวของโฟมแอสฟัลต์ให้เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมได้ดี และทำให้บดอัดได้ความหนาแน่นที่สูงขึ้น

วัสดุมวลรวมที่ปรับขนาดคละได้ตามที่ต้องการแล้ว จะนำมาทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) สำหรับการบดอัด โดยวิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO T180 และ มาตรฐานกรมทางหลวง ทล.-ท 108/2517

ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของแต่ละส่วนผสมได้แสดงไว้ในภาพที่ 5.3 และ 5.4 และสรุปไว้ในตารางที่ 5.4



ภาพที่ 5.3 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของส่วนผสม 1 (RAP 70)



ภาพที่ 5.4 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของส่วนผสม 2 (RAP 100)

ตารางที่ 5.4 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของแต่ละส่วนผสม

การทดสอบ	ส่วนผสม 1 RAP 70	ส่วนผสม 2 RAP 100
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (%)	6.2	6.0
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (t/m^3)	2.089	2.014

จากตารางที่ 5.4 ค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของส่วนผสม RAP 70 ต้องการปริมาณความชื้นสูงกว่าส่วนผสม RAP 100 เนื่องจากส่วนผสม RAP 70 มีปริมาณมวลละเอียดมากกว่า จึงต้องการความชื้นเพื่อเข้าไปผสมกับมวลรวมในปริมาณที่สูงกว่า และเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของส่วนผสม พบว่าส่วนผสม RAP 70 มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดสูงกว่าส่วนผสม RAP 100 เช่นกัน เนื่องจากส่วนผสม RAP 70 มีปริมาณมวลละเอียดมากกว่าและมีขนาดคละที่ดีกว่าส่วนผสม RAP 100 จึงทำให้ส่วนผสม RAP 70 มีค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดมากกว่าส่วนผสม RAP 100

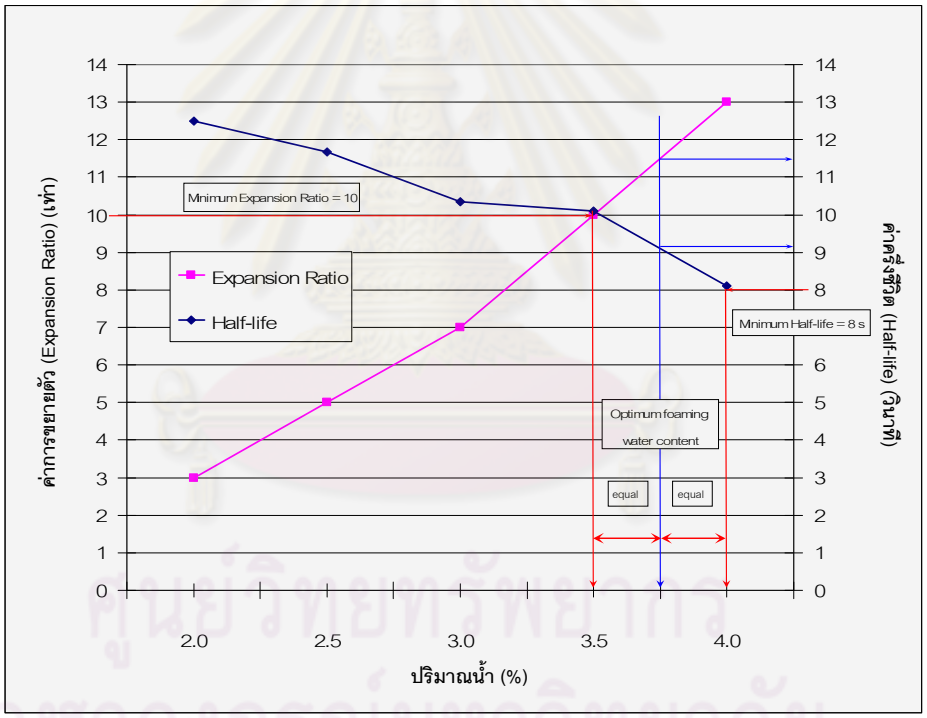
5.2 ผลการทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่สำคัญประกอบด้วย ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ซึ่งคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่ดี ควรจะมีค่าการขยายตัวที่สูงพอที่จะสามารถกระจายตัวเข้าไปผสมในมวลรวมได้ดี และมีค่าครึ่งชีวิตที่นานพอที่จะคงสภาพโฟมให้สามารถผสมกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิห้องได้

การทดสอบจะทดสอบที่แรงดันน้ำ 6 บาร์ แรงดันอากาศ 7 บาร์ และแอสฟัลต์อุณหภูมิ 170˚C โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไปอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไปในแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อน เพื่อทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ที่มีค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และค่าครึ่งชีวิต (Half – life) ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.5 และภาพที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170˚C

ปริมาณน้ำ (Water Content)	ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio)	ค่าครึ่งชีวิต (Half – life)
(%)	(เท่า)	(วินาที)
2.0	3.0	12.5
2.5	5.0	11.7
3.0	7.0	10.4
3.5	10.0	10.1
4.0	13.0	8.1



ภาพที่ 5.5 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าการขยายตัวของโฟมแอสฟัลต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไป ในขณะที่ค่าครึ่งชีวิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นการหาปริมาณน้ำของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด ควรพิจารณาจากบริเวณที่เส้นกราฟทั้งสองของค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตตัดกันหรือใกล้กันมากที่สุด

จากภาพที่ 5.5 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของโฟมแอสฟัลต์ หาได้จากค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตต่ำสุดที่ยอมรับได้ ซึ่ง Wirtgen Cold Recycling Manual (2004) ระบุว่า ค่าการขยายตัวของโฟมแอสฟัลต์ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 10 เท่า และค่าครึ่งชีวิตควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 8 วินาที เพื่อให้โฟมแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นปริมาณน้ำ 3.75 % จึงเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมของโฟมแอสฟัลต์ ซึ่งจะให้คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170˚C ที่เหมาะสมที่สุดคือ ค่าการขยายตัวเท่ากับ 11.5 เท่า และค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 9.2 วินาที ผลที่ได้จากการทดสอบสามารถสรุปคุณลักษณะที่เหมาะสมของโฟมแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170˚C ได้ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 คุณลักษณะที่เหมาะสมของโฟมแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170˚C

คุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์	ค่าที่ได้
ปริมาณน้ำ	3.75 %
ค่าการขยายตัว	11.5 เท่า
ค่าครึ่งชีวิต	9.2 วินาที

5.3 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ

- รูปแบบที่ 1 ผสมและบดอัดในสนาม (ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนาม)
- รูปแบบที่ 2 ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ
- รูปแบบที่ 3 ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

5.3.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมและบดอัดในสนาม

การเจาะเก็บก้อนตัวอย่างในภาคสนาม สามารถทำได้ในช่วงหลังจากการก่อสร้างประมาณ 10 ถึง 14 วัน เนื่องจากได้ทำการทดลองเจาะเก็บก้อนตัวอย่างที่มีอายุน้อยกว่า 7 วันในสนาม ผลที่ได้คือก้อนตัวอย่างไม่อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ ขาดออกเป็นสองส่วนหรือแตกร่วนไม่จับ

ตัวเป็นก้อน ดังแสดงในภาพที่ 5.6 ดังนั้นก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนามจึงนำไปทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 28 วัน

ภาพที่ 5.6 ลักษณะก้อนตัวอย่างที่มีอายุน้อยกว่า 7 วัน ที่เจาะเก็บในสนาม

ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนามจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ซม. สูงประมาณ 15 - 20 ซม. ดังนั้นก่อนนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมจะตัดแบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนและส่วนล่าง ดังแสดงในภาพที่ 5.7

ภาพที่ 5.7 ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บในสนามที่ตัดออกเป็นสองส่วน

ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากในสนามจะนำมาทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ (Soaked) เปรียบเทียบกับใน

สภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked) โดยจะทำการเจาะเก็บก้อนตัวอย่างที่ทำการก่อสร้างในวันเดียวกัน เพื่อควบคุมให้ก้อนตัวอย่างมีคุณสมบัติไม่แตกต่างกันมาก เพื่อจะได้พิจารณาความแตกต่างของการทดสอบในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ (Soaked) เปรียบเทียบกับในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked) ได้อย่างชัดเจน

จากการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 (RAP 70 Coring) และ ส่วนผสม 2 (RAP 100 Coring) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 1 โดยผสมและบดอัดในสนาม (RAP 70 Coring)

ตัวอย่าง	สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
		เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
ส่วนบน	แช่น้ำ	2.296	1.6%	541	28.1%	1.29
	ไม่แช่น้ำ	2.267	1.6%	419	11.3%	
ส่วนล่าง	แช่น้ำ	2.258	2.2%	444	24.3%	1.20
	ไม่แช่น้ำ	2.256	3.1%	371	21.8%	

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 2 โดยผสมและบดอัดในสนาม (RAP 100 Coring)

ตัวอย่าง	สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
		เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
ส่วนบน	แช่น้ำ	2.294	1.3%	641	7.8%	1.18
	ไม่แช่น้ำ	2.294	1.2%	544	4.2%	
ส่วนล่าง	แช่น้ำ	2.293	1.5%	609	11.8%	1.12
	ไม่แช่น้ำ	2.278	1.3%	546	5.8%	

ตารางที่ 5.9 คุณสมบัติของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ออกแบบและข้อกำหนดในการก่อสร้าง

คุณสมบัติ		ส่วนผสม 1	ส่วนผสม 2
		RAP 70	RAP 100
ออกแบบ	$ITS_{Unsoaked}$	356.2 kPa	306.7 kPa
	ความหนาแน่นแห้งสูงสุด	2.061 t/m^3	2.004 t/m^3
ก่อสร้าง	$ITS_{Unsoaked}$	$>$ 317.3 kPa	$>$ 276.0 kPa
	ความหนาแน่น	$\geq$ 97 % Modified Proctor	
		$\geq$ 1.999 t/m^3	$\geq$ 1.944 t/m^3

จากตารางที่ 5.7 ถึง 5.9 ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากในสนาม (Coring) มีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (ITS) สูงกว่าค่าที่กำหนดในการก่อสร้างและค่าที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้เนื่องมาจากอายุของก้อนตัวอย่างที่นำมาทดสอบและการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ที่เป็นส่วนผสม โดยก้อนตัวอย่างส่วนบนจะมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าก้อนตัวอย่างส่วนล่าง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม โดยก้อนตัวอย่างส่วนบนจะมีค่าสูงกว่าก้อนตัวอย่างส่วนล่างเช่นกัน

จากตารางที่ 5.7 และ 5.8 เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่เจาะเก็บในสนาม (Coring) พบว่า RAP 70 Coring มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต่ำกว่า RAP 100 Coring ซึ่งในทางทฤษฎีและการออกแบบ ส่วนผสม RAP 70 จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าส่วนผสม RAP 100 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการก่อสร้างในช่วง RAP 70 เครื่องกัดเดินเร็วเกินไป (7เมตร/นาที) ทำให้ส่วนผสมที่ได้มีขนาดคละที่ไม่เหมาะสม (มีขนาดโตกว่า 3/4 นิ้ว) ประกอบกับอุณหภูมิของแอสฟัลต์ในขณะที่ทำการฉีดโฟมแอสฟัลต์ มีค่าต่ำกว่า 160˚C ทำให้โฟมที่เกิดขึ้นมีคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสม จึงทำให้คุณสมบัติของส่วนผสมที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างส่วนบนกับส่วนล่างที่เจาะเก็บในสนาม (Coring) พบว่า ก้อนตัวอย่างส่วนบนกับส่วนล่างของ RAP 100 Coring มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันมากกว่าก้อนตัวอย่างส่วนบนกับส่วนล่างของ RAP 70 Coring ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการก่อสร้างช่วง RAP 100 มีการบดอัดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการก่อสร้างช่วง RAP 70

เมื่อพิจารณาถึงค่าการกระจายตัวของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม จากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผัน (Coefficient of Variation : CV) ในตารางที่ 5.7 และ 5.8 พบว่า ค่า CV ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง RAP 100 Coring มีค่าน้อยกว่าค่าของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Coring ทั้งนี้เนื่องจากการก่อสร้างในส่วน RAP 70 นั้น ต้องเพิ่มหินฝุ่นเข้าไปโดยการใช้รถบรรทุกเทราดหินฝุ่นลงบนโครงสร้างทางเดิมที่จะทำการปรับปรุงคุณภาพ แล้วใช้รถเกรดเกลี่ยให้ได้ระดับความสูงที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะทำให้ส่วนผสมระหว่างวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP) กับหินฝุ่นที่เพิ่มเข้าไปนั้น อาจเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของหินฝุ่นที่ตำแหน่งต่าง ๆ จึงทำให้ผลการทดสอบค่า ITS ของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Coring มีความแปรปรวนสูงกว่าก้อนตัวอย่าง RAP 100 Coring

จากค่า Retained strength Ratio ของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บมาจากในสนามแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามมีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงขึ้นหลังจากการแช่น้ำ โดยค่า Retained strength Ratio ของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Coring จะมีค่าสูงกว่าของก้อนตัวอย่าง RAP 100 Coring ทั้งนี้เนื่องจาก RAP 70 Coring มีปริมาณวัสดุมวลละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. (Filler) ที่อยู่ในหินฝุ่น ซึ่งช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์เกิดได้ดีขึ้น จึงทำให้ก้อนตัวอย่าง RAP 70 Coring มีค่า Retained strength Ratio สูงกว่าก้อนตัวอย่าง RAP 100 Coring

5.3.2 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

เมื่อเก็บวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์มาจากในสนาม โดยนำวัสดุใส่ถุงและมัดปากถุงให้สนิท เพื่อรักษาปริมาณความชื้นของส่วนผสมแล้วนำมาบดอัดโดยวิธีมาร์แชล ดังแสดงในภาพที่ 5.8 และ 5.9 แล้วบ่มก้อนตัวอย่างเพื่อรอการทดสอบ

ภาพที่ 5.8 การนำส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามมาบดอัดโดยวิธีมาร์แชล

ภาพที่ 5.9 ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ จะทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 4 วัน

จากการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ส่วนผสม 1 (RAP 70 Lab-Compact) และ ส่วนผสม 2 (RAP 100 Lab-Compact) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 1 โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (RAP 70 Lab-Compact)

สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
	เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
แช่น้ำ	2.173	1.0%	365	3.6%	1.12
ไม่แช่น้ำ	2.163	0.8%	326	3.4%	

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 2 โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (RAP 100 Lab-Compact)

สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
	เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
แช่น้ำ	2.116	1.1%	389	3.1%	1.09
ไม่แช่น้ำ	2.104	1.6%	357	3.4%	

จากตารางที่ 5.9 ถึง 5.11 ก้อนตัวอย่างของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Compact) มีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (ITS) สูงกว่าค่าที่กำหนดในการก่อสร้างและค่าที่ออกแบบไว้

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Lab-Compact กับก้อนตัวอย่าง RAP 100 Lab-Compact ในตารางที่ 5.10 และ 5.11 พบว่า ค่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Lab-Compact มีค่าต่ำกว่าของก้อนตัวอย่าง RAP 100 Lab-Compact ในขณะที่ค่า Retained Strength Ratio ของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Lab-Compact มีค่าสูงกว่าของก้อนตัวอย่าง RAP 100 Lab-Compact ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บมาจากในสนาม แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บมาจากในสนาม (Coring) กับก้อนตัวอย่างที่นำส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามมาบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Compact) พบว่า ก้อนตัวอย่าง Coring มีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าก้อนตัวอย่าง Lab-Compact ทั้งนี้น่าจะเป็นผลมาจากอายุของก้อนตัวอย่างและผลจากการบดอัดในสนาม

5.3.3 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ จะทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 4 วัน

จากการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ ส่วนผสม 1 (RAP 70 Lab-Mix & Compact) และ ส่วนผสม 2 (RAP 100 Lab- Mix & Compact) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 1 โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (RAP 70 Lab-Mix & Compact)

สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
	เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
แช่น้ำ	2.077	1.4%	303	6.9%	0.86
ไม่แช่น้ำ	2.086	1.1%	351	3.2%	

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 2 โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (RAP 100 Lab-Mix & Compact)

สภาพในการทดสอบ	ความหนาแน่น (t/m^3)		ITS (kPa)		Retained strength Ratio
	เฉลี่ย	CV	เฉลี่ย	CV	
แช่น้ำ	1.999	1.0%	282	5.0%	0.90
ไม่แช่น้ำ	1.998	1.3%	314	4.8%	

จากตารางที่ 5.12 และ 5.13 ก้อนตัวอย่างของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Mix & Compact) มีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบ โดยมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ ($ITS_{Unoaked}$) สูงกว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ (ITS_{Soaked}) โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Lab-Mix & Compact มีค่าสูงกว่าก้อนตัวอย่าง RAP 100 Lab-Mix & Compact ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างก้อนตัวอย่างที่นำส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามมาบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Compact) กับก้อนตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Mix & Compact) พบว่า ก้อนตัวอย่าง Lab-Compact มีค่า ITS_{Soaked} สูงกว่าค่า $ITS_{Unsoaked}$ ซึ่งไม่สอดคล้องกับหลักการออกแบบ ในขณะที่ก้อนตัวอย่าง Lab-Mix & Compact มีค่า ITS_{Soaked} ต่ำกว่าค่า $ITS_{Unsoaked}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมในห้องปฏิบัติการให้ส่วนผสมที่มีคุณสมบัติสม่ำเสมอใกล้เคียงการออกแบบและเป็นไปตามทฤษฎีมากกว่าการผสมในสนาม

5.4 ผลการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์

5.4.1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

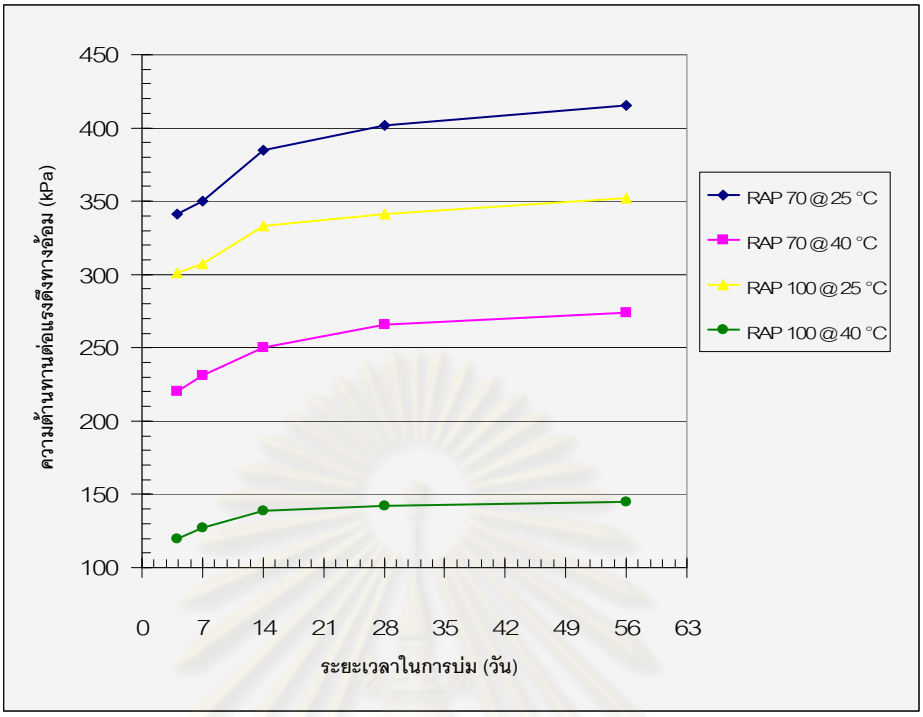
การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ การทดสอบจะกระทำที่อุณหภูมิ 25˚C และ 40˚C ในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked) เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 4, 7, 14, 28 และ 56 วัน ซึ่งมีผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 5.14 และ 5.15

ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 1 (RAP 70) โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม

ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (kPa)	
	ทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C	ทดสอบที่อุณหภูมิ 40˚C
4	341	220
7	350	231
14	385	250
28	402	266
56	415	274

ตารางที่ 5.15 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ส่วนผสม 2 (RAP 100) โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม

ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (kPa)	
	ทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C	ทดสอบที่อุณหภูมิ 40˚C
4	301	120
7	307	127
14	333	139
28	341	142
56	352	145



ภาพที่ 5.10 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์
โดยพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม

จากภาพที่ 5.10 ค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์พัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 7 ถึง 14 วัน โดยค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของส่วนผสม RAP 70 มีค่าสูงกว่าส่วนผสม RAP 100 ทั้งการทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C และ 40˚C ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสม RAP 70 มีปริมาณวัสดุมวลละเอียดสูงกว่า ซึ่งปริมาณวัสดุมวลละเอียดดังกล่าว สามารถจับตัวกับโฟมแอสฟัลต์และทำหน้าที่เหมือนมอร์ต้ายึดเชื่อมระหว่างวัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้วัสดุมวลรวมจับตัวกันดี ส่งผลให้ส่วนผสม RAP 70 มีความแข็งแรงสามารถต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมได้สูงกว่า

เมื่ออุณหภูมิในการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีค่าลดลง โดยค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของส่วนผสม RAP 100 จะลดลงมากกว่าค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของส่วนผสม RAP 70 เนื่องจากส่วนผสม RAP 100 มีปริมาณวัสดุโครงสร้างทางเดิมซึ่งมีปริมาณแอสฟัลต์เก่าผสมอยู่สูงกว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้ส่วนผสม RAP 100 อ่อนตัวและทนต่อแรงดึงทางอ้อมได้น้อยลง

เมื่อนำค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของส่วนผสม RAP 70 และส่วนผสม RAP 100 ที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 ˚C มาพิจารณาหาค่าอัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ทั้ง

สองส่วนผสมพบว่า ส่วนผสม RAP 70 และส่วนผสม RAP 100 มีค่า ITS $_{Unsoaked}$ ที่อายุ 28 วัน เพิ่มขึ้น 1.18 และ 1.13 เท่าของค่า ITS $_{Unsoaked}$ ที่อายุ 4 วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 การพัฒนากำลังของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C ในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked)

ระยะเวลาในการบ่ม	RAP 70		RAP 100	
	ITS $_{Unsoaked}$	การพัฒนากำลังเมื่อเทียบกับที่อายุ 4 วัน	ITS $_{Unsoaked}$	การพัฒนากำลังเมื่อเทียบกับที่อายุ 4 วัน
(วัน)	(kPa)	(เท่า)	(kPa)	(เท่า)
4	341	1.00	301	1.00
7	350	1.03	307	1.02
14	385	1.13	333	1.11
28	402	1.18	341	1.13
56	415	1.22	352	1.17

เนื่องจากการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บมาจากในสนาม (Coring) ทำการทดสอบที่อายุ 28 วัน ในขณะที่ก้อนตัวอย่างที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ(Lab-Compact) และก้อนตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Mix & Compact) ทำการทดสอบที่อายุ 4 วัน เพื่อความชัดเจนในการพิจารณาเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำของก้อนตัวอย่างทั้งสามรูปแบบ จึงได้นำค่าอัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่อายุ 28 วัน ของทั้งสองส่วนผสม ไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Coring และก้อนตัวอย่าง RAP 100 Coring ที่อายุ 4 วัน จากผลการทดสอบค่า ITS $_{Unsoaked}$ ของก้อนตัวอย่าง RAP 70 Coring และก้อนตัวอย่าง RAP 100 Coring ที่อายุ 28 วัน ในตารางที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำของก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากในสนาม ที่อายุ 4 วัน ที่ได้จากการคำนวณ

ก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บจากในสนาม (Coring)		$ITS_{Unsoaked}$ ที่อายุ 28 วัน จากการทดสอบ (kPa)	การพัฒนากำลังเมื่อเทียบกับที่อายุ 4 วัน (เท่า)	$ITS_{Unsoaked}$ ที่อายุ 4 วัน จากการคำนวณ (kPa)
RAP 70	ส่วนบน	419	1.18	355
	ส่วนล่าง	371		314
RAP 100	ส่วนบน	544	1.13	481
	ส่วนล่าง	546		483

เมื่อนำค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำของก้อนตัวอย่างทั้งสามรูปแบบมาพิจารณาเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการ

รูปแบบของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในการทดสอบ		$ITS_{Unsoaked}$ ที่อายุ 4 วัน (kPa)	
		RAP 70	RAP 100
ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่เจาะเก็บจากในสนาม (Coring)	ส่วนบน	355	481
	ส่วนล่าง	314	483
ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Compact)		326	357
ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Mix & Compact)		351	314

จากตารางที่ 5.18 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บมาจากในสนาม (Coring) กับก้อนตัวอย่างที่นำส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามมาบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Compact) พบว่า ก้อนตัวอย่าง Coring มีค่า ITS $_{Unsoaked}$ สูงกว่าก้อนตัวอย่าง Lab-Compact แสดงให้เห็นว่าการบดอัดในสนามทำให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีความแข็งแรงกว่ากว่าการบดอัดในห้องปฏิบัติการ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างก้อนตัวอย่างที่นำส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมในสนามมาบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Compact) กับก้อนตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Mix & Compact) พบว่า ก้อนตัวอย่าง RAP 70 Lab-Compact มีค่า ITS $_{Unsoaked}$ ต่ำกว่าก้อนตัวอย่าง RAP 70 Lab-Mix & Compact ในขณะที่ก้อนตัวอย่าง RAP 100 Lab-Compact มีค่า ITS $_{Unsoaked}$ สูงกว่าก้อนตัวอย่าง RAP 100 Lab-Mix & Compact แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยในการก่อสร้าง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างก้อนตัวอย่างที่เจาะเก็บมาจากในสนาม (Coring) กับก้อนตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (Lab-Mix & Compact) ของส่วนผสม RAP 70 พบว่า ก้อนตัวอย่าง RAP 70 Coring ส่วนบน มีค่า ITS $_{Unsoaked}$ สูงกว่าก้อนตัวอย่าง RAP 70 Lab-Mix & Compact แสดงให้เห็นว่า แม้ว่าส่วนผสม RAP 70 ที่ได้จากการก่อสร้างในสนามและนำมาบดอัดในห้องปฏิบัติการ (RAP 70 Lab-Compact) จะมีคุณสมบัติต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ แต่การบดอัดในสนามที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ก็ยังคงส่งผลให้ส่วนผสมที่ผสมและบดอัดในสนาม (RAP 70 Coring) มีค่า ITS $_{Unsoaked}$ สูงกว่าส่วนผสมที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ (RAP 70 Lab-Mix & Compact)

จากการเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ ที่อายุ 4 วัน ของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ทั้งสามรูปแบบ พบว่า

- การบดอัดในสนามให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ส่งผลให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากการบดอัดในสนามมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงกว่าส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ

- ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากการก่อสร้างในสนามมีคุณสมบัติไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการก่อสร้าง ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 4

5.4.2 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

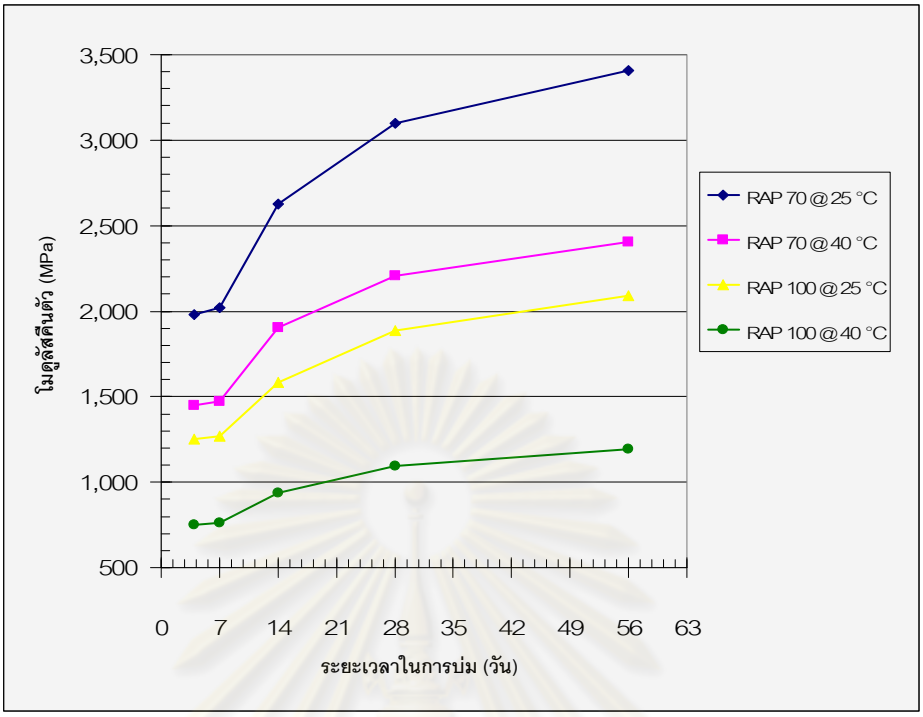
การศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ จะทดสอบกับก้อนตัวอย่างที่ผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C ละ 40˚C เมื่อก้อนตัวอย่างมีอายุ 4, 7, 14, 28 และ 56 วัน ซึ่งมีผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 5.19 และ 5.20

ตารางที่ 5.19 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 (RAP 70) โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม

ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	โมดูลัสคืนตัว (MPa)	
	ทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C	ทดสอบที่อุณหภูมิ 40˚C
4	1,981	1,448
7	2,020	1,474
14	2,626	1,901
28	3,099	2,205
56	3,409	2,404

ตารางที่ 5.20 ผลการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 (RAP 100) โดยศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม

ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	โมดูลัสคืนตัว (MPa)	
	ทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C	ทดสอบที่อุณหภูมิ 40˚C
4	1,250	750
7	1,268	760
14	1,585	935
28	1,886	1,094
56	2,093	1,193



ภาพที่ 5.11 ค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์โดยพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่ม

จากภาพที่ 5.11 ค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสม RAP 70 มีค่าสูงกว่าส่วนผสม RAP 100 ทั้งการทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C และ 40˚C และเมื่อพิจารณาจากผลของอุณหภูมิในการทดสอบที่มีต่อค่าโมดูลัสคืนตัวแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสม RAP 100 มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม RAP 70 ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนผสม RAP 100 มีปริมาณวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่มีปริมาณแอสฟัลต์เก่าผสมอยู่สูงกว่าส่วนผสม RAP 70 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้ส่วนผสม RAP 100 มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสม RAP 70 เช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

เมื่อนำค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสม RAP 70 และส่วนผสม RAP 100 ที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 ˚C มาพิจารณาหาค่าอัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ทั้งสองส่วนผสม พบว่าได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 การพัฒนากำลังของค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C

ระยะเวลาในการบ่ม	RAP 70		RAP 100	
	ค่าโมดูลัสคืนตัว	การพัฒนากำลังเมื่อเทียบกับที่อายุ 4 วัน	ค่าโมดูลัสคืนตัว	การพัฒนากำลังเมื่อเทียบกับที่อายุ 4 วัน
(วัน)	(MPa)	(เท่า)	(MPa)	(เท่า)
4	1,981	1.00	1,250	1.00
7	2,020	1.02	1,268	1.01
14	2,626	1.33	1,585	1.27
28	3,099	1.56	1,886	1.51
56	3,409	1.72	2,093	1.67

จากตารางที่ 5.21 การพัฒนากำลังของค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงอายุ 7 ถึง 14 วัน ค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยส่วนผสม RAP 70 มีอัตราการพัฒนากำลังที่สูงกว่าส่วนผสม RAP 100

เมื่อนำอัตราการพัฒนากำลังของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) และอัตราการพัฒนากำลังของค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus: MR) ของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มาเปรียบเทียบ ดังแสดงในตารางที่ 5.22

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.22 การเปรียบเทียบอัตราการพัฒนากำลังของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมกับอัตราการพัฒนากำลังของค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

ระยะเวลาในการบ่ม	อัตราการพัฒนากำลัง เมื่อเทียบที่อายุ 4 วัน			
	RAP 70		RAP 100	
	ITS	MR	ITS	MR
(วัน)	(เท่า)	(เท่า)	(เท่า)	(เท่า)
4	1.00	1.00	1.00	1.00
7	1.03	1.02	1.02	1.01
14	1.13	1.33	1.11	1.27
28	1.18	1.56	1.13	1.51
56	1.22	1.72	1.17	1.67

จากตารางที่ 5.22 กำลังความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมและค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม โดยเฉพาะช่วงเวลา 7 ถึง 14 วัน ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีอัตราการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่าโมดูลัสคืนตัวมีอัตราการพัฒนากำลังที่สูงกว่ากว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม และส่วนผสม RAP 70 มีค่าสูงกว่าส่วนผสม RAP 100 ทั้งสองคุณสมบัติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการก่อสร้างและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่นำกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ในประเทศไทย โดยได้ศึกษากระบวนการก่อสร้างโครงการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่แบบผสมเย็นในที่ด้วยโฟมแอสฟัลต์ของกรมทางหลวง ในการบูรณะทางหลวงหมายเลข 304 ระหว่าง กม. 94+253 – กม. 97+091 (ด้านขาล่อง) และกม. 98+350 – กม. 101+000 (ด้านขาล่อง) อำเภอปักธงชัย จังหวัดนครราชสีมา และเก็บวัสดุจากในสนามมาทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม ซึ่งประกอบด้วย ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม และค่าโมดูลัสคืนตัว นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลกระทบของระยะเวลาที่มีต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมดังกล่าวของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์

จากการศึกษาวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยในการก่อสร้างที่มีผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

- ความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องกัด (Recycler) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดมีผลต่อขนาดของวัสดุ หากเครื่องกัดเดินเร็วจะทำให้วัสดุที่กัดได้มีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้ส่วนผสมที่ได้มีขนาดคละที่ไม่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งจะส่งผลให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้มีคุณสมบัติไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

- สภาพของหัวกัด หากหัวกัดสึกกร่อนไม่อยู่ในสภาพที่ดี จะทำให้วัสดุที่กัดได้มีขนาดใหญ่เกินไป

- อุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ในขณะฉีดโฟม ควรมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 160˚C เนื่องจากอุณหภูมิของยางแอสฟัลต์มีผลต่อความสมบูรณ์ของการเกิดโฟมแอสฟัลต์

- การบดอัดหลังการผสม ต้องไม่ทิ้งช่วงการบดอัดนานจนเกินไป เพราะเนื่องจากจะทำให้ความชื้นของส่วนผสมลดลง ซึ่งจะส่งผลให้การบดอัดไม่มีประสิทธิภาพ ไม่สามารถบดอัดให้ได้ความหนาแน่นสูงสุดตามที่ต้องการได้

2. เนื่องมาจากในกระบวนการก่อสร้างมีปัจจัยที่ต้องควบคุมหลายปัจจัย คุณสมบัติของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากการก่อสร้างในสนามจึงมีความแปรปรวนสูง

3. จากผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในสนามและในห้องปฏิบัติการพบว่า การบดอัดในสนามมีประสิทธิภาพสูงกว่าการบดอัดในห้องปฏิบัติการ โดยการบดอัดในสนามทำให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่สูงกว่าการบดอัดในห้องปฏิบัติการ

4. ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากการผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการมีคุณสมบัติสม่ำเสมอใกล้เคียงกับการออกแบบและเป็นไปตามทฤษฎีมากกว่าส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ได้จากการก่อสร้างในสนาม

5. ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีค่า Retained Strength Ratio ตั้งแต่ 0.86 ขึ้นไป ซึ่งจากผลการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา Maccarrone (1994) ได้แนะนำว่า ค่า Retained Strength Ratio ของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.50

6. จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์พบว่า ส่วนผสม RAP 100 ซึ่งเป็นการใช้วัสดุโครงสร้างทางเดิมเพียงอย่างเดียว ให้ผลดีไม่น้อยกว่าการเติมหินฝุ่นเพิ่มเข้าไป แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาผลในระยะยาวเพิ่มเติม

7. จากการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์พัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 7 ถึง 14 วัน โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสม RAP 70 มีค่าสูงกว่าส่วนผสม RAP 100 ทั้งการทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C และ 40˚C ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในการทดสอบที่อุณหภูมิ 25˚C ที่อายุ 28 วัน ของส่วนผสม RAP 70 และ RAP 100 มีค่าเท่ากับ 1.18 และ 1.13 เท่า ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ที่อายุ 4 วัน

8. จากการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาในการบ่มที่มีต่อค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุโครงสร้างทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์พบว่า ค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์พัฒนากำลังอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 7 ถึง 14 วัน เช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม แต่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการทดสอบมากกว่า โดยส่วนผสม RAP 100 มีปริมาณวัสดุโครงสร้างทางเดิมซึ่งมีปริมาณแอสฟัลต์เก่าผสมอยู่ในปริมาณที่มากจะอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการทดสอบมากกว่าส่วนผสม RAP 70

9. การพัฒนากำลังของค่าโมดูลัสคืนตัวมีอัตราการพัฒนากำลังที่สูงกว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม เมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาในการบ่มที่เท่ากัน โดยค่าโมดูลัสคืนตัวในการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ที่อายุ 28 วัน ของส่วนผสม RAP 70 และ RAP 100 มีค่าเท่ากับ 1.56 และ 1.51 เท่า ของค่าโมดูลัสคืนตัว ที่อายุ 4 วัน

6.2 **ข้อเสนอแนะ**

1. รถบรรทุกยางแอสฟัลต์ในปัจจุบันไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ ให้ความร้อนแก่ยางแอสฟัลต์ที่บรรทุกโดยการเผาด้วยฟืน ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของยางแอสฟัลต์ให้คงที่ได้ ซึ่งอุณหภูมิของยางแอสฟัลต์มีผลต่อความสมบูรณ์ในการเกิดโฟมแอสฟัลต์เป็นอย่างมาก ดังนั้นรถบรรทุกยางแอสฟัลต์จึงควรมีการติดตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิยาง

2. ควรมีการทำแปลงทดสอบก่อนการก่อสร้างจริง เพื่อปรับกระบวนการทำงานของเครื่องกัดให้เข้าที่และพิจารณาหาค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องกัดที่ทำให้ได้วัสดุที่มีขนาดเหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพ

3. ควรตรวจสอบสภาพของหัวกัดเสมอ หัวกัดต้องอยู่ในสภาพที่ดีเพราะเมื่อหัวกัดสึกกร่อนจะทำให้ได้วัสดุที่มีขนาดใหญ่เกินไป

4. จากการพิจารณาชั้นพื้นทางใหม่ที่ได้จากการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์แบบผสมเย็นในที่ (Foamed Asphalt Cold In-Place Recycling) นั้น พบว่ามีลักษณะคล้ายกับแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน (Hot Mix Asphalt Concrete) กล่าวคือ มีลักษณะผิวที่ค่อนข้างเรียบแน่น ดังนั้นในการสเปรย์ Prime Coat จึงควรใช้ปริมาณยางน้อยกว่าปกติที่ใช้กับการสเปรย์บนวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ (Cement

Recycling) โดยอาจใช้ปริมาณยาง Prime Coat ใกล้เคียงกับปริมาณยาง Tack Coat หรือประมาณ 0.4 ลิตรต่อตารางเมตร

5. การเจาะเก็บก้อนตัวอย่างในสนามควรกระทำหลังจากการก่อสร้างอย่างน้อยประมาณ 10 – 14 วัน เพื่อจะได้ก้อนตัวอย่างที่สมบูรณ์ ไม่แตกหัก

6. การเก็บส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์กลับมาบดอัดในห้องปฏิบัติการ ต้องรักษาความชื้นของส่วนผสมไว้และไม่ทิ้งช่วงการบดอัดนานจนเกินไป

7. ก่อนการก่อสร้างควรศึกษาลักษณะของโครงสร้างเดิมของถนนที่ต้องการปรับปรุง และควรมีการเจาะสำรวจโครงสร้างทางเดิมอย่างน้อยทุก 100 เมตร เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างสร้างทางเดิมมีลักษณะเดียวกับที่จะนำไปออกแบบ เนื่องจากการเปลี่ยนไปของโครงสร้างทางจะมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพ หากไม่ตรวจสอบอย่างละเอียดอาจทำให้การก่อสร้างต้องหยุดชะงัก

8. การศึกษาในครั้งนี้ศึกษาเฉพาะความเหมาะสมในการใช้งานของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ทางด้านวิศวกรรมเป็นหลัก แต่ความเหมาะสมทางด้านอื่น ๆ อาทิเช่น ทางด้านเศรษฐศาสตร์เป็นอีกด้านหนึ่งที่ควรพิจารณาและศึกษาต่อไป เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมของการนำโฟมแอสฟัลต์มาใช้งานสำหรับประเทศไทยในทุกด้าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชยธันว์ พรหมศร. การวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของวัสดุงานทาง โดยวิธี INDIRECT TENSILE TEST เพื่อใช้ออกแบบโครงสร้างถนนเชิงวิเคราะห์. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์, 2541.

ชยธันว์ พรหมศร และคณะ. คุณสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) และ ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์, 2546.

ทางหลวง, กรม. สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ. มาตรฐานวิธีการทดลอง (ทล.-ท.). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, 2517.

วรภัทร เกตุนุติ. การประยุกต์เทคนิคโฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

สมเกียรติ เตรียมแจ้งอรุณ. วิธีการปรับสภาพวัสดุจราจรแอสฟัลต์ติกคอนกรีตเก่ามาใช้งานใหม่ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.

ภาษาอังกฤษ

Akeroyd, F.M.L. Advances in Foamed Bitumen Technology. Proceedings of the 5th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Swaziland, 1989, Section 8, pp. 1-4. Swaziland: CAPSA,1989.

Long, F. and Theyse, H. Interim Technical Guideline: The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials. Southern Africa: Asphalt Academy, 2002.

Bergeron, A. Research Perspective In-situ Recycling and Rehabilitation. Proceedings of Internal Seminar Division of Road and Materials Ministry of Transportation Quebec, Canada, 1982, pp. 113-120. Canada: Du Quebec, 1992.

Chiu, C.T., Huang, M.Y. and Lu, L.C. A study on the Application of Foamed Asphalt in Taiwan. Taiwan: Department of Civil Engineering Chung Hau University, 2002.

Koender, B.G., Stoker, D.A., Robertus, C., Larsen, O. and Johansen, J. WAM-Foamed, Asphalt production at low operation temperatures. Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements, Denmark, 2002, pp. 641-650. Denmark: ISAP, 2002.

Maccarrone, S., Holleran, G., Leonard, D.J. and Hey, S. Pavement Recycling using Foamed Bitumen. Proceedings of the 17th ARRB Conference, Queensland, 1994, pp. 349-365. Queensland: Australian Road Research, 1994.

Maccarrone, S., Holleran, G., and Ky, A. Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hotmix. Proceedings of the 9th Australian Asphalt Pavement Association International Asphalt Conference, Australia, 1995, pp. 265-272. Australia: AAPA, 1995.

Ramanujam, J.M. and Fernando, D.P. Foamed Bitumen Trial at Gladfield-Cunningham Highway. Proceedings of the Southern Region Symposium, Australia, 1997, pp. 257-269. Australia: AAPA, 1997.

Robert, F.L., Engelbrecht, J.C. and Kennedy, T.W. Evaluation of Recycled Mixture Using Foamed Asphalt. Transportation Research Record 968 (1984): 78-85.

Ruckel, P.J., Kole, L.L., Acott, S.M. and Bowering, R.H. Foamed Asphalt Paving Mixture: Preparation of Design Mixture and Treatment Test Specimens. Transportation Research Record 911 (1983): 88-95.

Ruckel, P.J., Kole, L.L., Zator, R.E., Button, J.W. and Epps, J.A. Foamix Asphalt Advance. Asphalt Pavement Construction: New Materials and Techniques. American Society for Testing and Materials ASTM STP 724 (1982): 93-109.

Wijk, A.V. and Wood, L.e. Use of Foamed Asphalt in Recycling of an Asphalt Pavement. Transportation Research Record 911 (1983): 96-103.

Wirtgen Group. Wirtgen Cold Recycling Manual. 2nd edition. Germany: Wirtgen GmbH, 2004.

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบหาขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม (RAP)

Sieve Sizes	First Trial			Second Trial			Third Trial			AVERAGE
	Retained gm.	Passing gm.	Passing %	Retained gm.	Passing gm.	Passing %	Retained gm.	Passing gm.	Passing %	% Passing
3/4"	-	6,159.7	100	-	6,000.6	100	-	6,268.9	100	100
1/2"	643.3	5,516.4	89.6	532.8	5,467.8	91.1	701.0	5,567.9	88.8	89.8
3/8"	620.2	4,896.2	79.5	613.5	4,854.3	80.9	655.8	4,912.1	78.4	79.6
# 4	1,509.7	3,386.5	55.0	1647.0	3,207.3	53.4	1,869.5	3,042.6	48.5	52.3
# 8	1,507.7	1,878.8	30.5	1429.8	1,777.5	29.6	1,425.8	1,616.8	25.8	28.6
#16	971.0	907.8	14.7	895.1	882.4	14.7	815.9	800.9	12.8	14.1
#30	477.7	430.1	7.0	446.1	436.3	7.3	401.9	399.0	6.4	6.9
#50	248.5	181.6	2.9	244.0	192.3	3.2	222.9	176.1	2.8	3.0
#100	101.8	79.8	1.3	109.0	83.3	1.4	100.7	75.4	1.2	1.3
#200	21.5	58.3	0.9	30.0	53.3	0.9	27.5	47.9	0.8	0.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบหาขนาดคละของหินฝุ่น

Sieve Sizes	First Trial			Second Trial			Third Trial			AVERAGE
	Retained gm.	Passing gm.	Passing %	Retained gm.	Passing gm.	Passing %	Retained gm.	Passing gm.	Passing %	% Passing
3/8"	-	953.2	100	-	925.7	100	-	1,013.1	100	100
# 4	15.1	938.1	98.4	16.7	909.0	98.2	13.1	1,000.0	98.7	98.4
# 8	319.9	618.2	64.9	355.7	553.4	59.8	270.0	730.0	72.1	65.6
#16	213.8	404.4	42.4	252.5	300.9	32.5	249.3	480.7	47.4	40.8
#30	126.2	278.3	29.2	73.4	227.4	24.6	143.8	336.9	33.3	29.0
#50	61.5	216.8	22.7	51.5	175.9	19.0	93.3	243.6	24.0	21.9
#100	45.5	171.3	18.0	31.0	144.9	15.7	55.5	188.1	18.6	17.4
#200	25.9	145.4	15.2	13.3	131.6	14.2	27.8	160.3	15.8	15.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของส่วนผสม 1 (RAP 70)

COMPACTION TEST						
Soil Sample	วัสดุโครงสร้างทางเดิม 70% หินฝุ่น 30 % (Passing #200 = 5 - 10 %)					
Location	ทางหลวงหมายเลข 304 กม.98+350 - กม.101+000 (ด้านขาล่อง)					
Type Test	Modified Proctor					
Mold Wt.	4.947	Kg.				
Mold Volume	954.6	ml.				
DENSITY						
Trial (water added)		0%	2 %	4 %	6 %	8 %
Wt.Mold + Soil	(Kg.)	6.880	6.946	7.030	7.065	7.020
Wt.Mold	(Kg.)	4.947	4.947	4.947	4.947	4.947
Wt. Soil	(Kg.)	1.933	1.999	2.083	2.118	2.073
Wet Density	(gm/ml.)	2.024	2.094	2.182	2.218	2.171
Dry Density	(gm/ml.)	1.998	2.029	2.075	2.089	2.010
WATER CONTENT						
Can No.		1	2	3	4	5
Wt.Can + Wet Soil	(gm)	505.2	434.7	421.8	452.5	466.9
Wt.Can + Dry Soil	(gm)	499.2	422.5	403.0	428.2	435.0
Wt. Water	(gm)	6.0	12.2	18.8	24.3	31.9
Wt.Can	(gm)	36.7	36.8	36.5	36.4	36.2
Wt.Dry Soil	(gm)	462.5	385.7	366.5	391.8	398.8
Water content	(%)	1.3	3.2	5.1	6.2	8.0

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการบดอัดของส่วนผสม 2 (RAP 100)

COMPACTION TEST						
Soil Sample	วัสดุโครงสร้างทางเดิม 100% (Passing #200 = 0 - 5 %)					
Location	ทางหลวงหมายเลข 304 กม.94+253 - กม.97+091 (ด้านขาล่อง)					
Type Test	Modified Proctor					
Mold Wt.	4.257	Kg.				
Mold Volume	931.0	ml.				
DENSITY						
Trial (water added)		2 %	4 %	6 %	8 %	10 %
Wt.Mold + Soil	(Kg.)	5.998	6.171	6.245	6.231	6.200
Wt.Mold	(Kg.)	4.257	4.257	4.257	4.257	4.257
Wt. Soil	(Kg.)	1.741	1.914	1.988	1.974	1.943
Wet Density	(gm/ml.)	1.870	2.056	2.135	2.120	2.087
Dry Density	(gm/ml.)	1.829	1.969	2.014	1.955	1.890
WATER CONTENT						
Can No.		1	2	3	4	5
Wt.Can + Wet Soil	(gm)	312.2	322.0	300.8	340.6	307.7
Wt.Can + Dry Soil	(gm)	306.2	310.1	286.0	317.3	282.4
Wt. Water	(gm)	6.0	11.9	14.8	23.3	25.3
Wt.Can	(gm)	39.8	39.3	40.8	42.2	39.4
Wt.Dry Soil	(gm)	266.4	270.8	245.2	275.1	243.0
Water content	(%)	2.3	4.4	6.0	8.5	10.4

ภาคผนวก ข
การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 โดยผสมและบดอัดในสนาม (RAP 70 Coring) ส่วนบน

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	61.53	59.69	57.78	60.36	57.24	57.19	49.39	59.26	59.13	55.52
	2	61.27	59.83	57.64	58.59	57.08	57.88	49.19	58.90	56.92	54.56
	3	60.69	60.20	58.67	59.72	56.81	56.73	49.10	57.13	57.43	54.64
	4	60.38	59.91	58.28	60.20	56.35	57.49	50.24	58.76	58.18	64.94
	Average	60.97	59.91	58.09	59.72	56.87	57.32	49.48	58.51	57.92	57.42
Diameter (mm)	1	99.06	99.10	99.07	99.21	98.98	99.28	99.41	99.46	99.45	98.81
	2	98.45	98.73	99.08	99.04	99.17	99.20	99.57	99.15	99.70	99.11
	Average	98.76	98.92	99.08	99.13	99.08	99.24	99.49	99.31	99.58	98.96
Weight	(g)	1,090.2	1,065.2	1,026.6	1,060.6	981.2	1,017.5	872.5	1,010.5	1,041.8	986.7
Density	(t/m^3)	2.335	2.314	2.292	2.301	2.238	2.295	2.268	2.230	2.310	2.234
Average Density	(t/m^3)	2.296					2.267				
Load	(kN)	4.437	3.836	6.606	6.310	3.679	3.699	3.049	3.694	3.466	4.474
Indirect Tensile Strength	(kPa)	469	412	731	679	416	414	394	405	383	501
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	541					419				
Retained Strength Ratio		1.29									

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 โดยผสมและบดอัดในสนาม (RAP 70 Coring) ส่วนล่าง

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	53.41	56.28	56.40	53.99	57.42	57.95	47.78	57.66	54.32	51.29
	2	53.36	55.68	56.38	54.28	57.22	57.96	48.32	57.99	54.19	52.15
	3	52.70	54.88	55.96	54.27	57.03	57.72	47.91	57.98	54.14	52.75
	4	52.98	54.85	55.98	55.70	56.92	57.75	47.69	57.75	54.30	52.26
	Average	53.11	55.42	56.18	54.56	57.15	57.85	47.93	57.85	54.24	52.11
Diameter (mm)	1	99.34	99.42	98.91	98.84	99.06	98.91	99.23	99.34	99.44	99.35
	2	99.43	99.63	99.21	99.02	99.23	99.62	99.04	99.50	97.79	99.63
	Average	99.39	99.53	99.06	98.93	99.15	99.27	99.14	99.42	98.62	99.49
Weight	(g)	951.1	980.8	974.0	956.2	961.0	1,007.2	821.0	971.3	960.3	942.8
Density	(t/m^3)	2.308	2.275	2.250	2.280	2.178	2.250	2.219	2.163	2.318	2.327
Average Density	(t/m^3)	2.258					2.256				
Load	(kN)	3.047	2.911	4.457	5.058	3.635	3.269	2.692	2.776	2.660	4.142
Indirect Tensile Strength	(kPa)	367	336	510	597	408	362	361	307	317	509
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	444					371				
Retained Strength Ratio		1.20									

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 โดยผสมและบดอัดในสนาม (RAP 100 Coring) ส่วนบน

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	51.14	52.20	49.38	53.00	57.49	55.55	57.74	57.00	56.23	58.56
	2	50.91	53.96	48.78	53.96	56.52	55.36	56.76	59.07	57.01	59.92
	3	49.63	53.06	50.26	54.14	55.84	54.72	56.84	60.31	57.09	60.22
	4	50.01	52.03	49.86	53.74	57.19	54.12	58.53	58.20	56.61	57.71
	Average	50.42	52.81	49.57	53.71	56.76	54.94	57.47	58.65	56.74	59.10
Diameter (mm)	1	99.02	98.44	99.06	98.46	99.38	99.54	99.35	99.48	98.76	99.04
	2	98.57	98.15	99.24	98.86	99.69	99.44	99.24	99.32	98.90	98.51
	Average	98.80	98.30	99.15	98.66	99.54	99.49	99.30	99.40	98.83	98.78
Weight	(g)	901.4	928.9	867.6	928.5	1,011.5	975.3	1,009.2	1,044.4	994.8	1,059.1
Density	(t/m^3)	2.332	2.318	2.267	2.261	2.290	2.284	2.268	2.295	2.286	2.339
Average Density	(t/m^3)	2.294					2.294				
Load	(kN)	5.611	5.118	4.638	4.959	5.879	4.749	4.716	5.278	4.567	4.994
Indirect Tensile Strength	(kPa)	717	628	601	596	662	553	526	576	519	545
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	641					544				
Retained Strength Ratio		1.18									

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 โดยผสมและบดอัดในสนาม (RAP 100 Coring) ส่วนล่าง

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	49.06	49.33	43.30	56.11	55.90	55.88	53.99	53.58	59.78	56.19
	2	49.49	50.28	42.83	55.49	56.14	54.13	54.76	53.70	59.35	56.18
	3	49.47	49.66	43.00	55.99	56.80	54.05	54.02	53.59	59.11	55.86
	4	48.86	49.60	43.35	56.27	57.00	55.59	53.94	53.56	59.47	55.94
	Average	49.22	49.72	43.12	55.97	56.46	54.91	54.18	53.61	59.43	56.04
Diameter (mm)	1	99.26	99.23	98.59	99.58	99.66	99.67	99.70	99.57	99.67	99.64
	2	99.47	99.10	98.80	99.25	99.46	99.94	99.74	99.33	99.68	99.41
	Average	99.37	99.17	98.70	99.42	99.56	99.81	99.72	99.45	99.68	99.53
Weight	(g)	892.1	887.7	760.7	974.2	1,005.4	978.4	948.7	952.1	1,049.5	1,019.9
Density	(t/m^3)	2.337	2.312	2.306	2.243	2.287	2.277	2.242	2.286	2.263	2.339
Average Density	(t/m^3)	2.293					2.282				
Load	(kN)	5.199	4.351	4.376	4.427	5.705	4.851	4.416	4.972	4.851	4.657
Indirect Tensile Strength	(kPa)	677	562	655	507	646	563	520	594	521	532
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	609					546				
Retained Strength Ratio		1.12									

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 (RAP 70) โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	58.36	58.92	58.82	58.83	58.93	59.14	59.69	59.45	58.61	59.69
	2	58.03	57.44	59.65	59.65	58.86	59.07	60.01	59.39	59.77	58.83
	3	58.69	57.82	59.20	59.20	59.12	59.41	59.93	59.04	59.82	57.90
	4	57.43	59.11	57.69	57.69	59.26	58.76	58.80	59.39	58.86	57.96
	Average	58.13	58.32	58.84	58.84	59.04	59.10	59.61	59.32	59.27	58.60
Diameter (mm)	1	101.73	101.21	101.91	101.47	101.58	101.67	102.89	101.31	101.42	101.58
	2	101.65	101.45	101.89	101.44	101.53	101.49	100.18	100.50	101.48	101.74
	Average	101.69	101.33	101.90	101.46	101.56	101.58	101.54	100.91	101.45	101.66
Weight	(g)	1,037.2	1,032.4	1,035.5	1,029.9	1,027.4	1,036.1	1,033.4	1,034.8	1,031.1	1,034.1
Density	(t/m^3)	2.197	2.195	2.158	2.165	2.148	2.163	2.141	2.182	2.152	2.174
Average Density	(t/m^3)	2.173					2.163				
Load	(kN)	3.521	3.489	3.442	3.279	3.331	3.225	3.005	3.109	2.985	3.025
Indirect Tensile Strength	(kPa)	379	376	365	350	354	342	316	331	316	323
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	365					326				
Retained Strength Ratio		1.12									

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 (RAP 100) โดยผสมในสนามและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	60.80	60.52	60.61	59.27	59.78	59.41	59.43	60.18	63.81	59.99
	2	60.56	59.27	61.32	60.38	60.97	58.23	58.52	59.42	62.87	59.24
	3	59.43	59.92	60.87	58.88	60.69	59.60	59.14	59.02	61.95	58.85
	4	59.83	61.24	60.48	58.93	61.18	60.17	59.70	60.74	62.61	58.93
	Average	60.16	60.24	60.82	59.37	60.66	59.35	59.20	59.84	62.81	59.25
Diameter (mm)	1	101.50	101.32	101.26	101.25	101.72	101.53	101.43	101.41	101.51	102.54
	2	101.44	101.22	101.28	101.56	101.86	101.59	101.47	101.50	101.41	102.05
	Average	101.47	101.27	101.27	101.41	101.79	101.56	101.45	101.46	101.46	102.30
Weight	(g)	1,033.0	1,033.9	1,027.6	1,026.7	1,029.4	1,007.6	1,020.6	1,034.5	1,044.2	1,020.3
Density	(t/m^3)	2.124	2.131	2.098	2.141	2.086	2.096	2.133	2.138	2.056	2.095
Average Density	(t/m^3)	2.116					2.104				
Load	(kN)	3.649	3.580	3.919	3.712	3.807	3.542	3.210	3.588	3.339	3.412
Indirect Tensile Strength	(kPa)	381	374	405	393	393	374	340	376	334	358
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	389					357				
Retained Strength Ratio		1.09									

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 1 (RAP 70) โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	58.54	58.64	60.85	58.75	58.88	58.25	57.57	58.52	58.04	60.60
	2	59.40	58.50	59.57	59.49	53.19	58.42	57.52	59.26	58.12	60.63
	3	59.30	57.88	59.26	59.43	58.45	58.79	58.26	59.97	58.14	59.04
	4	58.73	58.38	59.86	59.28	60.11	58.64	57.44	58.29	58.77	59.33
	Average	58.99	58.35	59.89	59.24	57.66	58.53	57.70	59.01	58.27	59.90
Diameter (mm)	1	102.36	101.43	101.24	101.40	101.39	101.40	101.10	101.42	101.47	101.26
	2	102.20	101.26	101.32	101.53	101.45	101.66	101.56	101.32	101.43	101.25
	Average	102.28	101.35	101.28	101.47	101.42	101.53	101.33	101.37	101.45	101.26
Weight	(g)	994.0	999.7	993.7	994.4	966.00	986.7	987.0	981.1	986.30	999.80
Density	(t/m^3)	2.051	2.124	2.060	2.076	2.074	2.082	2.121	2.060	2.094	2.073
Average Density	(t/m^3)	2.077					2.086				
Load	(kN)	2.745	2.950	2.614	2.912	2.995	3.303	3.314	3.145	3.355	3.298
Indirect Tensile Strength	(kPa)	290	318	274	308	326	354	361	335	361	346
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	303					351				
Retained Strength Ratio		0.86									

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-8 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ส่วนผสม 2 (RAP 100) โดยผสมและบดอัดในห้องปฏิบัติการ

สภาพในการทดสอบ		แช่น้ำ (Soaked)					ไม่แช่น้ำ (Unsoaked)				
Specimen		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Thickness (mm)	1	61.22	61.34	61.97	62.00	61.49	61.55	61.44	61.44	61.22	61.00
	2	61.99	61.18	61.05	62.14	61.35	61.88	60.99	61.66	61.89	61.55
	3	61.87	61.77	61.44	62.34	61.44	61.45	61.52	61.40	61.47	61.07
	4	61.54	61.99	61.88	61.98	61.88	61.07	61.33	61.81	61.66	61.45
	Average	61.66	61.57	61.59	62.12	61.54	61.49	61.32	61.58	61.56	61.27
Diameter (mm)	1	101.22	101.01	101.01	101.22	101.14	101.34	101.22	101.21	101.25	101.22
	2	101.34	101.22	101.24	101.12	101.33	101.42	101.31	101.29	101.44.	101.24
	Average	101.28	101.12	101.13	101.17	101.24	101.38	101.27	101.25	101.25	101.23
Weight	(g)	981.0	991.4	980.0	1008.0	999.0	1002.5	979.5	973.9	989.3	998.5
Density	(t/m^3)	1.975	2.005	1.981	2.019	2.017	2.020	1.983	1.964	1.996	2.025
Average Density	(t/m^3)	1.999					1.998				
Load	(kN)	2.785	2.685	2.994	2.735	2.645	3.005	2.987	3.011	3.342	3.014
Indirect Tensile Strength	(kPa)	284	275	306	277	270	307	306	307	341	309
Average Indirect Tensile Strength	(kPa)	282					314				
Retained Strength Ratio		0.90									

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจิตติมา อังษานาม เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดระนอง เป็นบุตรของนายสมชายและนางกัญญา อังษานาม สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสามเสนวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน เมื่อปีการศึกษา 2548 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมขนส่ง) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคต้น ปีการศึกษา 2549

ในปี พ.ศ. 2551 ขณะที่ศึกษาอยู่ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้นำเสนอผลงานทางวิชาการในหัวข้อเรื่อง “ENGINEERING PROPERTIES OF COLD IN-PLACE RECYCLING MATERIALS TREATED WITH FOAMED ASPHALT IN THAILAND” ในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ The 6th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 20-23 กรกฎาคม พ.ศ. 2551 ที่ Sapporo Convention Center เมืองซัปโปโร ประเทศญี่ปุ่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย