

การประยุกต์เทคนิคโฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการนำวัสดุขึ้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย



นายวรภัทร เกตุญาติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

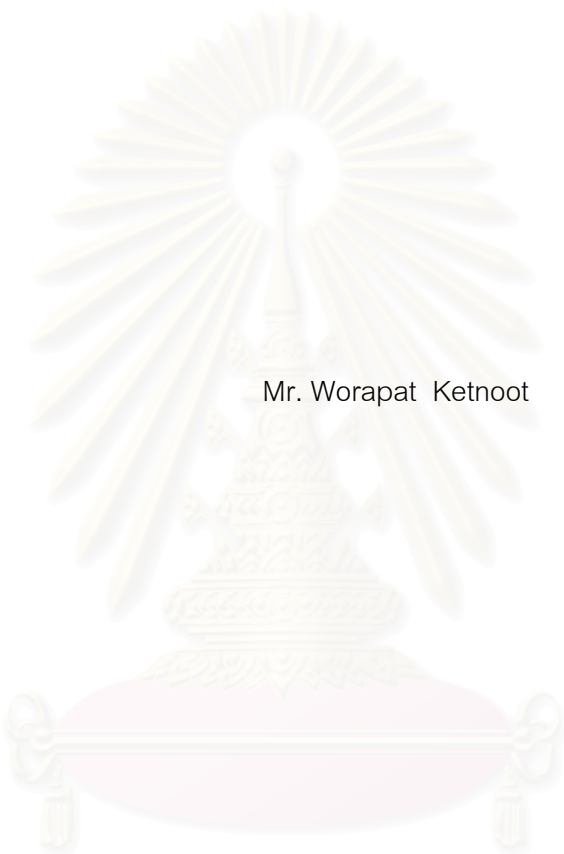
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4343-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF FOAMED ASPHALT TECHNIQUES ON RECYCLED PAVEMENT MATERIALS  
IN THAILAND



Mr. Worapat Ketnoot

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4343-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์เทคนิคโฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมา ใช้งานใหม่ในประเทศไทย
โดย	นายวรภัทร เกตุญาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ชยฉันทน์ พรหมศร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ อนุกัณฑ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.ชยฉันทน์ พรหมศร)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วรภัทร เกตุญาติ : การประยุกต์เทคนิคโฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมา  
ใช้งานใหม่ในประเทศไทย. (APPLICATION OF FOAMED ASPHALT TECHNIQUES  
ON RECYCLED PAVEMENT MATERIALS IN THAILAND) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.ดิเรก  
ลาวัณย์ศิริ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ชยธันว์ พรหมศร, 128หน้า. ISBN 974-17-4343-2.

โฟมแอสฟัลต์เกิดจากการพัฒนาการใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์ในรูปแบบใหม่ กระทำโดย  
การฉีดแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนและน้ำเข้าผสมกัน ผลที่ตามมาทำให้ปริมาตรของแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น  
อย่างรวดเร็วในรูปของฟองโฟม ขณะที่ความหนืดของแอสฟัลต์จะลดลง แอสฟัลต์ในรูปของโฟมจะ  
มีความสามารถในการกระจายตัวเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่ชื้นและเย็นได้ดี

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการนำโฟมแอสฟัลต์มาปรับปรุง  
สภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย ในการศึกษาพิจารณาถึงความ  
เป็นไปได้ที่จะนำวัสดุชั้นทางเก่าในปริมาณที่แตกต่างกันโดยกำหนดสัดส่วนร้อยละ 80 50 และ 0  
ผสมเข้ากับวัสดุมวลรวมใหม่ ผลการออกแบบพบว่าส่วนผสมต้องการปริมาณโฟมแอสฟัลต์ใน  
อัตราส่วนร้อยละ 2.1 2.6 และ 3.4 โดยน้ำหนักวัสดุมวลรวม ตามลำดับ แม้ว่าส่วนผสมที่มีวัสดุเก่า  
ผสมอยู่ปริมาณมากกว่าจะมีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต่ำ แต่จะมีอัตราส่วนความต้านทาน  
ต่อแรงดึงทางอ้อมสูงหลังจากการแช่น้ำ

การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิต่างๆแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีความ  
อ่อนไหวต่ออุณหภูมಿನ้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน สำหรับความต้านทานต่อการล้าและ  
การยุบตัวถาวร ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ถึงสมรรถนะในการใช้งาน พบว่าการผสมวัสดุชั้นทางเก่าลงใน  
ส่วนผสมสามารถกระทำได้ถึงร้อยละ 50 โดยที่ความสามารถในการต้านทานต่อการล้าและการยุบ  
ถาวรของส่วนผสมไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4470511321 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : FOAMED ASPHALT / RAP / INDIRECT TENSILE STRENGTH / RETAINED STRENGTH /  
RESILIENT MODULUS / FATIGUE RESISTANCE / PERMANENT DEFORMATION

WORAPAT KETNOOT : APPLICATION OF FOAMED ASPHALT TECHNIQUES  
ON RECYCLED PAVEMENT MATERIALS IN THAILAND. THESIS ADVISOR :  
PROF. DIREK LAVANSIRI, Ph.D., THESIS COADVISOR : CHAYATAN  
PHROMSORN, Ph.D., 128 pp. ISBN 974-17-4343-2.

Foamed asphalt is the result from the innovation process of developing asphalt cement application, where water is sprayed to mix with hot asphalt cement. This resulted in the rapid increase of the surface area of asphalt cement in a form of foam which reduces its viscosity, allowing a better mix with cold-damp aggregates.

The purpose of this research is to study the feasibility and suitability of applying foamed asphalt to improve the quality of reclaimed asphalt pavement (RAP) or recycled materials in Thailand. The focus is on the feasibility of mixing aggregates from the RAP with new aggregates in different proportions ranging from 80:20, 50:50 and 0:100. It was found according to the result that the mixtures require foamed asphalt in different proportions of 2.1%, 2.6% and 3.4% by weight of aggregate respectively. Although the mixtures with higher percentage of aggregate from RAP exhibited lower indirect tensile strength, but its retained strength after soaking in water is comparatively high.

It was found according to the resilient modulus test at different temperatures that the foamed asphalt mixture has lower temperature susceptibility than that of the hot-mix asphalt concrete. As regard to fatigue resistance and permanent deformation which are the indicators of performance in practical use, It was found that up to 50 percentage of aggregate from RAP can be used in the mix without any significant change to the fatigue resistance and the permanent deformation of the mix.

Department Civil Engineering

Student's signature.....

Field of study Civil Engineering

Advisor's signature.....

Academic year 2003

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญย์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.ชยธันว์ พรหมศร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนกรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งสำเร็จลงได้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อนุภักดิ์ อิศรเสนา ณ อยุธยา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ นฤปิติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณสมัคร สันทอง และคุณพรชัย ศีลารมย์ สำนักวิจัยและพัฒนา งานทาง กรมทางหลวง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านวัสดุ และเครื่องมือในการทดสอบรวมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำเกี่ยวกับปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจนสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบคุณ รุ่งพี เพื่อน และรุ่นน้อง ร่วมสาขาวิศวกรรมขนส่งและจราจร คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาและให้กำลังใจ ตลอดจนความเข้าใจตลอดมา จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทบทวนแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3 วิธีดำเนินการศึกษา.....	33
3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	33
3.2 การทดสอบหาคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม..	34
3.3 การเตรียมวัสดุผสมรวม.....	35
3.4 การออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์.....	39
3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์.....	42

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	49
4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์.....	49
4.2 การทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม.....	51
4.3 การทดสอบวัสดุผสมรวม.....	53
4.4 การออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์.....	61
4.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม.....	66
5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 ข้อสรุปผล.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก.....	85
ภาคผนวก ข.....	90
ภาคผนวก ค.....	100
ภาคผนวก ง.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	128



## สารบัญญัตินำ

ตาราง		หน้า
2.1	ข้อดีและข้อเสียของการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....	12
2.2	ข้อดีและข้อเสียของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน.....	12
2.3	ข้อดีและข้อเสียของการใช้โพนแอสฟัลต์.....	13
2.4	ปริมาณโพนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุผสมประเภทต่างๆ.....	18
2.5	ปริมาณโพนแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามประเภทวัสดุผสม.....	23
2.6	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ตามประเภทวัสดุผสม.....	23
2.7	ค่าโมดูลัสคืนตัว ตามประเภทวัสดุผสม.....	23
2.8	วิธีการออกแบบและวิธีการประเมินค่าส่วนผสมของประเทศต่างๆ.....	24
2.9	มาตรฐานของวัสดุและการก่อสร้าง.....	25
2.10	มาตรฐานการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory Compactor.....	29
3.1	มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ยังไม่ผ่านการอบ.....	33
3.2	มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบ.....	34
3.3	ค่าหน่วยแรงที่ใช้สำหรับการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิ.....	44
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ยังไม่ผ่านการอบ.....	49
4.2	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบ.....	50
4.3	ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโพนแอสฟัลต์.....	51
4.4	คุณลักษณะของโพนแอสฟัลต์เพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม.....	53
4.5	ขนาดคละของวัสดุชั้นทางเก่า (RAP) และวัสดุผสมใหม่.....	54
4.6	ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์เก่า.....	54
4.7	สัดส่วนผสมระหว่างชั้นทางเก่า (RAP) และวัสดุผสมใหม่.....	56
4.8	ส่วนผสมที่ได้รับการปรับขนาดคละแล้ว.....	57
4.9	สรุปค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสม.....	61
4.10	ผลการออกแบบส่วนผสมโพนแอสฟัลต์.....	65
4.11	ค่าแนะนำสำหรับการออกแบบส่วนผสมโพนแอสฟัลต์โดยทั่วไป.....	65
4.12	เปรียบเทียบผลค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่ได้กับค่าจากแหล่งอ้างอิงอื่นๆ....	68
4.13	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของแต่ละส่วนผสม.....	69
5.1	การเปรียบเทียบราคาโดยประมาณของการบูรณะบำรุงทางวิธีต่างๆ.....	80

## สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1	สัดส่วนงบประมาณบูรณะบำรุงทางต่องบประมาณทั้งหมดในแต่ละปี
	ของกรมทางหลวง.....1
2.1	เครื่องจักรกลในงานผสมเย็นในที่.....6
2.2	เครื่องจักรกลในงานผสมเย็นภายในโรงงาน.....7
2.3	กระบวนการผสมสารปรับปรุงสภาพเข้ากับวัสดุมวลรวม.....8
2.4	ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์.....9
2.5	ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน.....9
2.6	ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้โฟมแอสฟัลต์.....10
2.7	กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์.....14
2.8	รูปลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้น.....15
2.9	ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่เกิดขึ้นตามปริมาณน้ำที่ใช้.....16
2.10	ขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวม.....17
2.11	ชุดเครื่องมือสำหรับการผลิตโฟมแอสฟัลต์.....19
2.12	ขั้นตอนการชุดหรือผิวทางชั้นแรก.....20
2.13	ขั้นตอนการปรับระดับชั้นทาง.....20
2.14	การโรยผงปูนขาวลงบนหน้าผิวทางที่ถูกชุดหรือ.....21
2.15	เครื่องจักรที่ออกแบบเป็นพิเศษในงานโฟมแอสฟัลต์.....21
2.16	การคลุกผสมระหว่างมวลรวมกับโฟมแอสฟัลต์ภายในห้องผสม.....22
2.17	การบดอัดชั้นทางที่ได้รับการปรับสภาพแล้ว.....22
2.18	อิทธิพลของการบ่มที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสม.....27
2.19	ขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวม.....31
3.1	ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์.....34
3.2	มาตรวัดอุณหภูมิแอสฟัลต์และมาตรวัดปริมาณน้ำที่ติดตั้งในเครื่อง.....35
3.3	การชุดหรือชั้นทางเก่า.....36
3.4	ระดับชั้นของชั้นทางที่ชุดหรือ.....36
3.5	ขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวมสำหรับโฟมแอสฟัลต์.....37
3.6	การทดสอบหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม.....38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.7	ขั้นตอนการผสมน้ำเข้ากับวัสดุมวลรวม.....39
3.8	ชุดเครื่องมือสำหรับการผสมโฟมแอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวม.....40
3.9	การบ่มก้อนตัวอย่างในตู้อบ.....40
3.10	การวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง.....40
3.11	การทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ.....41
3.12	แผนผังการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์.....41
3.13	เครื่อง Universal Testing Machine (UTM-5P).....42
3.14	การจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม.....43
3.15	การจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร.....46
3.16	การทำ Heat Transfer Compound ที่ผิวบนและล่างของก้อนตัวอย่าง.....47
3.17	ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา.....48
4.1	โฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบ.....51
4.2	ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์.....52
4.3	ขนาดคละของวัสดุหินคลุกปนผิวทางเก่า (RAP).....55
4.4	ขนาดคละของวัสดุมวลรวมใหม่.....55
4.6	ขนาดคละของวัสดุมวลรวมทั้ง 3 ส่วนผสม.....58
4.7	ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 80% RAP.....59
4.8	ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 50% RAP.....60
4.9	ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 0% RAP.....60
4.10	ผลการทดสอบเพื่อออกแบบส่วนผสม 80%RAP.....62
4.11	ผลการทดสอบเพื่อออกแบบส่วนผสม 50%RAP.....63
4.12	ผลการทดสอบเพื่อออกแบบส่วนผสม 0%RAP.....64
4.13	เครื่องมือทดสอบและการจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหา ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม
4.14	ลักษณะการพังทลายของก้อนตัวอย่าง.....67
4.15	ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแต่ละส่วนผสม.....67
4.16	ค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมในแต่ละอุณหภูมิ.....70

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.17 ค่าโมดูลัสคีนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตในแต่ละอุณหภูมิ.....	71
4.18 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการล้าของแต่ละส่วนผสม.....	72
4.19 ค่าการยุบตัวสะสมในแต่ละจำนวนรอบของการป้อนน้ำหนัก.....	73
4.20 ค่าการยุบตัวสะสมที่จำนวนรอบการป้อนน้ำหนัก 40,000 รอบ.....	74



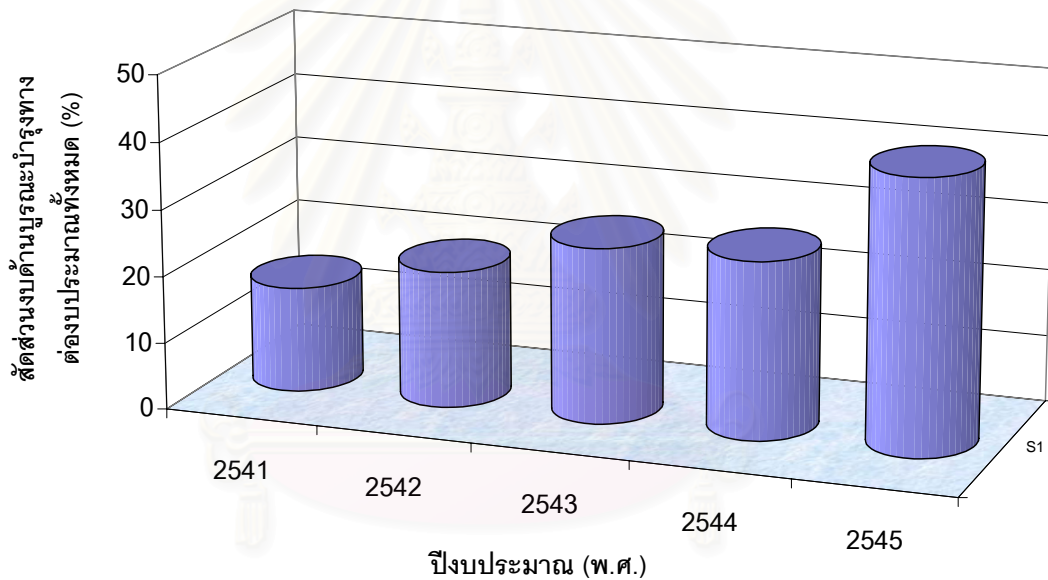
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การก่อสร้างถนนเส้นใหม่ในประเทศไทยมีจำนวนลดลง ด้วยเหตุที่ การก่อสร้างถนนใหม่เส้นหนึ่งนั้นจะต้องใช้งบประมาณในการก่อสร้างสูงและใช้เวลานาน ด้วย ข้อจำกัดด้านงบประมาณและสภาพเศรษฐกิจในปัจจุบัน กรมทางหลวงจึงเริ่มให้ความสำคัญกับการบูรณะบำรุงทางมากยิ่งขึ้น โดยเห็นได้ชัดเจนจากสัดส่วนของงบประมาณด้านบูรณะบำรุงทาง ของกรมทางหลวงในแต่ละปีที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.1 สัดส่วนงบประมาณบูรณะบำรุงทางต่องบประมาณทั้งหมดในแต่ละปีของกรมทางหลวง  
ที่มา : รายงานประจำปีกรมทางหลวง 2541-2545

ในงานด้านการบำรุงทาง การบำรุงทางโดยการเพิ่มความหนาผิวทางของโครงสร้างชั้นทาง (Overlay) ในถนนเก่า นั้น อาจทำให้เกิดปัญหาจากระดับถนนที่เปลี่ยนไปจนอาจมีผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้างสองข้างทาง หรือทำให้รูปแบบถนนทางเรขาคณิต (Geometric Design) เปลี่ยนแปลงไปจนมีผลกระทบต่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้ขีได้ ดังนั้นการบำรุงทางโดยการนำวัสดุชั้นทางเก่ามา

ปรับปรุงสภาพเพื่อใช้งานใหม่ (Pavement Recycling) จึงเป็นการแก้ไขปัญหานี้ได้อย่างเหมาะสม เพราะนอกจากจะช่วยรักษาระดับผิวทางและความกว้างของถนนให้คงสภาพเดิมมากที่สุดแล้ว ยังช่วยประหยัดการใช้วัสดุงานทางอีกด้วย

นอกจากนี้เมื่อคำนึงถึงราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นมาก และการให้ความสำคัญต่อปัญหาด้านมลภาวะในปัจจุบัน การนำวัสดุเก่ากลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม กระบวนการนี้จะกระทำโดยชุดวัสดุชั้นทางเก่าขึ้นมาพร้อมกับบดให้ละเอียด แล้วเติมสารปรับปรุงสภาพหรือเพิ่มวัสดุมวลรวมใหม่ก่อนที่จะนำกลับไปปูใหม่ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะนำกลับไปใช้เป็นชั้นพื้นทาง (Recycled Base) สำหรับสารปรับปรุงสภาพที่ใช้ในวิธีนี้อาจใช้ปูนซีเมนต์ หรือแอสฟัลต์ อิมัลชัน แต่จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้สารทั้งสองมีข้อจำกัด กล่าวคือ ปูนซีเมนต์นั้น หากใช้ในปริมาณที่สูงเกินไปจะทำให้ชั้นทางมีความเปราะสูง หรือทำให้ความยืดหยุ่นของชั้นทางลดลง ส่วนการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันนั้นจะต้องให้ความชื้นแก่วัสดุมวลรวมในปริมาณที่สูงเพื่อช่วยในการผสมให้เข้ากัน ความชื้นสูงในส่วนผสมนี้จะก่อให้เกิดปัญหาในการบดอัดได้

เนื่องจากข้อจำกัดและปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้มีการพัฒนาการใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์ในรูปแบบใหม่ขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานผสมเย็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt) ซึ่งได้รับการค้นคิดและพัฒนาขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1956 โดย Prof. Ladis Csanyi จากมหาวิทยาลัย Iowa State โฟมแอสฟัลต์เกิดจากการฉีดแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนและน้ำในปริมาณที่พอเหมาะเข้าผสมกัน ผลที่ตามมาทำให้แอสฟัลต์มีปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะฟองโฟม ในทางกลับกันความหนืดของแอสฟัลต์จะลดลง แอสฟัลต์ที่อยู่ในรูปโฟมนี้มีความสามารถในการเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่มีสภาพชื้นและเย็นได้ดี

โฟมแอสฟัลต์ได้รับการพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในประเทศแถบยุโรป อเมริกา ออสเตรเลีย แอฟริกาใต้ รวมถึงในแถบเอเชีย เช่น มาเลเซีย ใต้หวัน เนื่องด้วยข้อดีและการใช้งานอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ การใช้โฟมแอสฟัลต์จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญสำหรับประเทศไทยที่จะนำมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุงานทางภายในประเทศ ด้วยเหตุนี้การศึกษาเพื่อหาแนวทางการนำโฟมแอสฟัลต์มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุงานทางในประเทศไทย จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรเริ่มกระทำ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ให้เป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนางานบูรณะบำรุงทางในประเทศและเป็นแนวทางอ้างอิงสำหรับงานวิจัยต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาวิธีการและแนวทางการใช้โฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่า เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่

1.2.2 เพื่อสามารถนำเทคนิคโฟมแอสฟัลต์มาใช้ออกแบบส่วนผสมให้เหมาะสม กับวัสดุงานทางภายในประเทศได้

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบและคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ เมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนระหว่างวัสดุชั้นทางเก่ากับมวลรวมใหม่ภายในส่วนผสม

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาประกอบด้วย

1.3.1 การทดสอบใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC 60/70 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 851 เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์

1.3.2 วัสดุมวลรวมในการทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ วัสดุชั้นทางเก่า (ประกอบด้วยชั้นผิวทางและบางส่วนของชั้นพื้นทาง) และวัสดุมวลรวมใหม่

1.3.3 สัดส่วนระหว่างวัสดุชั้นทางเก่าและมวลรวมใหม่ได้รับการทดสอบใน 3 สัดส่วนคือ

- ส่วนผสม 1 วัสดุชั้นทางเก่า : วัสดุมวลรวมใหม่ 80 : 20
- ส่วนผสม 2 วัสดุชั้นทางเก่า : วัสดุมวลรวมใหม่ 50 : 50
- ส่วนผสม 3 วัสดุชั้นทางเก่า : วัสดุมวลรวมใหม่ 0 : 100

1.3.4 คุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ได้รับบ่งชี้ด้วยการทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test)

1.3.5 การศึกษาครั้งนี้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่านั้น โดยผลที่ได้รับจะสะท้อนถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานจริง

## 1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษา

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC 60/70 วัสดุชั้นทางเก่า และวัสดุมวลรวมใหม่ในการทดสอบครั้งนี้จะเป็นตัวแทนของวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างทางทั่วไปในประเทศไทย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการและแนวทางการใช้โคมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่

1.5.2 ทราบถึงข้อดีของการใช้โคมแอสฟัลต์ในงานปรับปรุงสภาพวัสดุงานทาง

1.5.3 สามารถนำโคมแอสฟัลต์มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุงานทางในประเทศได้

1.5.4 ผลจากการศึกษาครั้งนี้ จะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้โคมแอสฟัลต์สำหรับประเทศไทยต่อไปในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### ทบทวนแนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 การนำวัสดุเก่ากลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling)

การปรับปรุงสภาพวัสดุเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็น ได้เริ่มนำมาใช้ครั้งแรกในทศวรรษที่ 50 โดยการนำวัสดุแอสฟัลต์ (Asphalt) และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) มาผสมกับชั้นทางเก่าที่ถูกขุดลอกโดยใช้เครื่องจักรกลแล้วผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่เพื่อปรับปรุงคุณภาพของชั้นทางให้ดีขึ้น ลักษณะที่สำคัญของวิธีการนี้คือ ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม จึงสามารถลดการใช้เชื้อเพลิง และลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

วิธีการนี้จะเก็บตัวอย่างชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพ เพื่อนำไปหาคุณสมบัติของวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ ในวิธีการผสมเย็น สารปรับปรุงสภาพ (Stability Agent) ที่ใช้เพื่อปรับปรุงสภาพวัสดุจะเลือกใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือโพลีแอสฟัลต์ ตัวอย่างจะนำมาทดสอบเพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์และวัสดุมวลรวม แล้วนำมาออกแบบส่วนผสมเพื่อหาปริมาณสารปรับปรุงสภาพที่ใช้ผสม เพื่อให้ส่วนผสมมีคุณสมบัติเหมาะสมและมีเสถียรภาพที่สุด เมื่อออกแบบเรียบร้อยแล้วก็จะขุดหรือชั้นทางเก่าพร้อมกับบดวัสดุให้มีขนาดเล็กลง โดยให้มีขนาดใหญ่ไม่เกิน 1.5 นิ้ว หลังจากนั้นจะนำมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพ และวัสดุมวลรวมใหม่ตามปริมาณที่ออกแบบไว้ แล้วจึงนำกลับไปปูและบดอัดให้แน่น

ในงานการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นนั้น สามารถแบ่งวิธีการได้เป็น 2 ประเภทคือ งานผสมเย็นในที่ (Cold in-place recycling) และงานผสมเย็นภายในโรงงาน (Cold in-plant recycling) เนื่องจากงานผสมเย็นในที่ เป็นกระบวนการที่ทำแล้วเสร็จในพื้นที่สายทางจึงเป็นวิธีการที่รวดเร็วกว่า ประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาในการขนส่ง อย่างไรก็ตามงานผสมเย็นภายในโรงงาน เป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อมีจุดเสียหายได้ชั้นทางนั้น การแก้ไขจะต้องกระทำก่อน โดยการขุดชั้นทางด้านบนออกแล้วทำการซ่อมแซมจุดนั้น หากบางจุดไม่ได้รับการแก้ไข อาจจะทำให้ถนนใหม่เสียหายภายหลังจากการใช้งานได้ไม่นาน

การก่อสร้างสำหรับงานผสมเยนไนท์ จะต้องใช้เครื่องจักรพิเศษที่ออกแบบเพื่องานนี้ โดยเฉพาะ เครื่องจักรจะขุดหรือผิวทางและชั้นพื้นทางเดิมตามความลึกที่ได้รับการออกแบบไว้ (สูงสุด 30 ซม.) ตีจนแตกร่วนพร้อมกับฉีดสารปรับปรุงสภาพ และน้ำตามปริมาณที่ได้กำหนด ผสมกับวัสดุชั้นทางที่ขุดขึ้นมาจนผสมเข้ากันดี จากนั้นใช้เครื่องจักรปรับระดับผิวของชั้นทางให้เรียบ วัสดุที่ผสมและปูโดยเครื่องมือขุดดังกล่าวนี้ สามารถทำการบดอัดให้มีความหนาแน่นได้โดยใช้รถบดสันสะเทือนที่มีน้ำหนักไม่น้อยกว่า 12 ตัน บดอัดให้ได้ความหนาแน่นตามข้อกำหนด



รูปที่ 2.1 เครื่องจักรกลในงานผสมเยนไนท์  
ที่มา : Future-orientated technologies (2001)

ในการก่อสร้างสำหรับงานผสมเย็นภายในโรงงาน เครื่องจักรจะขูดหรือชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางเก่าตามระดับความลึกที่กำหนด แล้วป้อนวัสดุที่ขูดหรือผ่านทางสายพานลำเลียงไปยังรถบรรทุกเพื่อขนไปกองไว้ในโรงผสม วัสดุชั้นทางเก่าจะนำมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพในโรงผสม แล้วนำกลับมาเทลงที่หน้างานเพื่อก่อสร้างชั้นทางต่อไป



รูปที่ 2.2 เครื่องจักรกลในงานผสมเย็นภายในโรงงาน

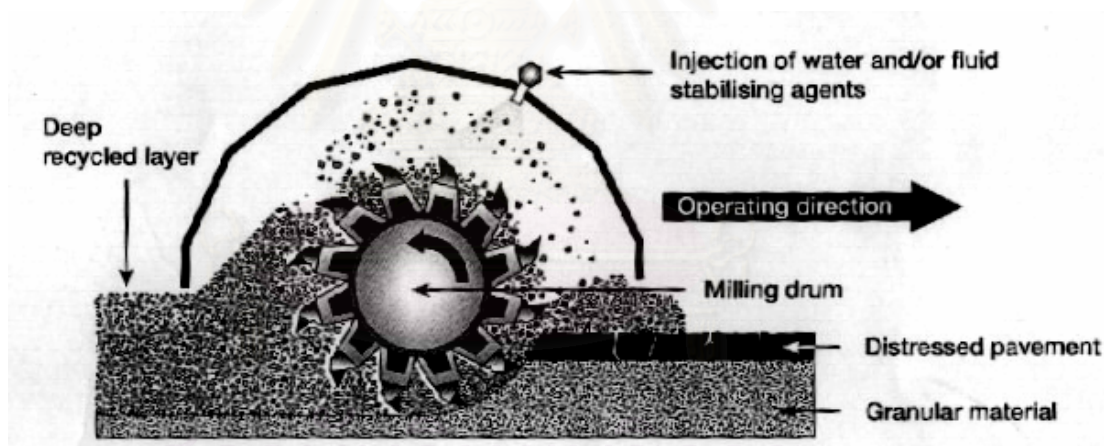
ที่มา : Future-orientated technologies (2001)

งานการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็นนี้ จะช่วยให้ความแข็งแรงของโครงสร้างถนนเพิ่มขึ้น โดยความหนาของถนนใหม่ จะเพิ่มเฉพาะความหนาของผิวทางใหม่เพียง 5-10 ซม. เท่านั้น ซึ่งนอกจากจะช่วยประหยัดวัสดุงานทางแล้ว ยังจะช่วยรักษารูปแบบทางเรขาคณิตของสายทางให้คงสภาพเดิมมากที่สุด อีกทั้งยังไม่มีผลกระทบต่ออาคารสองข้างทางให้เห็นอย่างชัดเจน

### กระบวนการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็น

เครื่องจักรกลสำหรับงานปรับปรุงสภาพโดยวิธีการผสมเย็น ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลาหลายปี จากการพัฒนาทำให้ได้เครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่ มีกำลังสูง และมีกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะในงานการปรับปรุงสภาพในที่ เครื่องจักรดังกล่าวสามารถทำงานได้แล้วเสร็จด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพียงครั้งเดียว ซึ่งสิ่งสำคัญของการทำงานของขบวนเครื่องจักรอยู่ที่ขนาดและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สามารถขูดหรือชั้นทางเก่าขึ้นมาผสมกับสารปรับปรุงสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เมื่อกระบวนการขูดหรือชั้นทางเก่าเกิดขึ้น น้ำจากท่อจะฉีดเข้าไปในห้องผสม (Mixing Chamber) เพื่อผสมกับวัสดุชั้นทางเก่า ซึ่งปริมาณน้ำจะได้รับการควบคุมให้ได้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมพอดีสำหรับการบดอัด จากนั้นสารปรับปรุงสภาพที่อยู่ในรูปของเหลว เช่น น้ำปูน (Cement Slurry) แอสฟัลต์อิมัลชัน หรือ โฟมแอสฟัลต์ จะได้รับการฉีดเข้าผสมกับวัสดุชั้นทางเก่า

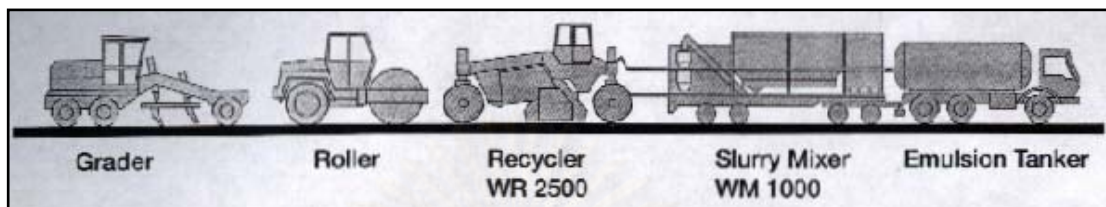


รูปที่ 2.3 กระบวนการผสมสารปรับปรุงสภาพเข้ากับวัสดุมวลรวม

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

สำหรับสารปรับปรุงสภาพที่อยู่ในรูปผง ได้แก่ ปูนขาว และ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จะโรยลงบนชั้นทางเก่าก่อนที่ขบวนเครื่องจักรจะเคลื่อนตัวผ่าน

ขบวนเครื่องจักรกลสำหรับงานปรับปรุงสภาพโดยวิธีการผสมเย็น จะมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของสารปรับปรุงสภาพที่ใช้ในงาน ขบวนเครื่องจักรกลที่แสดงในรูปที่ 2.4 ใช้ในงานที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นสารปรับปรุงสภาพ โดยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และน้ำจะผสมกันที่ห้องผสม (Slurry Mixer) ก่อนนำไปผสมกับวัสดุชั้นทางเดิมต่อไป



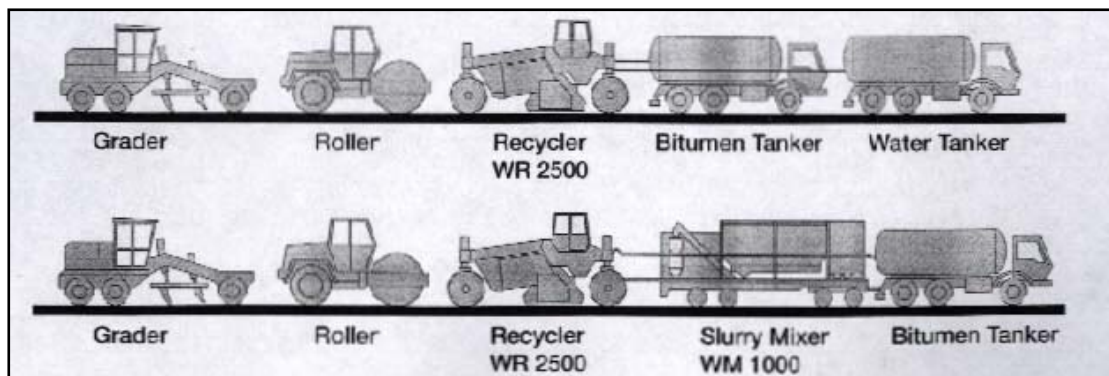
รูปที่ 2.4 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์  
ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

นอกจากนี้ในการปรับปรุงสภาพชั้นทางเก่ายังสามารถใช้แอสฟัลต์อิมัลชันผสมเข้ากับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ได้โดยการเพิ่มถังบรรจุแอสฟัลต์อิมัลชัน (Emulsion Tanker) ไว้ที่หัวขบวน แต่ถ้ามักการใช้ แอสฟัลต์อิมัลชันเพียงชนิดเดียวรูปขบวนจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน  
ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

ในรูปที่ 2.6 แสดงรูปขบวนการทำงานด้วยการใช้โฟมแอสฟัลต์อย่างเดียว และการใช้โฟมแอสฟัลต์ผสมกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในการปรับปรุงชั้นทางเก่า จากรูปจะเห็นว่า ในการใช้โฟมแอสฟัลต์รูปขบวนจะต้องมีรถบรรทุกแอสฟัลต์ร้อนและน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์



รูปที่ 2.6 ขบวนเครื่องจักรสำหรับงานการใช้โฟมแอสฟัลต์  
ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

### ข้อดีของการปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีผสมเย็น

1. ชั้นทางเก่าทั้งหมดจะนำมาใช้ในกระบวนการปรับปรุงสภาพ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่สำหรับทิ้งวัสดุเก่า อีกทั้งยังต้องการใช้วัสดุมวลรวมใหม่ในปริมาณน้อย ทำให้ลดค่าวัสดุและค่าขนส่ง
2. ลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่วัสดุ อีกทั้งช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม
3. ด้วยเครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพทำให้ได้ส่วนผสมที่มีคุณภาพ สามารถปูและบดอัดชั้นทางได้เป็นอย่างดีสม่ำเสมอและเรียบเนียน
4. ในกรณีงานผสมเย็นในที่ กระบวนการทำงานส่งจะผลรวบวงโครงสร้างชั้นทางน้อยที่สุดเนื่องจากเครื่องจักรสามารถทำงานได้แล้วเสร็จด้วยการเคลื่อนขบวนการทำงานผ่านชั้นทางที่ต้องการปรับปรุงสภาพเพียงครั้งเดียว
5. สามารถทำงานให้แล้วเสร็จได้อย่างรวดเร็ว จึงรบกวนต่อการจราจรในเวลาไม่มากนัก
6. ใช้พื้นที่ในการทำงานเพียง 1 ช่องการจราจร จึงลดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุกับยานพาหนะที่เคลื่อนตัวผ่าน รวมทั้งลดผลกระทบต่อกระแสการจราจร

### สารปรับปรุงสภาพในงานผสมเย็น

สารปรับปรุงสภาพ (Stability Agent) หลายชนิดที่ใช้ในงานปรับปรุงสภาพโดยวิธีการผสมเย็นนั้นใช้เพื่อจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือเป็นตัวเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานต่อการเสียหายเนื่องจากความชื้น (Moisture Resistance) ให้แก่ส่วนผสม การเลือกชนิดและ

ปริมาณสารปรับปรุงสภาพที่เหมาะสมเป็นส่วนที่สำคัญมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพการณ์ ความต้องการ การได้มาของวัสดุ ราคา และสภาพวัสดุรวมรวม สารปรับปรุงสภาพที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆคือ กลุ่มซีเมนต์ (Cementitious Stability Agent) และกลุ่มแอสฟัลต์ (Asphalt Stability Agent)

กลุ่มซีเมนต์ จะประกอบไปด้วยปูนขาว และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ สำหรับปูนขาวมักนำมาใช้กับดินที่มีขนาดเม็ดเล็กหรือดินที่มีสภาพพลาสติกสูง ได้แก่ ดินที่ประกอบด้วยเม็ดดินเหนียวในปริมาณสูง เนื่องจากปูนขาวจะทำปฏิกิริยาได้ดีกับเม็ดดินขนาดเล็ก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ดินจับเป็นก้อนโตขึ้นและเพิ่มกำลังรับน้ำหนักให้แก่ดิน ส่วนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์มีข้อดีที่ให้กำลังสูงและเร็วกว่าปูนขาว แต่ไม่เหมาะกับดินสภาพพลาสติกสูง อีกทั้งการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณที่มากไป จะทำให้วัสดุมีสภาพเปราะหรือขาดความยืดหยุ่นที่ดี ส่งผลให้ลดความต้านทานความล้าของชั้นทาง (Fatigue Resistance) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดรอยแตกกว้างขึ้น

การใช้งานปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ในปริมาณที่สูงเกินไปมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดรอยแตกกว้างขึ้นภายในชั้นทาง เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ คือ ประการแรกเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ ส่วนประการที่สองเป็นผลมาจากน้ำหนักกระทำซ้ำของการจราจรที่เคลื่อนผ่านบริเวณนั้น ด้วยเหตุนี้ในการควบคุมการเกิดรอยแตกกว้างในชั้นทางที่ใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ จึงต้องควบคุมปัจจัยต่อไปนี้

- ปริมาณปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ใช้ เนื่องจากปริมาณจะแปรผันโดยตรงกับแนวโน้มการแตกกว้าง โดยทั่วไปควรใช้อยู่ในช่วง 2-4 %
- ระดับการระเหยของความชื้น ในช่วงระหว่างการบ่มควรจะควบคุมการระเหยของความชื้นไม่ให้สูงเกินไป

สำหรับกลุ่มของแอสฟัลต์ซึ่งประกอบด้วย แอสฟัลต์อิมัลชันและโพนแอสฟัลต์ นั้นเป็นวัสดุที่เหมาะสมในหลายด้าน ทั้งการมีแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมรับได้ มีความยืดหยุ่นและช่วยลดการซึมผ่านของน้ำ ข้อดีของการใช้สารปรับปรุงสภาพในกลุ่มนี้คือจะทำให้ชั้นทางมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ แต่สำหรับการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน มีข้อเสียคือเกิดความชื้นสูงในส่วนผสม ทำให้เกิดปัญหาในการบดอัดและการพัฒนากำลังช้า ข้อดีและข้อเสียของสารปรับปรุงสภาพชนิดต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.1-2.3

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. สามารถหาใช้ได้ง่ายจากที่ต่างๆทั่วโลก</li> <li>2. มีราคาต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์</li> <li>3. สามารถใช้ได้ทั้งรูปผงและในรูปของเหลวที่อยู่ในรูปของน้ำปูน</li> <li>4. ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานรองรับ</li> <li>5. เพิ่มความต้านทานต่อการเสียหาย เนื่องจากความชื้นให้วัสดุ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการแตกร้าวเนื่องจาก การหดตัวได้ (Shrinkage Cracking) แต่สามารถลดการแตกร้าวได้เมื่อให้ปริมาณที่เหมาะสม</li> <li>2. ลดความต้านทานความล้าของวัสดุ เนื่องจากชั้นทางขาดความยืดหยุ่น</li> <li>3. ต้องการการบ่มที่เหมาะสม การเปิดใช้ผิวจราจรทันทีสามารถก่อให้เกิดความเสียหายได้</li> </ol>

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน

แอสฟัลต์อิมัลชัน	
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ให้ความยืดหยุ่นที่ดีแก่ชั้นทาง ทำให้ช่วยเพิ่มความต้านทานความล้า</li> <li>2. สะดวกในการปฏิบัติงานปรับปรุงสภาพ</li> <li>3. ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นจึงมีวิธีการทดสอบและเกณฑ์มาตรฐานรองรับ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. โรงงานผลิตต้องมีการควบคุมคุณภาพสูง อีกทั้งสารอิมัลซิไฟร์ที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันยังมีราคาที่สูง</li> <li>2. ถ้าวัสดุที่ได้จากชั้นทางเก่ามีปริมาณความชื้นสูงเมื่อผสมเข้ากับแอสฟัลต์อิมัลชันจะทำให้ได้ส่วนผสมที่อยู่ในสภาพอิมิตัวด้วยน้ำ</li> <li>3. การบ่มใช้เวลานานเนื่องจากกำลังของวัสดุจะพัฒนาขึ้นตามปริมาณความชื้นที่ระเหยออกไป</li> </ol>



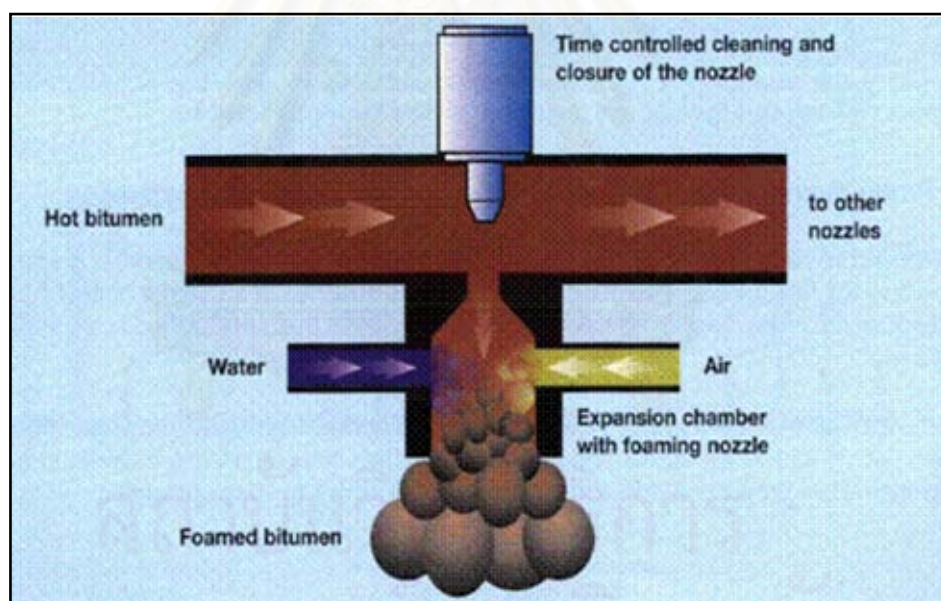
ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของการใช้โฟมแอสฟัลต์

โฟมแอสฟัลต์	
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ปฏิบัติงานปรับปรุงสภาพได้ง่ายและสะดวก</li> <li>2. ให้ความยืดหยุ่นที่ดีแก่ชั้นทาง เนื่องจากโฟมแอสฟัลต์จะไปเป็นตัวยึดเกาะที่ยืดหยุ่นระหว่างอนุภาคเล็กๆของวัสดุ จึงช่วยเพิ่มทั้งความต้านทานความล้าและความต้านทานยุบตัวถาวร</li> <li>3. โฟมแอสฟัลต์ผลิตจากแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดมาตรฐาน ทำให้มีราคาต่ำและหาได้ง่าย</li> <li>4. สามารถเปิดทางใช้งานได้ทันทีหลังจากการบดอัดเสร็จ</li> <li>5. สามารถนำไปใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท</li> <li>6. การเก็บส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ไว้ในที่รักษาความชื้น สามารถเก็บส่วนผสมไว้ได้นาน ก่อนการบดอัดโดยไม่เกิดการแยกตัว</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. จำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะสำหรับการผลิตโฟมแอสฟัลต์</li> <li>2. วัสดุที่อยู่ในสภาพอิมมัตด้วยน้ำและมีปริมาณฝุ่นละเอียดไม่เพียงพอ จะไม่เหมาะสมกับการใช้โฟมแอสฟัลต์</li> </ol>

## 2.1.2 โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt)

### กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์

โฟมแอสฟัลต์ได้รับการค้นคิดและพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Prof. Ladis Csanyi จากมหาวิทยาลัย Iowa State เมื่อปี ค.ศ. 1956 ภายหลังเทคโนโลยีนี้ได้รับพัฒนาต่อโดย Mobil Oil Organization ซึ่งได้สิทธิบัตรจาก Prof. Ladis Csanyi การผลิตโฟมแอสฟัลต์ ทำได้โดยการฉีดแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนอุณหภูมิประมาณ 160-200 °C และน้ำในปริมาณที่พอเหมาะเข้าไปผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 น้ำเมื่อกระทบเข้ากับความร้อนจะระเหยเป็นไออย่างรวดเร็ว ไอที่เกิดขึ้นจะแทรกอยู่ในเนื้อแอสฟัลต์ ผลที่ตามมาทำให้แอสฟัลต์มีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะฟองโฟม แต่ทำให้ความหนืดของแอสฟัลต์จะลดลง แอสฟัลต์ที่อยู่ในรูปโฟมจะมีความสามารถในการเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่มีสภาพชื้นและเย็นได้ดี



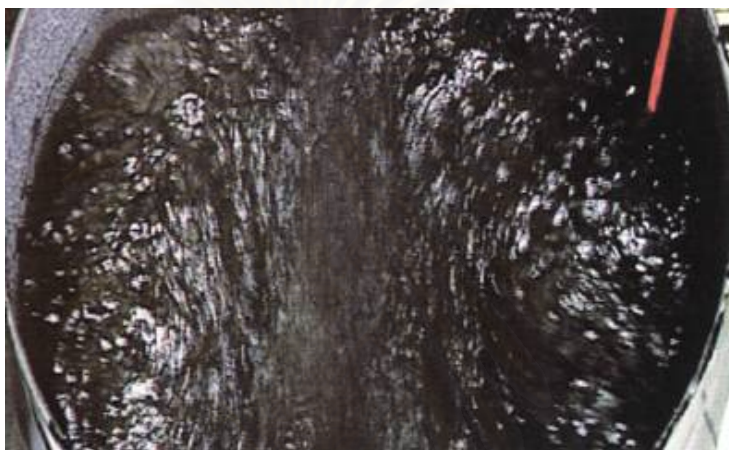
รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตโฟมแอสฟัลต์

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

### คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ได้รับการบ่งชี้ด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ค่า คือ ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อปริมาตรแอสฟัลต์เดิม

ค่าครึ่งชีวิต (Half-life) แสดงถึงเวลาเป็นวินาทีที่ปริมาตรสูงสุดของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นยุบตัวลงเหลือครึ่งหนึ่ง



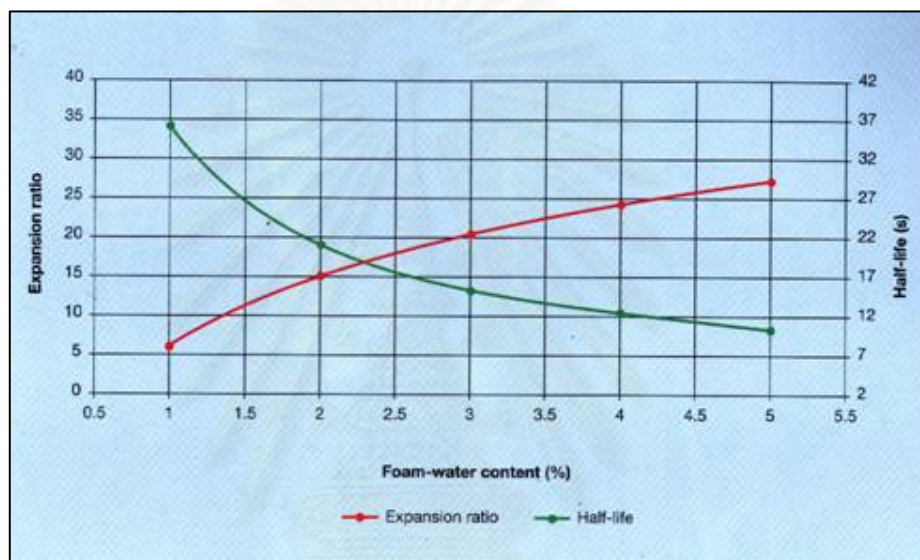
รูปที่ 2.8 รูปลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้น

เมื่อแอสฟัลต์ร้อนผสมกับน้ำที่ฉีดเข้าไป ปริมาตรของแอสฟัลต์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในรูปของโฟม หลังจากนั้นปริมาตรจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้นคุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ที่ดีจึงควรมีค่าการขยายตัวที่สูงพอ ที่จะสามารถกระจายตัวเข้าไปผสมในมวลรวมได้ดี และมีค่าครึ่งชีวิตที่นานพอที่จะคงสภาพโฟมให้สามารถผสมกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิห้องได้

### ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์

1. เกรดของแอสฟัลต์ แอสฟัลต์ที่มีเกรดอ่อนกว่า (Soft Asphalt) หรือ มีค่าเพนนิเทชั่นเกรดสูงกว่า จะให้คุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ที่ดีกว่า อย่างไรก็ตาม แอสฟัลต์ที่มีค่าเพนนิเทชั่นเกรดต่ำกว่า 100 จะเหมาะสมสำหรับการใช้งานในบริเวณพื้นที่ที่มีอากาศร้อน

2. อุณหภูมิของแอสฟัลต์ ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้คุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ดีขึ้น แต่จะเหมาะสมที่สุดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 160-200 °C
3. ปริมาณน้ำ ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ตรงกันข้ามกับค่าครึ่งชีวิตที่จะลดลง
4. ความดันที่ต่ำกว่า 3 MPa จะทำให้ค่าการขยายตัว และ ค่าครึ่งชีวิตลดลง
5. สารลดสภาพโฟม (Anti-foaming agent) เช่น สารประกอบซิลิโคน จะลดสภาพการเกิดโฟมของแอสฟัลต์ลง



รูปที่ 2.9 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่เกิดขึ้นตามปริมาณน้ำที่ใช้  
ที่มา : Future-orientated technologies (2001)

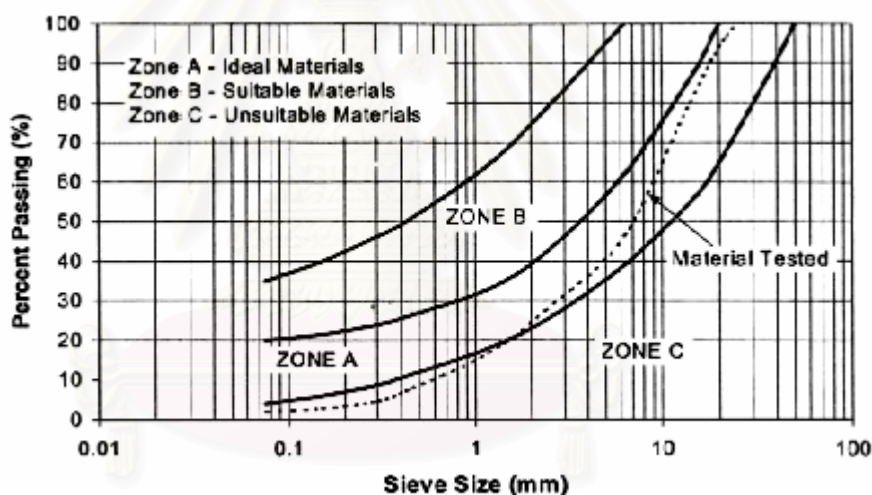
#### การกระจายตัวของแอสฟัลต์

การกระจายตัวของโฟมแอสฟัลต์ไม่เหมือนกับแอสฟัลต์ในงานผสมร้อน ส่วนผสมที่ได้จากโฟมแอสฟัลต์จะไม่มีสีดำ เนื่องจากแอสฟัลต์จะไม่เคลือบวัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่โดยตรง แต่ฟองโฟมที่มีเป็นจำนวนมาก จะเข้าไปยึดเกาะและผสมกับอนุภาคที่เป็นฝุ่นละเอียดของมวลรวม (อนุภาคที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือ มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) ส่วนผสมระหว่างแอสฟัลต์กับส่วนละเอียด จะทำหน้าที่เหมือนมอร์ต้ายึดเชื่อมระหว่างมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงทำให้ส่วนผสมทั้งหมดมีสีคล้ำจางๆ ในทางปฏิบัติจะมีการเติมซีเมนต์ ปูนขาว หรือวัสดุละเอียดเข้าไปผสมในวัสดุชั้นทางเก่าที่นำมาปรับปรุงสภาพเพื่อผสมกับแอสฟัลต์ ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมที่มีขนาดใหญ่

## วัสดุสำหรับส่วนผสมโม่แอสฟัลต์

### ● วัสดุมวลรวม

จากการวิจัยในประเทศออสเตรเลียแสดงให้เห็นว่าวัสดุมวลรวมทั้งหินปูน ททราย และ ตะกรันเหล็ก สามารถนำมาผสมกับโม่แอสฟัลต์ได้เป็นอย่างดี แต่ก็ต้องขึ้นกับขนาดคละของวัสดุ มวลรวมที่นำมาใช้ ผลการวิจัยที่ผ่านมาได้บ่งชี้ถึงขนาดคละที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 2.10 วัสดุ มวลรวมที่มีขนาดคละอยู่ในช่วงโซน A เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสภาพชั้นทางที่มีปริมาณ การจราจรสูง ส่วนในโซน B เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับปริมาณการจราจรต่ำแต่ถ้าใส่สารผสมเพิ่ม เช่น ปูนขาว หรือ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เพิ่มก็จะสามารถรองรับปริมาณการจราจรสูงได้ สำหรับวัสดุ ในโซน C จะต้องมีการเพิ่มมวลละเอียดเข้าไป เพื่อให้เพียงพอต่อการผสมโม่แอสฟัลต์ได้อย่างมี ประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.10 ขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวม

ที่มา : Nataatmadja (2002)

### ● แอสฟัลต์

แอสฟัลต์ที่มีเกรดอ่อน (Soft Grade) จะให้คุณสมบัติของโม่ที่ดีกว่า ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตโม่แอสฟัลต์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาโดยทั่วไปปริมาณน้ำจะอยู่ที่ 2.0-2.5% ของปริมาณ แอสฟัลต์ที่ใช้ โม่แอสฟัลต์ที่ดีที่สุดต้องเป็นโม่ที่มีทั้งค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตเหมาะสม ที่สุด สำหรับปริมาณโม่แอสฟัลต์ที่ใช้ในส่วนผสมพบว่าขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดคละของวัสดุ มวลรวมโดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์ของส่วนละเอียด โดยทั่วไปใช้ปริมาณโม่แอสฟัลต์อยู่ที่ 3-4% ดัง แสดงตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณโพลีเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุมวลรวมประเภทต่างๆ

ที่มา : Nataatmadja (2002)

Soil Type	Range of optimum binder content (%)	Additional requirements
Well graded clean gravel	2.0-2.5	
Well graded marginally clayey/silty gravel	2.0-4.5	
Poorly graded marginally clayey gravel	2.5-3.0	
Clayey gravel	4.0-6.0	Lime modification
Well graded clean sand	4.0-5.0	Filler
Well graded marginally silty sand	2.5-4.0	
Poorly graded marginally silty sand	3.0-4.5	
Poorly graded clean sand	2.5-5.0	Filler
Silty sand	2.5-4.5	
Silty clayey sand	4.0	Possibly lime
Clayey sand	3.0-4.0	Lime modification

- สารผสมเพิ่ม (Addition)

สารผสมเพิ่ม เช่น ปูนซีเมนต์ และหินฝุ่น (Crusher Dust) จะผสมกับวัสดุมวลรวม ถ้ามีปริมาณฝุ่นละเอียดที่ไม่เพียงพอเพื่อช่วยในการกระจายตัวของโพลีเมอร์เข้าไปในมวลรวมและเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวม ในประเทศออสเตรเลียมีการใช้ ปูนขาว 1-2% โดยน้ำหนัก เพื่อช่วยลดสภาพพลาสติก และความอ่อนไหวต่อความชื้น (Moisture Susceptibility) รวมถึงช่วยในการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์

#### การออกแบบส่วนผสมของโพลีเมอร์

ในการออกแบบส่วนผสมโพลีเมอร์ในห้องปฏิบัติการ ชุดเครื่องมือจำเป็นต้องจัดให้ใกล้เคียงการปฏิบัติงานในสนามที่สุด ชุดเครื่องมือสำหรับการผลิตโพลีเมอร์ประกอบไปด้วยภาชนะสำหรับให้ความร้อนแก่แอสฟัลต์ แอสฟัลต์ร้อนจะฉีดเข้าผสมกับน้ำที่ฉีดเข้าไปพร้อมกันที่ห้องผสมเพื่อผลิตโพลีเมอร์ ดังรูปที่ 2.11 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโพลีเมอร์จะ

ปรับโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่เข้าไปผสม ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะทำให้ส่วนผสมมีค่าการขยายตัวและค่าครีจชีวิตเหมาะสมมากที่สุด

โพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่ได้จะนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่มีขนาดคละที่เหมาะสมตามที่กล่าวมาแล้ว การผสมจะต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้น โดยอ้างอิงตามค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม : OMC (Optimum Moisture Content) ที่มีวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO T180 โดยทั่วไปของการออกแบบส่วนผสม จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ จะนำไปใช้ในการหาค่าปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสม (Optimum Binder Content) ต่อไป



รูปที่ 2.11 ชุดเครื่องมือสำหรับการผลิตโพลีเมอร์แอสฟัลต์

ส่วนผสมที่ได้จะนำไปบดอัดตามมาตรฐานมาร์แชลด้านละ 75 ครั้ง ตามด้วยการบ่มซึ่งกำหนดให้ใกล้เคียงกับสภาพสนามจริงที่สุด ก่อนที่จะนำไปทดสอบคุณสมบัติ (Test Evaluation) ต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้การทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) เพื่อเป็นการป้องกันการเสียหายเนื่องจากความชื้นในสนาม ดังนั้นในการออกแบบจะนำก้อนตัวอย่างไปแช่ไว้ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนจะนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ ส่วนผสมที่ให้ค่านี้สูงที่สุดจะเป็นส่วนผสมที่ใช้ปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด

### 2.1.3 การใช้งานโม่แอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพชั้นทางเก่า

ในปี ค.ศ. 1997 หน่วยงานด้านงานทางของรัฐควีนแลนด์ ประเทศออสเตรเลีย ได้ริเริ่มโครงการประเมินค่าการใช้โม่แอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพชั้นทางเก่า เพื่อให้สามารถทราบถึงประสิทธิภาพของการใช้งานจริง รวมถึงการประเมินค่าในระยะยาวสำหรับการใช้โม่แอสฟัลต์ ทางด้านหน่วยงานจึงก่อสร้างชั้นทางที่ปรับปรุงด้วยการใช้โม่แอสฟัลต์ ขั้นตอนในการทำงานในขั้นแรกเครื่องจักรจะนำมาใช้ในการขุดหรือผิวทาง พร้อมกับตีผิวทางให้แตกก่อนการผสมโม่แอสฟัลต์ โดยทั่วไปแล้วระดับความลึกของการขุดในขั้นนี้จะน้อยกว่าระดับความลึกจริงของชั้นทางที่ทำการปรับปรุงทั้งหมด เพื่อเป็นการขุดนำร่องก่อนการทำงาน หลังจากการขุดหรือผิวทางแล้ว จะปรับระดับหน้างานให้เรียบได้ระดับที่ถูกต้อง



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการขุดหรือผิวทางขั้นแรก  
ที่มา : Ramanujam (2000)



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการปรับระดับชั้นทาง  
ที่มา : Ramanujam (2000)



ผงปูนขาวจะนำมาโรยทับผิวทางที่ขูดหรือขึ้นมา เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและช่วยลดสภาพ  
 พลาสติคให้แก่วัสดุมวลรวม ตามด้วยการฉีดย้ำน้ำให้ความชื้นแก่ชั้นทาง



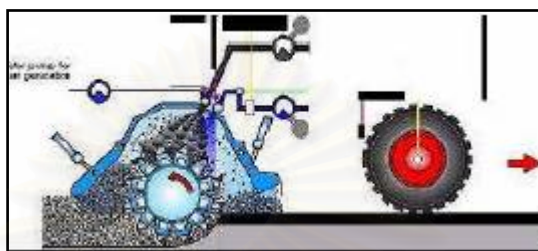
รูปที่ 2.14 การโรยผงปูนขาวลงบนหน้าผิวทางที่ถูกขูดหรือ  
 ที่มา : Ramanujam (2000)

ภายหลังจากการเตรียมสภาพทางเรียบร้อยแล้ว เครื่องจักรที่ออกแบบเป็นพิเศษเพื่อใช้ในการ  
 การผลิตโฟมแอสฟัลต์จะเริ่มทำงาน ขบวนเครื่องจักรจะประกอบด้วยรถที่มีอุปกรณ์ผลิตโฟม  
 แอสฟัลต์พร้อมห้องผสม รถบรรทุกถังแอสฟัลต์และน้ำ ชั้นทางที่ขบวนเครื่องจักรชนิดนี้เคลื่อนผ่าน  
 จะขูดหรือขึ้นมาอีกครั้ง โดยมีระดับความลึกมากกว่าครั้งแรก ซึ่งมีระดับลึกมากที่สุด 30 ซม.  
 ครอบคลุมถึงชั้นพื้นทางหรือไปจนถึงชั้นรองพื้นทาง



รูปที่ 2.15 เครื่องจักรที่ออกแบบเป็นพิเศษในงานโฟมแอสฟัลต์  
 ที่มา : Kendall et al (2000)

ชั้นทางที่ขุดหรือจะได้รับการบดให้แตกร่วนและผสมกับน้ำให้ได้ความชื้นที่พอเหมาะ จากนั้นโฟมแอสฟัลต์จะฉีดเข้ามาผสมผ่านทางท่อ ระหว่างการผสมโฟมแอสฟัลต์จะกระจายตัวเข้าไปผสมกับฝุ่นละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. เกิดเป็นรูปแบบคล้ายมอร์ต้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดเหนี่ยวมวลรวมขนาดใหญ่ไว้ด้วยกัน แทนที่โฟมแอสฟัลต์จะเข้าไปเคลือบวัสดุขนาดใหญ่โดยตรง



รูปที่ 2.16 การคลุกผสมระหว่างมวลรวมกับโฟมแอสฟัลต์ภายในห้องผสม  
ที่มา : Kendall et al (2000)

การบดอัดชั้นทางที่ได้รับการปรับสภาพแล้ว ควรจะทำภายในเวลา 2 ชม. ภายหลังจากการโรยผงปูนขาว ทั้งนี้เนื่องจากปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับความชื้น ทำให้ส่วนผสมมีสภาพแข็งยากต่อการบดอัด



รูปที่ 2.17 การบดอัดชั้นทางที่ได้รับการปรับสภาพแล้ว  
ที่มา : Kendall et al (2000)

ชั้นทางที่ได้รับการบดอัดแล้ว ควรจะได้รับการลาดยางทับผิวหน้า ภายในเวลา 2 อาทิตย์ เพื่อเป็นการป้องกันการซึมผ่านของน้ำที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อชั้นทางได้

#### 2.1.4 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโพนแอสฟัลต์

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของส่วนผสมโพนแอสฟัลต์เป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ เนื่องจากเป็นเครื่องบ่งบอกประสิทธิภาพในการใช้งานจริง ส่วนผสมโพนแอสฟัลต์จะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด เมื่อมีโพนแอสฟัลต์ผสมอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม โดยทราบได้จากขั้นตอนการออกแบบส่วนผสม อย่างไรก็ตามวัสดุรวมรวมในแต่ละประเภทจะมีความต้องการโพนแอสฟัลต์ในปริมาณที่ต่างกันไป โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณโพนแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามประเภทวัสดุรวมรวม

RAP/crushed stone (50/50blend)	1.5-3.0%
Crushed stone	2.5-4.0%
Natural gravel (PI<10, CBR>30)	3.0-4.5%

ความแข็งแรงของส่วนผสม (Strength) จะได้รับการบ่งชี้ด้วยค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ก่อนตัวอย่างที่บดอัดตามมาตรฐานมาร์แชลจะได้รับการทดสอบในอุณหภูมิ 25 °C โดยทั่วไปจะมีค่าในช่วงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ตามประเภทวัสดุรวมรวม

RAP/crushed stone (50/50blend)	350-800 kPa
Crushed stone	400-900 kPa
Natural gravel (PI<10, CBR>30)	250-500kPa

ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความอ่อนไหวในการตอบสนองต่อน้ำหนักกระทำซ้ำต่อวัสดุ โดยทั่วไปจะมีค่าในช่วงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าโมดูลัสคืนตัว ตามประเภทวัสดุรวมรวม

RAP/crushed stone (50/50blend)	2500-5000 MPa
Crushed stone	3000-6000 MPa
Natural gravel (PI<10, CBR>30)	2000-4000 MPa

## 2.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bowering (1970) ศึกษาพบว่าโฟมแอสฟัลต์ที่ผสมเข้ากับวัสดุมวลรวม สามารถช่วยลดอัตราการซึมผ่านของน้ำให้แก่ส่วนผสมได้ ผลการทดสอบบ่งชี้ว่า ส่วนผสมที่ประกอบด้วยปริมาณโฟมแอสฟัลต์ 4 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยลดอัตราการซึมผ่านของน้ำได้ถึง 10-100 เท่า เมื่อเทียบกับ การทดสอบกับวัสดุมวลรวมเพียงอย่างเดียว จากผลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า โฟมแอสฟัลต์มีส่วนช่วยลดความเสียหายอันเนื่องมาจากความชื้นให้แก่ส่วนผสมเมื่อเทียบการใช้มวลรวมอย่างเดียว ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความทนทานในการใช้งานต่อไป

Ruckel et. al. (1982) พบว่า ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์แม้จะนำไปปูเป็นชั้นผิวทาง (Surface Course) เป็นระยะทางกว่า 100 ไมล์ ในแถบอเมริกาเหนือ แต่โดยทั่วไปแล้วส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์จะนำไปใช้เป็นชั้นพื้นทางหรือชั้นรองพื้นทาง (Base or Subbase Course) ซึ่งภายหลังจะปูทับด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นผิวทางอีกชั้นหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงเวลาที่ทำกรวิจัย ประเทศต่างๆที่มีการพัฒนาการใช้งานโฟมแอสฟัลต์ ต่างอ้างอิงวิธีการออกแบบและวิธีการประเมินค่าส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป ทำให้เกิดปัญหาด้านการวิจัยและพัฒนาาร่วมกัน ดังแสดงตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 วิธีการออกแบบและวิธีการประเมินค่าส่วนผสมของประเทศต่างๆ

Mix design / evaluation procedures	Countries
Hveem	Australia, New Zealand, South Africa
Resilient modulus	Australia, South Africa
Marshall	Germany, United Kingdom, Japan
Split tensile	France
Vane shear	South Africa
CBR	Australia, New Zealand
Unconfined	France

Wijk และ Wood (1983) ได้ร่วมกันศึกษาในหัวข้อ “Use of Foamed Asphalt in Recycling of an Asphalt Pavement” โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อตรวจสอบและประเมินค่าวิธีการนำเอาโฟมแอสฟัลต์มาใช้ในการปรับปรุงสภาพชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ (Recycling) รวมถึงทดสอบคุณสมบัติของชั้นทางภายหลังจากการปรับปรุงสภาพแล้ว โครงการนี้ทำการทดลองปูชั้นทางที่ปรับปรุงใหม่เป็นระยะทาง 14 กิโลเมตร โดยใช้วิธีการปรับปรุงสภาพด้วยวิธีการผสมเย็น (Cold-mix Recycling) ชั้นทางเก่าจะขูดรื้อแล้วขนส่งไปยังโรงงานเพื่อนำไปผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregate) ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 ส่วน วัสดุมวลรวมที่ได้นำไปผสมกับโฟมแอสฟัลต์ในสัดส่วน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับมาตรฐานของวัสดุที่ใช้ และการก่อสร้าง กำหนดตามตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 มาตรฐานของวัสดุและการก่อสร้าง

Item	Specification
<b>Foamed asphalt</b>	
Asphalt	AC-5
Mixing temperature	330 F
Amount of water	2 % by weight of asphalt
Expansion ratio	10
Half-life	20 sec
Temperature during processing	>20 F
<b>Milled material</b>	
Max size	3 in.
Free moisture during mixing	2.5-3.5 %
<b>Additional aggregate</b>	
Grading	Meeting Section 903 of ISHC* standard specification
Coarse aggregate	Meeting requirements of class C aggregate
Free moisture during mixing	2.5-3.5 %
<b>Geometry of pavement</b>	
Minimum thickness of recycled base	5 in.
Construction	Construction section must be open to two-way traffic during non-work periods and be grade and compacted

\* ISHC = Indiana State Highway Commission

ในระหว่างการก่อสร้างส่วนผสมจะได้รับการเก็บเป็นตัวอย่าง เพื่อนำกลับไปบดอัดในห้องปฏิบัติการ และทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม เพื่อหาค่าโมดูลัสคืนตัว ค่าสัดส่วน บัวของ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม และค่าเสถียรภาพมาร์แชล โดยทำการทดสอบทั้งในสภาพแห้งและผ่านการแช่น้ำ ภายหลังจากการก่อสร้างชั้นทางจะขุดหรือขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบผลและประเมินค่าภายหลังการใช้งานอีกครั้ง

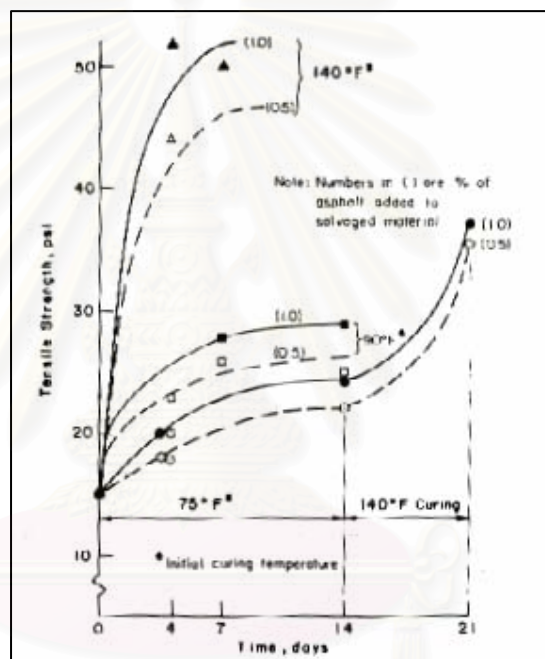
จากผลการทดสอบพบว่า ผลกระทบจากปริมาณความชื้นของส่วนผสมในระหว่างการบดอัดเป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบและการก่อสร้าง คุณสมบัติของชั้นทางที่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์โดยรวมเป็นที่น่าพอใจ ชั้นทางยังมีคุณภาพที่ดี ภายหลังจากใช้งานไปได้ 8 เดือน การศึกษาชี้ให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวน่าจะแพร่หลายในอนาคต

Ruckel, Acott และ Bowering (1983) กล่าวว่า ปริมาณความชื้นของวัสดุรวมรวม (Aggregate Moisture) เป็นข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับการใช้ในการออกแบบส่วนผสม เนื่องจากความชื้นมีส่วนช่วยในการบดอัดโดยจะไปทำลายการจับตัวเป็นก้อนของมวลรวมและทำให้โฟมแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวได้ทั่วถึงทั้งส่วนผสม ค่าปริมาณความชื้นของมวลรวมที่เหมาะสม (Optimum Aggregate Moisture) สามารถหาได้จากค่าปริมาณความชื้นของมวลรวมที่ทำให้ส่วนผสมมีค่าความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) ภายหลังจากบดอัดแล้ว เมื่อทราบค่าปริมาณความชื้นของมวลรวมที่เหมาะสมแล้วจะทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณโฟมแอสฟัลต์ในหลายๆค่า เพื่อหาปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมต่อไป

Roberts, Engelbrecht และ Kennedy (1984) ได้ร่วมกันศึกษาโดยมีจุดประสงค์เพื่อประเมินค่าความเป็นไปได้ของการใช้โฟมแอสฟัลต์ในงานปรับปรุงสภาพชั้นทางเก่าด้วยวิธีผสมเย็น (Cold Recycling) การวิจัยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) จากวิธีการบ่ม (Curing Method) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt Content) ในส่วนที่สองเปรียบเทียบส่วนผสมที่ใช้โฟมแอสฟัลต์กับส่วนผสมที่ใช้คัทแบคแอสฟัลต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน จากการผลทดสอบพบว่า

- คุณหมุมในการบ่มที่สูงขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสมมีค่าสูงขึ้น
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสมมีค่าลดลงมากกว่า 50 % ภายหลังจากการบ่มและทดสอบที่สภาพผ่านการแช่น้ำ (Wet Condition)

- ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นถึง 75 % หลังจากบ่มเป็นเวลา 4 วัน นอกจากนี้ยังพบว่าหลังจากเริ่มบ่ม ถ้าอุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 75 °F เป็น 140 °F ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มในอัตราที่น้อยกว่าส่วนผสมที่เริ่มบ่มที่อุณหภูมิ 140 °F ดังแสดงในรูปที่ 2.18
- ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสมโพลีเอสเตอร์ให้ค่าสูงกว่าส่วนผสมที่ใช้คัทแบค แอสฟัลต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน
- ส่วนผสมโพลีเอสเตอร์สามารถบดอัดได้ความหนาแน่นสูงกว่าส่วนผสมอื่นๆ



รูปที่ 2.18 อิทธิพลของการบ่มที่มีต่อความต้านทานต่อแรงดึงของส่วนผสม

**สมเกียรติ เตรียมแจ้งอรุณ (2527)** กล่าวว่า แม้ว่าการปรับปรุงสภาพโดยการผสมเย็น (Cold Recycling) จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงลง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่วัสดุรวมรวมในการผสม แต่ข้อเสียของวิธีการนี้ คือการกระจายขนาดของวัสดุรวมรวมไม่ทั่วถึงกัน ไม่สามารถผสมวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material) เหมือนเช่นการผสมร้อน แอสฟัลต์เก่าและใหม่ไม่สามารถละลายและไหลให้เข้ากันได้ดี

ดังนั้นการปรับปรุงสภาพโดยการผสมเย็นจึงไม่แข็งแรงเท่ากับการปรับปรุงสภาพโดยการผสมร้อน (Hot-Mix Recycling) ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมักใช้วัสดุที่ทำการปรับปรุงสภาพโดยการผสมเย็นกับถนนที่มีการจราจรต่ำ

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงอย่างมากเมื่อใช้วิธีการผสมเย็นได้แก่ การเลือกใช้ชนิดและปริมาณของสารปรับปรุงสภาพที่ถูกต้อง ความเข้าใจในลักษณะโครงสร้างของชั้นทางการจราจรเดิม ความต้องการแก้ไขโครงสร้างชั้นทางและการเพิ่มวัสดุผสมรวมใหม่ ควรมีการทดสอบคุณสมบัติที่เหมาะสม การใช้ขบวนการหรือโรงงานในการผสมที่ถูกต้อง

Akeroyd (1989) ทำการศึกษาพบว่า ขนาดคละของวัสดุผสมรวมที่เหมาะสมสำหรับโฟมแอสฟัลต์ ควรจะมีปริมาณส่วนละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) อย่างน้อย 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ต้องไม่มากเกินไปกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ วัสดุผสมรวมที่มีส่วนประกอบของดินเหนียว (Clay) หรือมีความชื้นอยู่มากเกินไป สามารถนำปูนขาวมาผสมเพื่อลดอิทธิพลจากสิ่งดังกล่าวได้ ในทางเศรษฐศาสตร์พบว่า การใช้โฟมแอสฟัลต์ในงานบำรุงทางสามารถช่วยลดงบประมาณลง 25 เปอร์เซ็นต์ และลดปริมาณการใช้พลังงานลงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการบำรุงทางด้วยวิธีผสมร้อน (Hot Recycling)

Bergeron (1992) จากการทดสอบภาคสนามพบว่า ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ต้องการเวลาในการบ่มน้อย เมื่อเทียบกับการใช้แอสฟัลต์อิมัลชัน จึงส่งผลกระทบต่ออาการจราจรไม่มากนัก อีกทั้งพบว่าอัตราการบ่ม (Curing Rate) หรืออัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ จะได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศไม่มากนัก ในขณะที่สภาพอากาศที่ชื้นและเย็นในช่วงการก่อสร้าง จะส่งผลอย่างชัดเจนต่ออัตราการพัฒนากำลังส่วนผสมแอสฟัลต์อิมัลชัน

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

สำหรับการเตรียมตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้เน้นกระทำโดยใช้เครื่องบดอัดแบบ Gyrotory Compactor ซึ่งอ้างอิงจำนวนรอบและแรงกดในการบดอัด ตามมาตรฐาน Standards Australia (1993a) ดังตารางที่ 2.10 ภายหลังจากการบดอัด ตัวอย่างจะนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา



72 ชั่วโมง ซึ่งสภาพการบ่มดังกล่าว ได้รับการแนะนำว่าเป็นการจำลองถึงสภาพจริงในสนาม ภายหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จเป็นเวลาประมาณ 12 เดือน

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานการบดอัดด้วยเครื่อง Gyrotory Compactor

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

Maccarrone, Holleran และ Ky (1995) ศึกษาส่วนผสมเย็น (Cold Mix) ทั้งที่ได้จากการผสมโพลีแอสฟัลต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน และให้คำแนะนำว่า การเคลือบมวลรวมของแอสฟัลต์เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในงานผสมเย็น เพื่อให้แน่ใจว่าส่วนผสมนั้นมีความต้านทานต่อความชื้นที่เพียงพอ ในกรณีของชั้นผิวทาง วัสดุมวลรวมจำเป็นจะต้องถูกเคลือบในทุกส่วนไม่ว่าขนาดใหญ่หรือเล็ก ขณะที่ในกรณีของชั้นพื้นทาง การเคลือบวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่ จะไม่ใช่จุดที่ต้องเน้นมากนัก เพียงแต่ต้องมั่นใจว่า ความต้านทานการซึมผ่านของน้ำในชั้นผิวทางและระบบระบายน้ำมีคุณภาพเพียงพอ

การกระจายตัวเข้าไปเคลือบวัสดุมวลรวมของแอสฟัลต์นั้น ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของมวลรวม ดังนั้น แอสฟัลต์มีแนวโน้มที่จะกระจายตัวเข้าไปเคลือบวัสดุที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่า เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่า นอกจากนี้ความสามารถในการกระจายตัวของแอสฟัลต์ยังขึ้นอยู่กับความหนืดด้วย โดยพบว่า แอสฟัลต์ที่มีความหนืดต่ำจะมีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีกว่า

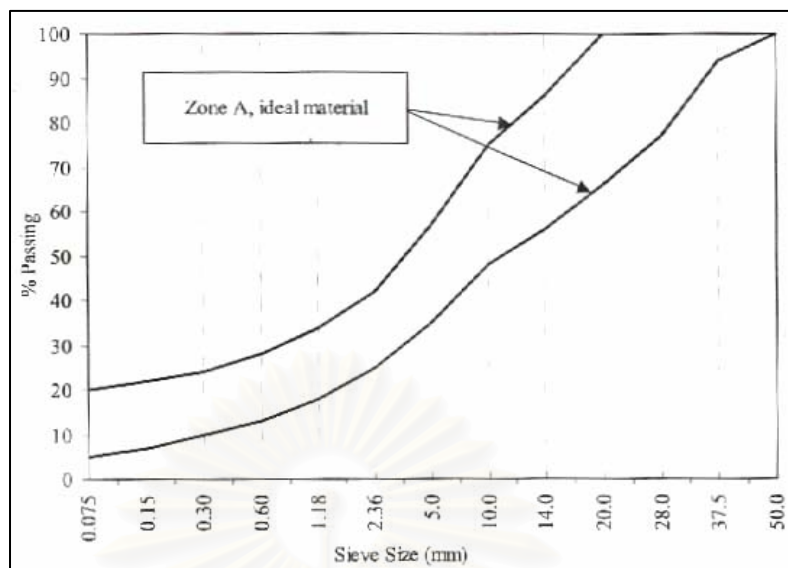
Ramanujam (1997) ได้ศึกษาคุณสมบัติส่วนผสมของโพลีแอสฟัลต์ในภาคสนาม พบว่าค่าการโก่งตัว (Deflection) ของชั้นทางโพลีแอสฟัลต์ ภายหลังจากบ่มแล้วเสร็จเป็นเวลา 1 วัน มีค่าน้อยกว่า 0.75 มม. บ่งชี้ให้เห็นว่า ส่วนผสมโพลีแอสฟัลต์สามารถพัฒนากำลัง และมีประสิทธิภาพในการรองรับการจราจรได้อย่างรวดเร็ว โดยที่ผิวหน้าของชั้นทางโพลีแอสฟัลต์ก็ไม่ปรากฏร่องรอยของความเสียหาย ถึงแม้จะปูชั้นผิวทางทับหลังจากนั้นเป็นเวลาถึง 2 สัปดาห์

K M Muthen (1999) สรุปข้อดีของการใช้โฟมแอสฟัลต์เพื่อปรับปรุงสภาพวัสดุงานทาง  
ไว้ดังนี้

1. ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงเฉือนให้ส่วนผสม ช่วยให้ความแข็งแรงของส่วนผสมมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ แต่ส่วนผสมจะมีความยืดหยุ่นและความต้านทานต่อการล้าที่ดีกว่า
2. โฟมแอสฟัลต์สามารถนำไปปรับปรุงสภาพวัสดุรวมกันได้หลายประเภท
3. ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ใช้แอสฟัลต์จำนวนน้อยเป็นส่วนผสม ดังนั้นจึงสามารถลดค่าแอสฟัลต์และการขนส่ง
4. ภายหลังจากการบดอัดในการก่อสร้าง โดยมากจะสามารถเปิดการจราจรได้ทันที
5. ประหยัดเชื้อเพลิงเนื่องจากไม่ต้องให้ความร้อนแก่วัสดุรวมในระหว่างการผสม
6. ลดปัญหาด้านมลพิษจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
7. กระบวนการก่อสร้างสามารถกระทำในสภาพเย็นจัดหรือมีฝนตกเล็กน้อยได้
8. ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์สามารถเก็บไว้ได้นานก่อนการบดอัดโดยปราศจากการแยกตัวของแอสฟัลต์

Khweir, Fordyce และ McCabe (2002) กล่าวว่า ในกระบวนการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ต้องทำให้ส่วนผสมมีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการนำโฟมแอสฟัลต์ในการปรับปรุงสภาพของชั้นทางเก่านั้น ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงอย่างยิ่งเพราะจะส่งผลต่อคุณสมบัติของส่วนผสม คือ ขนาดคละของมวลรวม (Aggregate Grading) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และปริมาณโฟมแอสฟัลต์ในส่วนผสม

สำหรับขนาดคละของมวลรวมจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากจะเป็นตัวกำหนดความพรุนของส่วนผสม ซึ่งจะส่งผลต่อความทนทาน (Durability) ของส่วนผสมด้วย นอกจากนี้มวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม. จะต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะทำให้โฟมแอสฟัลต์สามารถยึดเกาะส่วนผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นขนาดคละที่เหมาะสมจึงได้รับการแนะนำให้อยู่ในช่วงที่แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวม

ปริมาณความชื้นในส่วนผสม จะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการบดอัดของส่วนผสม ปริมาณความชื้นที่มากเกินไปจะขัดขวางการยึดเกาะกันระหว่างมวลรวมทำให้การบดอัดส่วนผสมได้ค่าความหนาแน่นที่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องพยายามให้ส่วนผสมมีระดับความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content) ซึ่งจะทำให้สามารถบดอัดส่วนผสมให้เข้าใกล้ความหนาแน่นสูงสุด (Maximum Dry Density) ได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสมในส่วนผสม ยังส่งผลถึงความแข็งแรงและความทนทานของส่วนผสม (Strength and Durability) ด้วย

Koender et al. (2002) กล่าวว่า โพลีเมอร์แอสฟัลต์นอกจากจะนำไปใช้ในการปรับปรุงสภาพชั้นทางเก่าในงานผสมเย็น (Cold Recycling) แล้ว ยังนำไปใช้ในกระบวนการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 80-120°C) โดยใช้วิธีการผสมแอสฟัลต์ที่มีเกรดอ่อน (Soft Grade) กับ แอสฟัลต์ที่มีเกรดแข็ง (Hard Grade) รวมเข้ากับวัสดุมวลรวมใน 2 ขั้นตอน

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการผสมแอสฟัลต์ที่มีเกรดอ่อนกับวัสดุมวลรวมที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C จากนั้นจึงนำแอสฟัลต์เกรดแข็งที่อยู่ในรูปของโพลีเมอร์แอสฟัลต์เข้าไปผสม จากการทดสอบส่วนผสมที่ได้ในห้องปฏิบัติการ ทั้งความสามารถในการบดอัด (Workability) ที่วัดจากเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ค่าเสถียรภาพของส่วนผสม (Mixture Stability) ที่ได้จากการทดสอบ Dynamic Creep Test และความต้านทานต่อการสึกกร่อน (Abrasion Resistance) พบว่า

ส่วนผสมที่ได้มีคุณสมบัติและคุณภาพที่ใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ได้จากกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูง (Hot mix) อีกทั้งยังมีข้อดีคือ สามารถช่วยประหยัดเชื้อเพลิง และลดปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการผลิต

Chui-Te Chiu, Ming-yung Huang และ Li-Cheng Lu (2002) ร่วมกันศึกษาคุณสมบัติของส่วนผสมโคมแอสฟัลต์เพื่อประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับวัสดุงานทางสำหรับประเทศไทย โดยนำโคมแอสฟัลต์เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่เตรียมขึ้นใน 2 สัดส่วน คือ สัดส่วนที่ 1 ใช้วัสดุชั้นทางเก่าผสมกับวัสดุมวลรวมใหม่ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 สัดส่วนที่ 2 ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของการเติมวัสดุผสมเพิ่มต่อส่วนผสมโดยการเพิ่มส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ 1.5% กับถ้ำลอย 1.5% และ การเพิ่มส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ 1.5% กับตะกรันเหล็ก 1.5% ลงในส่วนผสม ผลการศึกษาพบว่า

สัดส่วนของมวลรวมที่มีส่วนประกอบของวัสดุเก่าต้องการปริมาณโคมแอสฟัลต์ที่น้อยกว่า เนื่องจากความสามารถในการดูดซึมของวัสดุเก่า นอกจากนี้ส่วนผสมที่ได้ยังมีอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพผ่านน้ำต่อสภาพแห้ง (Retained Strength) สูงกว่าส่วนผสมที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมด แสดงให้เห็นข้อดีของการนำวัสดุเก่ามาเป็นส่วนผสมสำหรับผลของสารผสมเพิ่มที่พบว่าการใช้ตะกรันเหล็กจะทำให้ส่วนผสมโคมแอสฟัลต์มีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาสมรรถนะในการใช้งานของส่วนผสมโดยการทดสอบหาความต้านทานต่อการล้า พบว่าส่วนผสมที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมดมีความต้านทานสูงว่ามาก ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณภาพของวัสดุเป็นสำคัญ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการศึกษา

การดำเนินการศึกษาประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การทดสอบหาคุณลักษณะที่เหมาะสมของโพลีเมอร์แอสฟัลต์เพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม การเตรียมวัสดุผสม การออกแบบส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์ และการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60-70 ซึ่งเป็นแอสฟัลต์ที่มีใช้ทั่วไปในประเทศไทย นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโพลีเมอร์แอสฟัลต์ โดยคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ จะได้รับการทดสอบเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทางตามมาตรฐานเลขที่ 851 การตรวจสอบคุณสมบัติมาตรฐานสรุปไว้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 แยกเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ยังไม่ผ่านการอบและภายหลังการอบ

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ยังไม่ผ่านการอบ

คุณสมบัติ	อ้างอิงวิธีการทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	AASHTO T228
ค่าเพนิเทรชัน (Penetration)	ASTM D5
จุดวาบไฟ (Flash Point)	ASTM D92
ความยืดดึง (Ductility)	ASTM D113
การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (Solubility)	ASTM D2042
จุดอ่อนตัว (Softening Point)	ASTM D36

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบ

คุณสมบัติ	อ้างอิงวิธีการทดสอบ
น้ำหนักที่สูญเสียไปจากการอบ	ASTM D1754
ค่าเพนิเทรชัน (Penetration)	ASTM D1754 และ ASTM D5
ความยืดดึง (Ductility)	ASTM D1754 และ ASTM D113

### 3.2 การทดสอบหาคุณลักษณะของโพลีแอสฟัลต์ที่เหมาะสม เพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม

เนื่องจากคุณลักษณะของโพลีแอสฟัลต์ได้รับการบ่งชี้ด้วย ค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรโพลีแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นสูงสุดต่อปริมาตรแอสฟัลต์เดิม และ ค่าครึ่งชีวิต (Half-life) เป็นค่าที่แสดงถึงเวลาเป็นวินาทีที่ปริมาตรสูงสุดของโพลีแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นยุบตัวลงเหลือปริมาตรครึ่งหนึ่ง การที่จะได้โพลีแอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดขึ้นอยู่กับสองค่านี้โดยมีอุณหภูมิของแอสฟัลต์และปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญ

ดังนั้นจุดประสงค์ของขั้นตอนนี้ คือ การทดสอบเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไปในแอสฟัลต์ร้อนเพื่อทำให้เกิดโพลีแอสฟัลต์ที่มีค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสมที่สุด สำหรับวิธีการทดสอบจะอ้างอิงตามคู่มือการทดสอบ Wirtgen Cold Recycling Manual ปี ค.ศ.2001 การผลิตโพลีแอสฟัลต์จะผลิตในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือซึ่งตั้งอยู่ที่สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการผลิตโพลีแอสฟัลต์

ขั้นตอนการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 1-5 % สำหรับอุณหภูมิของแอสฟัลต์ในการทดสอบจะควบคุมอยู่ในช่วง 160-180 °C ค่าการขยายตัว และค่าครึ่งชีวิตจะวัดที่อุณหภูมิและปริมาณน้ำหนึ่งๆ ด้วยไม้วัดการขยายตัว (Dip-Ruler) และถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 ซม. ที่ถูกออกแบบมาตรฐานสำหรับการใช้งานร่วมกัน ดังรูปที่ 3.1 ไม้วัดการขยายตัวจะจุ่มลงในถังที่รองรับโฟมแอสฟัลต์จากเครื่อง โดยจะทราบค่าการขยายตัวได้จากระดับรอยแอสฟัลต์ที่ไม้วัดโดยในแต่ละซี่ของไม้วัดจะแทนค่าการขยายตัวเท่ากับ 6 เท่า สำหรับค่าครึ่งชีวิตวัดจากเวลาที่ปริมาตรโฟมสูงสุดยุบตัวลงเหลือครึ่งหนึ่งโดยการสังเกตจากระดับไม้วัดการขยายตัว เมื่อทราบค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตในแต่ละอุณหภูมิและปริมาณน้ำแล้ว จะนำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 3.2 มาตรฐานวัดอุณหภูมิแอสฟัลต์และมาตรฐานวัดปริมาณน้ำที่ติดตั้งในเครื่อง

### 3.3 การเตรียมวัสดุมวลรวม

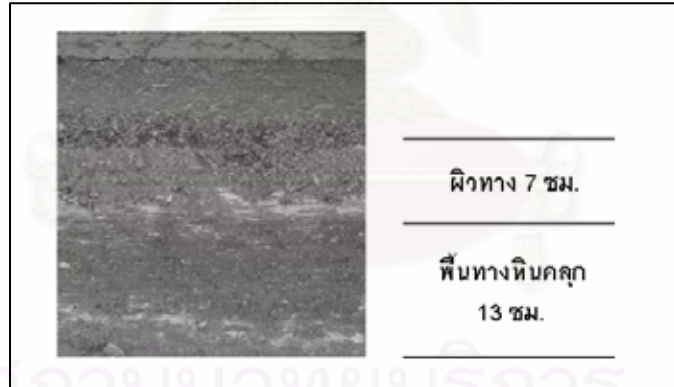
ในการศึกษาครั้งนี้ จะนำวัสดุมวลรวมทั้งที่ขุดหรือมาจากชั้นทางเก่า (Reclaimed Asphalt Pavement: RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่ (Crushed Stone) มาทำการผสมกันใน 3 สัดส่วน คือ

- ส่วนผสม 1 วัสดุชั้นทางเก่า : วัสดุมวลรวมใหม่ 80 : 20 .....(80%RAP)
- ส่วนผสม 2 วัสดุชั้นทางเก่า : วัสดุมวลรวมใหม่ 50 : 50 .....(50%RAP)
- ส่วนผสม 3 วัสดุชั้นทางเก่า : วัสดุมวลรวมใหม่ 0 : 100 .....(0%RAP)

วัสดุหินคลุกปนผิวทางเก่าที่ซูดรี้อจากทางหลวงหมายเลข 11 สาย พิษณุโลก-อุตรดิตถ์ และวัสดุมวลรวมใหม่ จะนำมาผสมกันในสัดส่วนที่กำหนด พร้อมทั้งปรับขนาดคละของมวลรวมให้เหมาะสม ก่อนที่วัสดุมวลรวมทั้ง 3 ส่วนผสม จะนำไปออกแบบหาปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสม ส่วนผสมที่ทราบปริมาณการใช้โฟมแอสฟัลต์แล้ว จะนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของส่วนผสมต่อไป



รูปที่ 3.3 การซูดรี้อชั้นทางเก่า



รูปที่ 3.4 ระดับชั้นของชั้นทางที่ซูดรี้อ

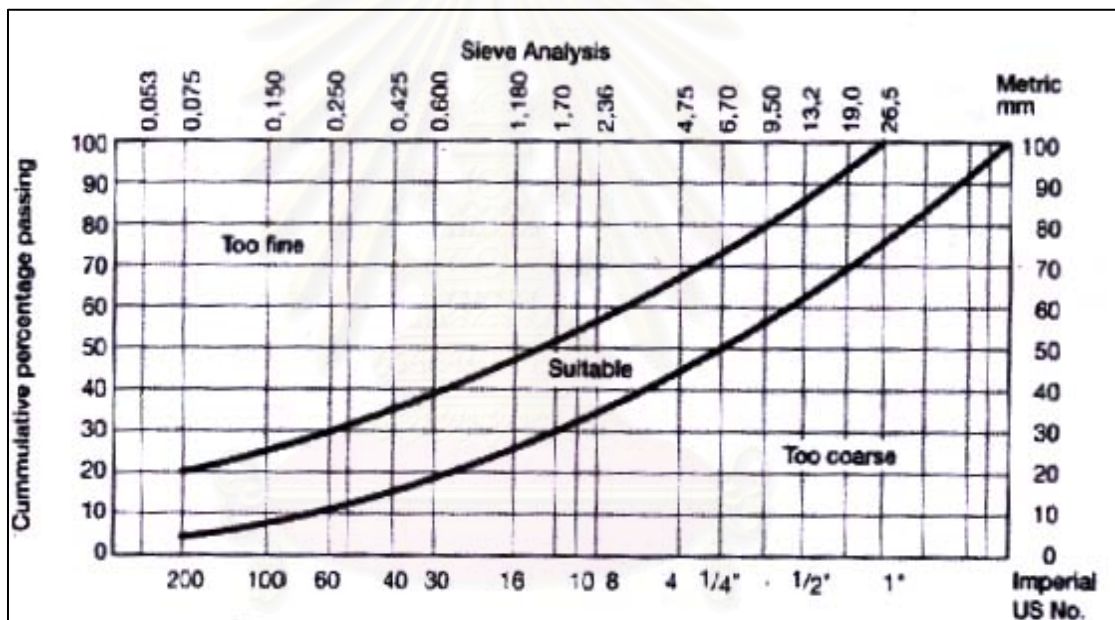
### 3.3.1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

นอกจากจะผสมวัสดุมวลรวมทั้งเก่าและใหม่ตามสัดส่วนที่กำหนดไว้แล้ว พร้อมกันนั้น ส่วนผสมของวัสดุมวลรวมทั้ง 3 สัดส่วน ยังต้องได้รับการปรับขนาดคละให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม รายงานวิจัยที่ผ่านมาได้แนะนำช่วงขนาดคละที่เหมาะสมสำหรับวัสดุมวลรวมที่ได้รับการปรับปรุงสภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ ดังรูปที่ 3.5



ขนาดคละของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์จะต้องมีปริมาณฝุ่นละเอียด (มวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) อยู่ในช่วงระหว่าง 5–20% ทั้งนี้เนื่องจากตัวโฟมแอสฟัลต์จะกระจายตัวเข้าไปผสมกับฝุ่นละเอียด เกิดเป็นรูปแบบของมอร์ต้าซึ่งส่วนผสมระหว่างโฟมแอสฟัลต์กับฝุ่นละเอียดนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวยึดวัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ไว้ด้วยกัน แทนการที่ตัวโฟมแอสฟัลต์จะเข้าไปเคลือบกับวัสดุโดยตรง

ดังนั้นปริมาณฝุ่นละเอียดที่พอเหมาะจึงเป็นตัวช่วยให้โฟมแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวเข้าเป็นตัวเชื่อมยึดติดระหว่างวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่ได้ดี ส่งผลถึงความแข็งแรงโดยรวมของส่วนผสมด้วย



รูปที่ 3.5 ขนาดคละที่เหมาะสมของวัสดุมวลรวมสำหรับโฟมแอสฟัลต์

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

วัสดุมวลรวมที่มีปริมาณฝุ่นละเอียดไม่เพียงพอ สามารถที่จะใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ หรือ ปูนขาว เพิ่มลงไปในส่วนผสม สำหรับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ไม่ควรใส่เกิน 2 % เนื่องจากจะทำให้ส่วนผสมมีความเปราะหรือลดความยืดหยุ่นลง ส่งผลถึงความต้านทานต่อความล้าของส่วนผสม (Fatigue Resistance)

### 3.3.2 ปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวม

ปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวมในระหว่างการผสมโฟมแอสฟัลต์และระหว่างการบดอัด เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ ความชื้นที่เหมาะสมจะช่วยให้การกระจายตัวของโฟมแอสฟัลต์เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมได้ดี และช่วยให้บดอัดได้ความหนาแน่นสูงขึ้น ดังนั้นวัสดุมวลรวมที่ได้จากการปรับขนาดคละให้เป็นที่กำหนดแล้ว จะนำมาทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) โดยวิธีการอ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO T180 และ มาตรฐานกรมทางหลวง ทม.-ท.108/2517



รูปที่ 3.6 การทดสอบหาค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม

### 3.4 การออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

โฟมแอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมตามผลการทดสอบที่ได้ และวัสดุมวลรวมที่มีขนาดคละตามที่เหมาะสมทั้ง 3 ส่วนผสม จะได้รับการนำมาออกแบบส่วนผสม โดยมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบหาปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละส่วนผสม วิธีการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์อ้างอิงตามคู่มือการทดสอบ Wirtgen Cold Recycling Manual ปี ค.ศ.2001 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำวัสดุมวลรวมที่ได้จากการผสมวัสดุชั้นทางเก่ากับวัสดุมวลรวมใหม่ซึ่งมีขนาดคละที่เหมาะสมแล้ว มาคลุกผสมน้ำโดยอ้างอิงจากค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสม(OMC) ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันอย่างทั่วถึง



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการผสมน้ำเข้ากับวัสดุมวลรวม

2. เมื่อวัสดุมวลรวมมีความชื้นที่พอเหมาะแล้ว โฟมแอสฟัลต์ที่ผลิตจากเครื่องจะฉีดผสมในทันที การคลุกผสมจะกระทำโดยใช้เครื่องผสม ดังรูปที่ 3.8 ส่วนผสมที่ได้จะนำไปบดอัดตามมาตรฐานมาร์แชล ด้านละ 75 ครั้ง
3. ก้อนตัวอย่างที่ได้รับการบดอัดแล้วจะเก็บไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนจะถอดจากแบบ จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งเทียบได้กับการบ่มชั้นทางในสนามเป็นเวลา 6 เดือน (Technical Guideline,2002) ดังรูปที่ 3.9 ภายหลังจากการบ่ม จะทำการวัดน้ำหนัก ความสูง เส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 3.8 ชุดเครื่องมือสำหรับการผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์กับวัสดุผสมรวม



รูปที่ 3.9 การบ่มก้อนตัวอย่างในตู้อบ



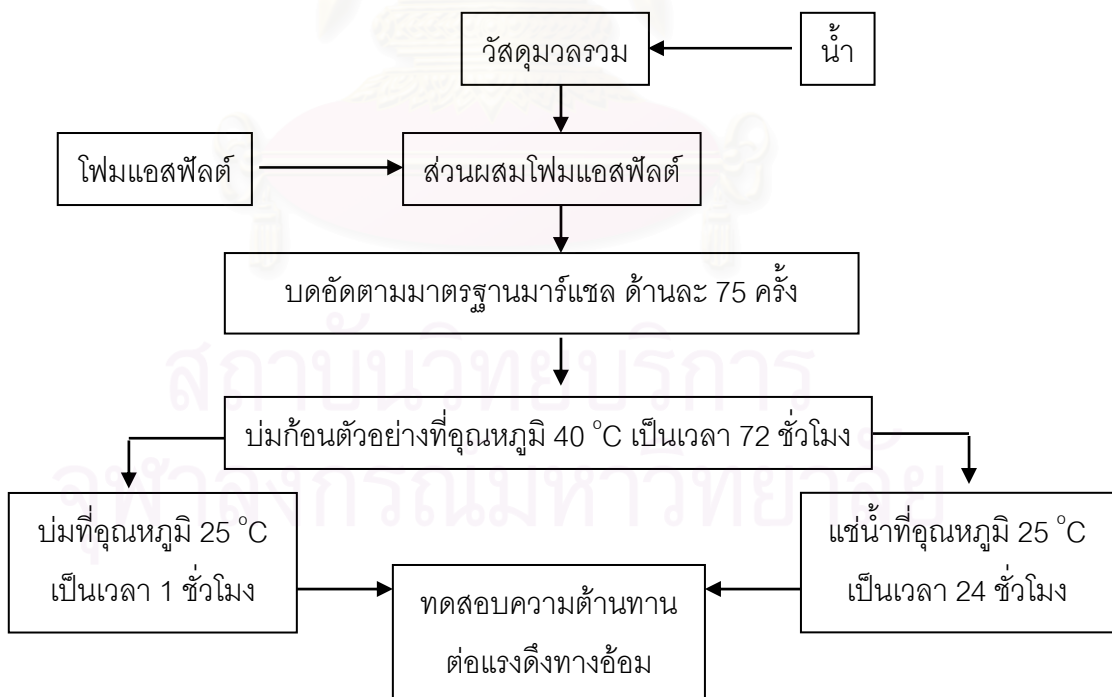
รูปที่ 3.10 การวัดขนาดของก้อนตัวอย่าง

4. แบ่งก้อนตัวอย่างเป็น 2 กลุ่ม เพื่อนำไปทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS) ในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ (Soaked ITS) และสภาพไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked ITS) สำหรับการทดสอบในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำจะนำตัวอย่างแช่น้ำไว้ที่อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ
5. ข้อมูลค่าความหนาแน่นแห้ง ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมทั้งในสภาพผ่านและไม่ผ่านการแช่น้ำ ตลอดจนอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำต่อสภาพแห้งของก้อนตัวอย่าง (Retained ITS) ที่มีปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ต่างๆกัน จะได้รับการนำไปวิเคราะห์ผล เพื่อหาค่าปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานต่อแรงดึงในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำเป็นหลักสำคัญ



รูปที่ 3.11 การทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ

สำหรับแต่ละเปอร์เซ็นต์ของปริมาณโฟมแอสฟัลต์จะทำการเตรียมก้อนตัวอย่างทั้งหมด 6 ก้อน โดยแบ่งสำหรับการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมทั้งในสภาพที่ผ่านและไม่ผ่านการแช่น้ำชุดละ 3 ก้อน เนื่องจากในการออกแบบส่วนผสมมีการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของปริมาณโฟมแอสฟัลต์ 5 ค่า ดังนั้นจะใช้ก้อนตัวอย่างทั้งหมด 30 ก้อนสำหรับการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ในแต่ละส่วนผสม ขั้นตอนการออกแบบ สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนผังการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์

### 3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของส่วนผสมโพลีเอสเตอร์

ภายหลังจากผลการออกแบบหาปริมาณโพลีเอสเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมทั้ง 3 สัดส่วนแล้ว ก้อนตัวอย่างของแต่ละส่วนผสม จะเตรียมขึ้นเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม โดยใช้ 3 ก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) 3 ก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) และความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) และอีก 3 ก้อนตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ดังนั้นในแต่ละส่วนผสมจะใช้ก้อนตัวอย่างทั้งหมด 9 ก้อน

การทดสอบจะกระทำโดย เครื่อง Universal Testing Machine (UTM-5P) ที่สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์ คอนกรีตและวัสดุอื่นๆ เช่น ดิน โลหะ เป็นต้น เครื่องมือนี้มีความสามารถควบคุมลักษณะการให้น้ำหนักได้ทั้งในอัตราคงที่ (Static Load) และในลักษณะแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM-5P)

### 3.5.1 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS)

ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของส่วนผสม นอกจากนี้ค่าที่ได้ยังสามารถนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการกำหนดระดับการบ่อน้ำหนักในการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยวิธีใช้แรงดึงทางอ้อม สำหรับวิธีการทดสอบจะอ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T283 “Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage” ซึ่งกำหนดให้ใช้อัตราการบ่อน้ำหนักเพื่อให้เกิดการยุบตัวคงที่เท่ากับ 2 นิ้ว/นาที่ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 °C โดยใช้สูตรคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.14 การจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

$$ITS = \frac{F}{A} = \frac{F}{(\pi DT)/2}$$

เมื่อ	ITS	= หน่วยแรงดึงสูงสุด (MPa)
	F	= แรงกระทำสูงสุด (N)
	A	= พื้นที่รองรับแรงดึงทางอ้อม (ตารางมิลลิเมตร)
	T	= ความหนา (มิลลิเมตร)
	D	= เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง (มิลลิเมตร)

### 3.5.2 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

ค่าโมดูลัสคืนตัวมีความสำคัญอย่างมากในการหาพฤติกรรมของวัสดุงานทาง เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความอ่อนไหวในการตอบสนองต่อน้ำหนักที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D4123 "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures" และ AASHTO TP31-94 "Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension"

ก้อนตัวอย่างจัดวางในเครื่องทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม การทดสอบจะทำที่ 4 อุณหภูมิโดยเริ่มจากที่อุณหภูมิต่ำไปหาอุณหภูมิสูง ที่แต่ละอุณหภูมิก้อนตัวอย่างจะได้รับการป้อนน้ำหนักในระดับต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าหน่วยแรงที่ใช้สำหรับการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิ

อุณหภูมิ (°C)	หน่วยแรงกระทำ (%ITS)
15	25
25	20
35	15
45	10

รูปแบบการป้อนน้ำหนักจะเป็นแบบกระทำซ้ำ (Repeated Load) ในรูปแบบ haversine wave ทุกๆ 1 วินาที (1 Hz.) แบ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการกดน้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที และเวลาพัก 0.9 วินาที โดยความถี่ดังกล่าวเป็นค่าที่ ASTM D4123 แนะนำว่าเป็นความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ที่เกิดจากปริมาณจราจรมากที่สุด

ก้อนตัวอย่างแต่ละก้อนจะทดสอบ 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันในแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง การทดสอบจะกระทำจนกระทั่งจำนวนครั้งของการป้อนน้ำหนักถึงรอบที่ 150 ตามมาตรฐานกำหนด ค่าโมดูลัสคืนตัวที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลจะได้จากค่าเฉลี่ยของ 5 ค่าสุดท้าย โดยสูตรคำนวณแสดงดังนี้



$$E_{res} = \frac{(v + 0.27) \times P}{T \times \Delta H}$$

เมื่อ	$E_{res}$	= ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)
	$V$	= สัดส่วนปริมาตรของ (Poisson ratio)
	$P$	= ระดับน้ำหนัก (N)
	$T$	= ความหนาของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)
	$\Delta H$	= ค่าการคืนตัวแนวราบ (Resilient Horizontal Deformation) (มิลลิเมตร)

ค่าสัดส่วนปริมาตรเท่ากับ 0.35 สำหรับการทดสอบที่ 15 °C และ 25 °C  
และเท่ากับ 0.40 สำหรับการทดสอบที่ 35 °C และ 45 °C

### 3.5.3 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance)

เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อความล้าที่เกิดขึ้นกับวัสดุ โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม เนื่องจากการทดสอบความต้านทานต่อความล้าไม่มีวิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐานแน่นอน การทดสอบประเภทนี้จึงกำหนดรูปแบบและลักษณะการป้อนน้ำหนักเดียวกันกับการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

การทดสอบกระทำที่อุณหภูมิ 25 °C ด้วยระดับการป้อนน้ำหนักที่ 0.25 MPa ในลักษณะกระทำซ้ำ กระทำจนกระทั่งก้อนตัวอย่างมีค่าโมดูลัสคืนตัวลดลงเหลือประมาณครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้น หรือก้อนตัวอย่างเกิดความเสียหายขึ้นอยู่ก่อนว่าเหตุการณ์ใดจะเกิดขึ้นก่อน

### 3.5.4 การทดสอบหาค่าความต้านทานต่อการยุบตัวแบบถาวร (Permanent Deformation)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเพื่อศึกษาสมรรถนะในการต้านทานต่อการยุบตัวอย่างถาวร โดยใช้การทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกน (Axial Load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อกันตัวอย่าง สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะอ้างอิงวิธีการทดสอบ จากมาตรฐานการทดสอบของประเทศออสเตรเลีย AS 2891.12.1-1995 “Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt – dynamic creep test”

เนื่องจากการทดสอบนี้เป็นการทดสอบโดยให้แรงตามแนวแกนต่อกันตัวอย่าง ดังนั้นการจัดวางก้อนตัวอย่างในโครงเฟรมสำหรับการทดสอบจึงแตกต่างจากการทดสอบก่อนหน้านี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร

ในการทดสอบจะป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำขนาด 200 kPa ด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที แบ่งเป็นช่วงเวลาในการป้อนน้ำหนัก 0.5 วินาที และช่วงเวลาพัก 1.5 วินาที ที่อุณหภูมิ 50°C

ก่อนจะนำก้อนตัวอย่างเข้าทดสอบ จะต้องทาผิวหน้าก้อนตัวอย่างด้วย Silicone Heat Transfer Compound เพื่อเป็นการลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างก้อนตัวอย่างกับชุดทดสอบ ซึ่งมาตรฐาน AS 2891.12.1-1995 แนะนำให้ใช้ปริมาณ 1 กรัม สำหรับก้อนตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 การทา Heat Transfer Compound ที่ผิวบนและล่างของก้อนตัวอย่าง

สำหรับการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนหรือการยุบตัวในการทดสอบจะวัดโดยเครื่องวัด 2 ชุด ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของก้อนตัวอย่าง เพื่อวัดการยุบตัวในทิศทางเดียวกับน้ำหนักที่กระทำ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงอยู่ในรูปของค่าการยุบตัวสะสมหรือค่าความเครียดสะสม (Accumulated Strain) ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละรอบของการป้อนน้ำหนัก การทดสอบจะดำเนินไปจนกระทั่งค่าความเครียดสะสม มีค่าเท่ากับ 10,000 micro strain หรือ มีการยุบตัวคิดเป็น 1 % ของความหนาของก้อนตัวอย่าง ในกรณีที่ค่าการยุบตัวเกิดขึ้นน้อยมาก จะหยุดการทดสอบที่ 40,000 รอบการป้อนน้ำหนัก โดยสามารถคำนวณค่าความเครียดสะสมได้จากสมการ

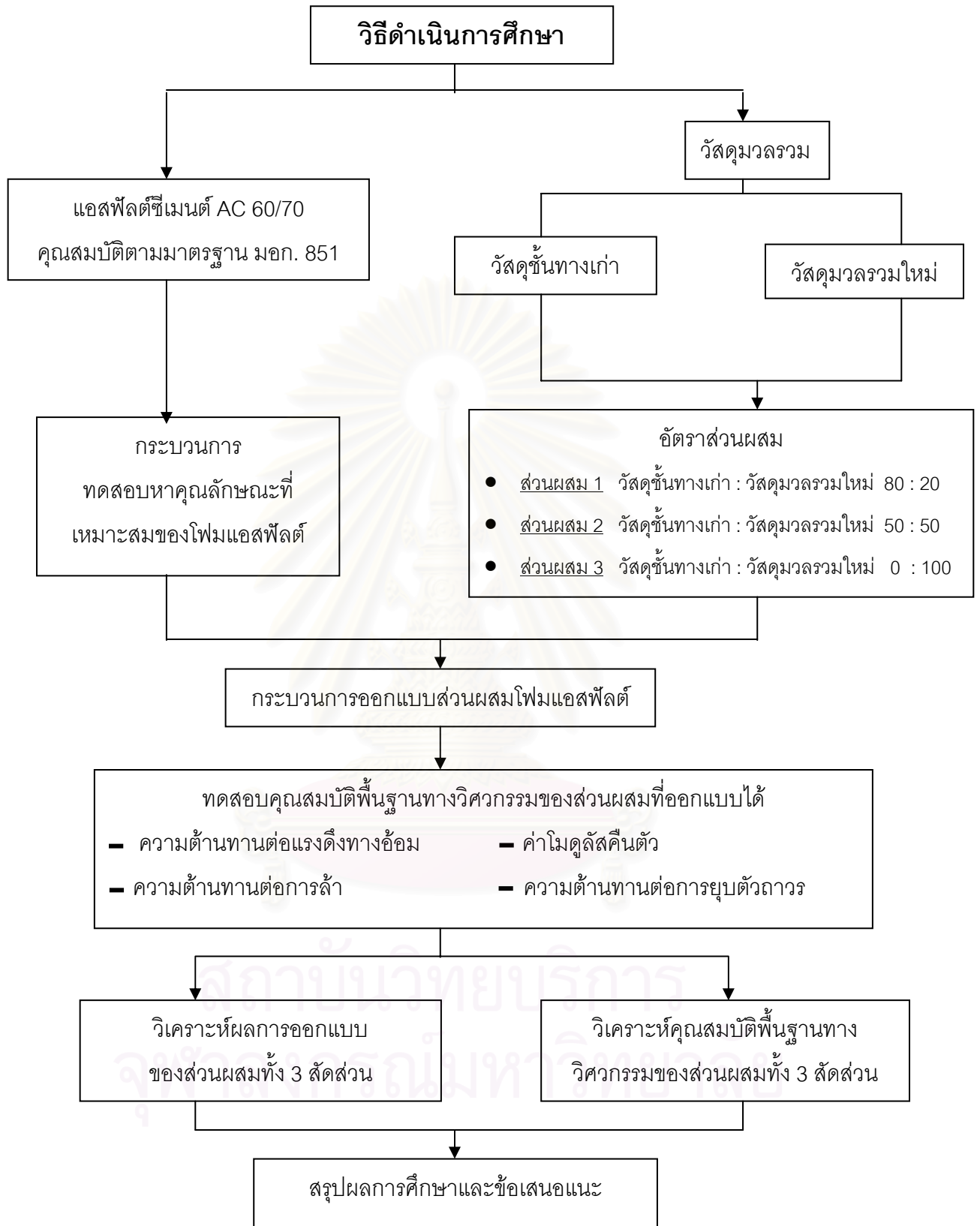
$$\epsilon_p = \frac{\Delta H}{H}$$

เมื่อ  $\epsilon_p$  = ค่าการยุบตัวสะสมหรือค่าความเครียดสะสม (Accumulated Strain)

$\Delta H$  = ขนาดการยุบตัว (มิลลิเมตร)

$H$  = ความหนาของก้อนตัวอย่าง (มิลลิเมตร)

ขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดในการศึกษาสามารถสรุปได้ดังแผนภาพรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลตามขั้นตอนต่างๆของการศึกษา นับตั้งแต่ขั้นตอน การทดสอบหาคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การทดสอบหาลักษณะของโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม การเตรียมวัสดุผสม การออกแบบส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์และการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์

ผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ยังไม่ผ่านการอบ

คุณสมบัติ	อ้างอิงวิธีการทดสอบ	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มอก.851	ค่าที่ได้จากการทดสอบ
ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	AASHTO T228	-	1.034
ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) ที่อุณหภูมิ 25 °C ป้อนน้ำหนัก 100 กรัม เป็นเวลา 5 วินาที	ASTM D5	60-70	64
จุดวาบไฟ (Flash Point) (°C)	ASTM D92	ไม่น้อยกว่า 232	328
ความยืดดึง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 25 °C ดึงยืดด้วยอัตราเร็ว 5 cm./s (cm.)	ASTM D113	ไม่น้อยกว่า 100	>100
การละลายในไตรคลอโรเอทิลีน (Solubility) (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D2042	ไม่น้อยกว่า 99	99
จุดอ่อนตัว (Softening Point) (°C)	ASTM D36	45-55	47

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านการอบ

คุณสมบัติ	อ้างอิงวิธีการทดสอบ	เกณฑ์ที่กำหนดตาม มอก.851	ค่าที่ได้จากการทดสอบ
น้ำหนักที่สูญเสียไปจากการอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D1754	ไม่เกินกว่า 0.8	0.05
ค่าเพนิเทรชัน (Penetration) (ร้อยละของค่าเพนิเทรชันก่อนผ่านการอบ)	ASTM D1754 ASTM D5	ไม่น้อยกว่า 54	67
ความยืดดึง (Ductility) ที่อุณหภูมิ 25 °C ดึงยืดด้วย อัตราเร็ว 5 cm./s (cm.)	ASTM D1754 ASTM D113	ไม่น้อยกว่า 50	>100

จากผลการทดสอบที่ได้ แสดงให้เห็นว่าวัสดุแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิตโพนแอสฟัลต์ ผ่านมาตรฐานตามเกณฑ์การตรวจสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60/70 ทุกประการ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.2 การทดสอบคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม

แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ผ่านมาตรฐานตามเกณฑ์การตรวจสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์แล้ว จะนำมาทดสอบเพื่อหาค่าของอุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไปในแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนเพื่อทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ที่มีค่าการขยายตัว (Expansion Ratio) และค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ที่เหมาะสมที่สุด

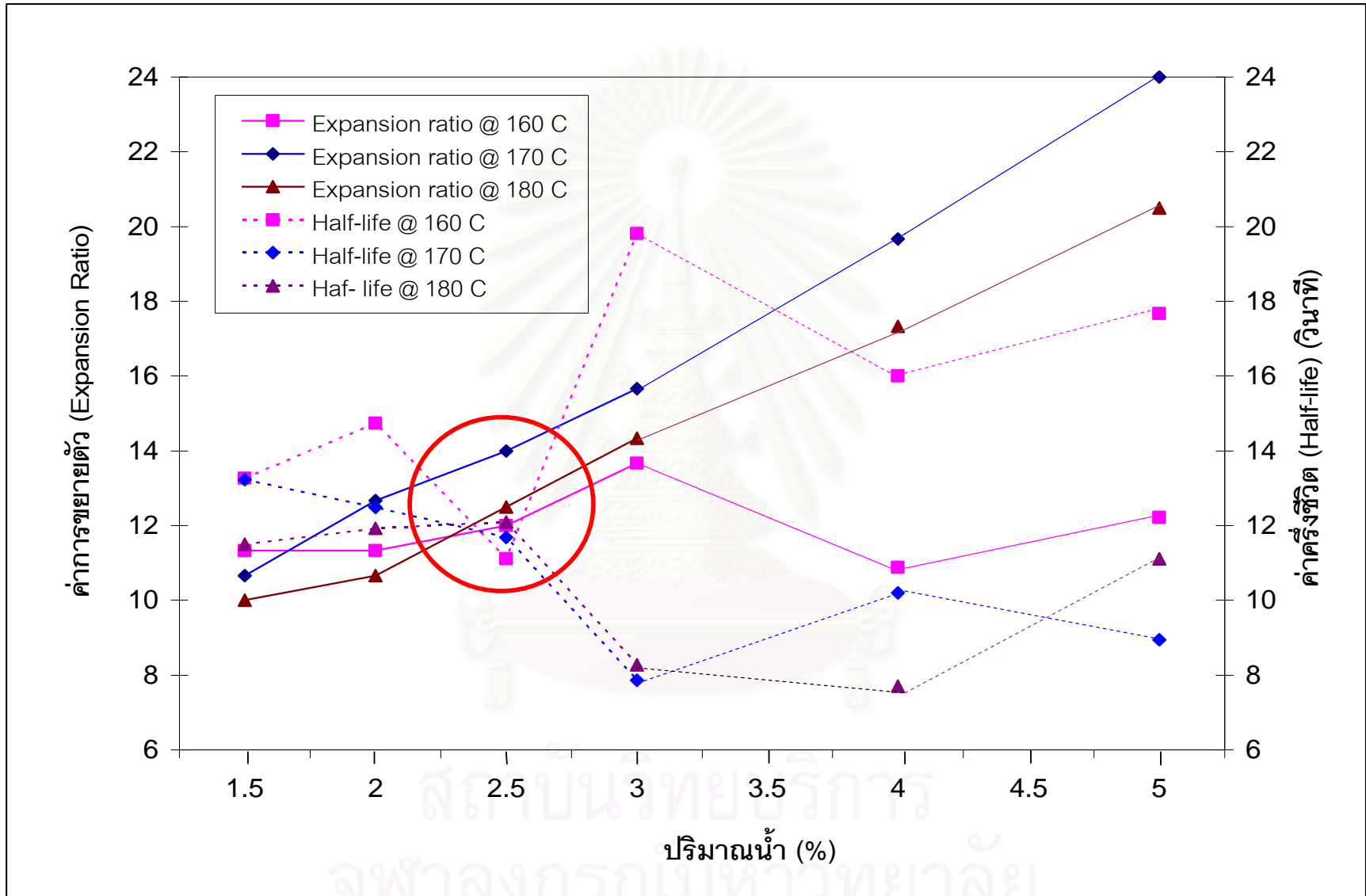


รูปที่ 4.1 โฟมแอสฟัลต์ที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบ

การทดสอบกำหนดอุณหภูมิแอสฟัลต์ 3 ค่า คือ 160 °C 170 °C และ 180 °C ที่แต่ละอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไปอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบแสดงตามตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโฟมแอสฟัลต์

ปริมาณน้ำ (%)	อุณหภูมิแอสฟัลต์ซีเมนต์ (°C)					
	160		170		180	
	ค่าการขยายตัว	ค่าครึ่งชีวิต	ค่าการขยายตัว	ค่าครึ่งชีวิต	ค่าการขยายตัว	ค่าครึ่งชีวิต
1.5	11	13.26	11	13.23	10	11.51
2.0	11	14.74	13	12.49	11	11.93
2.5	12	11.11	14	11.68	13	12.10
3.0	14	19.81	16	7.86	14	8.27
4.0	16	10.88	20	10.20	17	7.70
5.0	18	12.21	24	8.95	21	11.11



รูปที่ 4.2 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตของโพลีเมอสฟอสเฟต



ผลการทดสอบพบว่าค่าการขยายตัวของโฟมแอสฟัลต์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ฉีดเข้าไป ขณะที่ค่าครึ่งชีวิตจะมีค่าแปรปรวนกว่าเมื่อเทียบกับค่าการขยายตัว แต่โดยรวมแล้วแนวโน้มจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ดังนั้นการหาคุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดควรพิจารณาจากบริเวณที่เส้นกราฟทั้งสองของค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตตัดกันหรือใกล้กันที่สุด จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณน้ำเท่ากับ 2.5% เป็นบริเวณที่เส้นกราฟทั้งสองเข้าใกล้กันมากที่สุด (บริเวณภายในวงกลม)

เมื่อพิจารณาจากผลของแต่ละอุณหภูมิแอสฟัลต์ จะพบว่าค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิเท่ากับ 170 °C ให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือมีค่าการขยายตัวเท่ากับ 14 เท่า และค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 11.7 วินาที ผลที่ได้สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ Wirtgen Cold Recycling Manual ที่ระบุว่า ทั้งค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตควรมีค่าไม่น้อยกว่า 8 ทั้งนี้เพื่อให้โฟมแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปคุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปออกแบบส่วนผสม ได้ตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะของโฟมแอสฟัลต์เพื่อนำไปออกแบบส่วนผสม

คุณสมบัติของโฟมแอสฟัลต์	ค่าที่ได้
อุณหภูมิแอสฟัลต์	170 °C
ปริมาณน้ำ	2.5%
ค่าการขยายตัว	14 เท่า
ค่าครึ่งชีวิต	11.7 วินาที

#### 4.3 การทดสอบวัสดุมวลรวม

##### 4.3.1 ขนาดคละของวัสดุมวลรวม

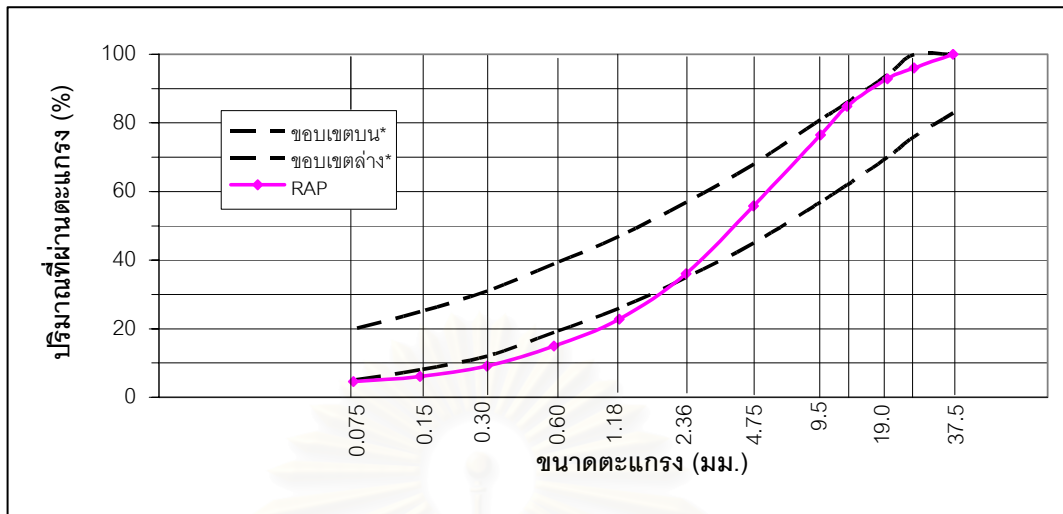
ขนาดคละของวัสดุมวลรวมทั้ง 2 ประเภทคือ วัสดุหินคลุกปนผิวทางเก่า (RAP) ที่ขุดรื้อจากทางหลวงหมายเลข 11 สาย พิษณุโลก-อุตรดิตถ์ และวัสดุมวลรวมใหม่ทั้ง 4 ขนาด แสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3 และ 4.4 สำหรับตารางที่ 4.6 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์เก่าในวัสดุชั้นทางเก่า (RAP)

ตารางที่ 4.5 ขนาดคละของวัสดุชั้นทางเก่า (RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่

ขนาด ตะแกรง (เบอร์)	ขนาด ตะแกรง (มม.)	ปริมาณที่ผ่านตะแกรง (%)				
		RAP	หินฝุ่น	nominal size 3/8"	nominal size 3/4"	nominal size 1 1/2"
1 1/2" inch	37.5	100.0				100
1" inch	25.0	96.0				89.2
3/4" inch	19.0	92.9			100	34.6
1/2" inch	12.5	84.9			56.7	1.2
3/8" inch	9.5	76.5		100	21.2	0.3
No.4	4.75	55.8	100	24.2	0.3	
No.8	2.36	36.1	79.8	0.7		
No.16	1.18	22.8	54.6	0.6		
No.30	0.60	14.9	37.8			
No.50	0.30	9.1	26.3			
No.100	0.15	6.0	18.8			
No.200	0.075	4.6	14.2			

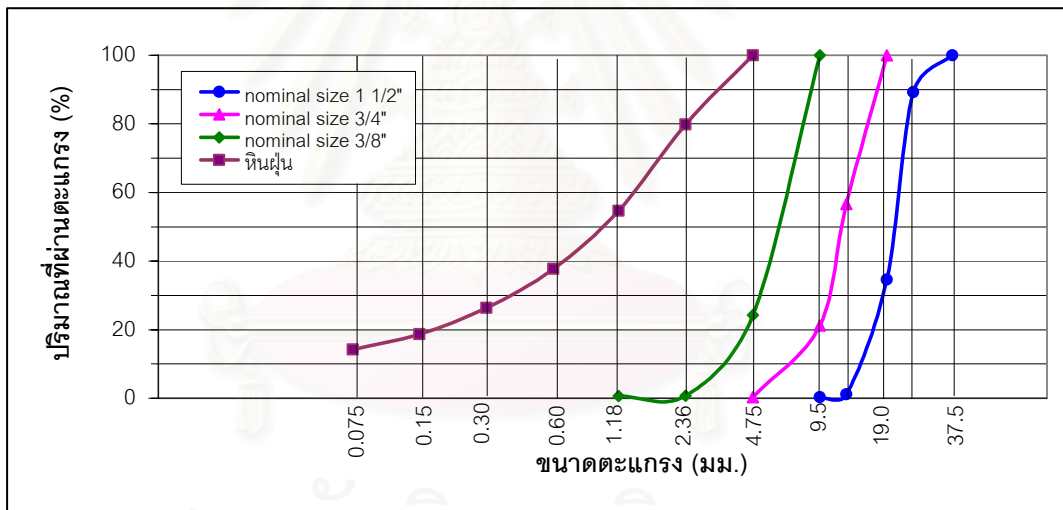
ตารางที่ 4.6 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมและปริมาณแอสฟัลต์เก่า

ประเภทวัสดุมวลรวม	ความถ่วงจำเพาะ Specific gravity	ปริมาณแอสฟัลต์เก่า (%) Asphalt content
RAP	2.613	2.06
หินฝุ่น	2.677	---
หินขนาด nominal size 3/8"	2.695	---
หินขนาด nominal size 3/4"	2.711	---
หินขนาด nominal size 1 1/2"	2.720	---



\* Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

รูปที่ 4.3 ขนาดคละของวัสดุหินคลุกปนผิวทางเก่า (RAP)



รูปที่ 4.4 ขนาดคละของวัสดุมวลรวมใหม่

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ขนาดคละของวัสดุชั้นทางเก่า (RAP) ที่ซู้ดรีอ์ขึ้นมามีขนาดคละที่ไม่เหมาะสมตามขอบเขตขนาดคละที่แนะนำไว้ของ Wirtgen Cold Recycling Manual (2001) โดยเฉพาะปริมาณมวลรวมเม็ดละเอียดที่มีไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องมีการเติมวัสดุมวลรวมใหม่เพิ่มเข้าไป เพื่อปรับขนาดคละให้เหมาะสมสำหรับโพนแอสฟัลต์ สำหรับการวิจัยครั้งนี้ กำหนดให้ปรับขนาดคละโดยใช้ปริมาณ RAP ใน 3 สัดส่วน โดยมีสัดส่วนระหว่างวัสดุเก่ากับใหม่รวมทั้งหมดผลสมที่ปรับขนาดคละแล้ว แสดงดังตารางที่ 4.7, 4.8 และรูปที่ 4.5

ขนาดคละทั้ง 3 ส่วนผสม จะได้รับการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เข้าไป 1% ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม เพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

- ช่วยเพิ่มปริมาณฝุ่นละเอียดให้แก่ส่วนผสมอีกทางหนึ่ง
- เพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะกันของวัสดุมวลรวม
- ช่วยเพิ่มอัตราการพัฒนากำลังของส่วนผสม

ทั้งนี้แล้วจุดประสงค์หลักของการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เนื่องจากส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์นั้นมีปริมาณแอสฟัลต์ผสมอยู่จำนวนไม่มากเมื่อเทียบกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ส่งผลทำให้ส่วนผสมมีความทนทานต่อความเสียหายจากความชื้นต่ำ (Muthen,1999) หรือความอ่อนไหวต่อความชื้นสูง (Moisture Susceptibility) ดังนั้นการผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะเป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรง และความสามารถในการต้านทานต่อความชื้น (Moisture Resistance) ให้แก่ส่วนผสม

ตารางที่ 4.7 สัดส่วนผสมระหว่างวัสดุชั้นทางเก่า (RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่

ประเภทวัสดุมวลรวม	สัดส่วนผสมของวัสดุมวลรวม (%)		
	ส่วนผสมที่ 1 80%RAP	ส่วนผสมที่ 2 50%RAP	ส่วนผสมที่ 3 0%RAP
RAP	80	50	---
หินฝุ่น	19	30	50
หินขนาด nominal size 3/8"	---	---	15
หินขนาด nominal size 3/4"	---	19	20
หินขนาด nominal size 1 1/2"	---	---	14
ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	1	1	1
รวม	100	100	100

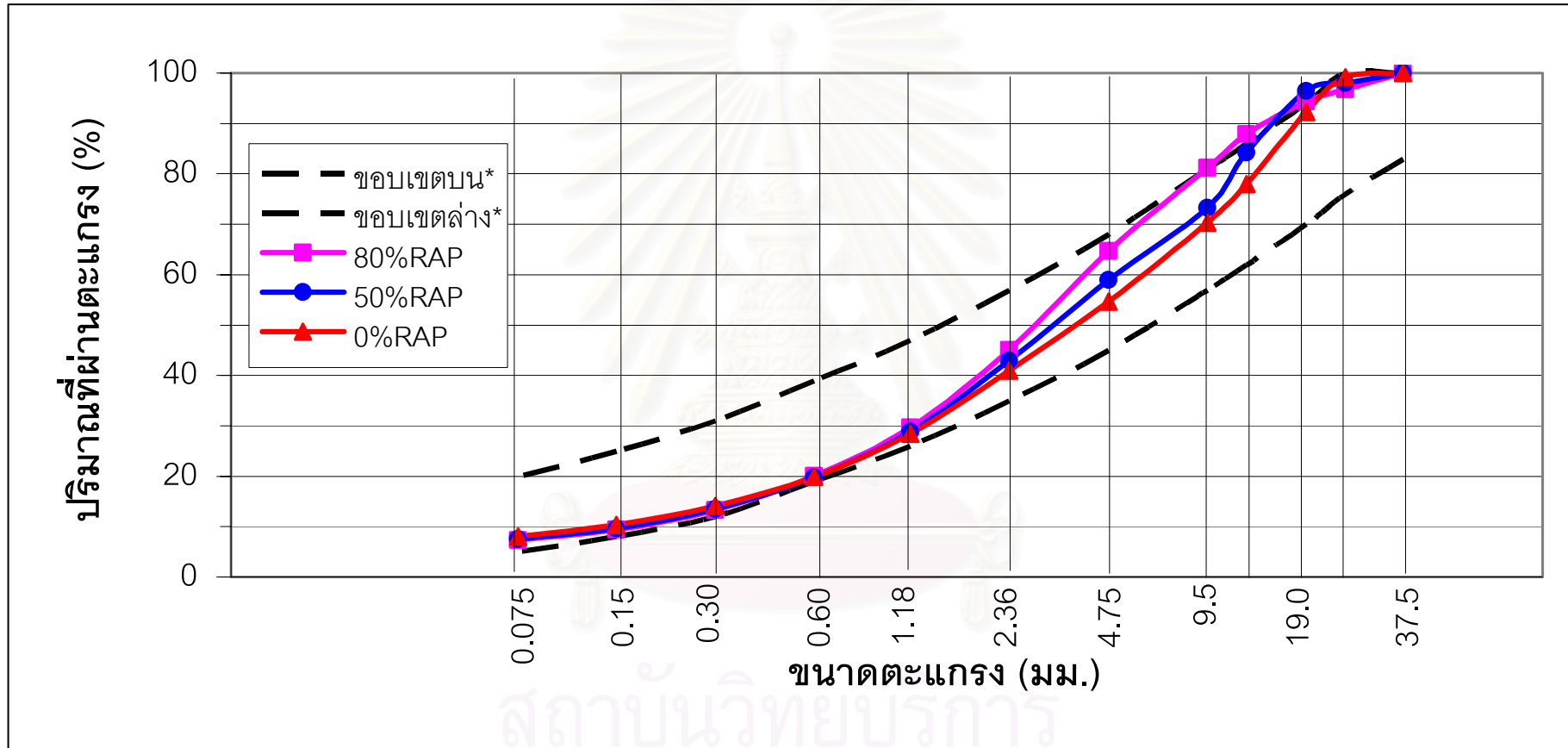
ตารางที่ 4.8 ส่วนผสมที่ได้รับการปรับขนาดคละแล้ว

ขนาด ตะแกรง (เบอร์)	ขนาด ตะแกรง (มม.)	ปริมาณที่ผ่านตะแกรง (%)			
		ส่วนผสม 1 80%RAP	ส่วนผสม 2 50%RAP	ส่วนผสม 3 0%RAP	*ขนาดคละ ที่แนะนำ
11/2" inch	37.5	100.0	100.0	100.0	83-100
1" inch	25.0	96.8	98.0	99.2	76-100
3/4" inch	19.0	94.3	96.5	92.2	70-94
1/2" inch	12.5	87.9	84.2	77.9	62-86
3/8" inch	9.5	81.2	73.3	70.3	57-81
No.4	4.75	64.7	59.0	54.7	45-68
No.8	2.36	45.0	43.0	41.0	35-57
No.16	1.18	29.6	28.8	28.4	26-47
No.30	0.60	20.1	19.8	19.9	19-39
No.50	0.30	13.3	13.4	14.1	12-31
No.100	0.15	9.4	9.6	10.4	8-25
No.200	0.075	7.3	7.5	8.1	5-20

\*Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

ขนาดคละของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์จะต้องมีปริมาณฝุ่นละเอียด (มวลรวมที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือมีขนาดเล็กกว่า 0.075 มม.) ที่เพียงพอ ทั้งนี้เพื่อให้โฟมแอสฟัลต์สามารถกระจายตัวเข้าไปผสมกับฝุ่นละเอียด เกิดเป็นรูปแบบของมอร์ต้าซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดวัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ไว้ด้วยกัน ส่งผลต่อความแข็งแรงโดยรวมของส่วนผสม

จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าขนาดคละที่ปรับแล้วของทั้ง 3 ส่วนผสมคือ 80%RAP 50%RAP และ 0%RAP มีปริมาณฝุ่นละเอียดที่เพียงพอสำหรับการผสมกับโฟมแอสฟัลต์ตามที่ Wirtgen Cold Recycling Manual (2001) ได้แนะนำไว้ในช่วงระหว่าง 5-20% ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับค่าแนะนำจากทั้ง Ruckel et al.(1983) และ Ramanujam (2000)



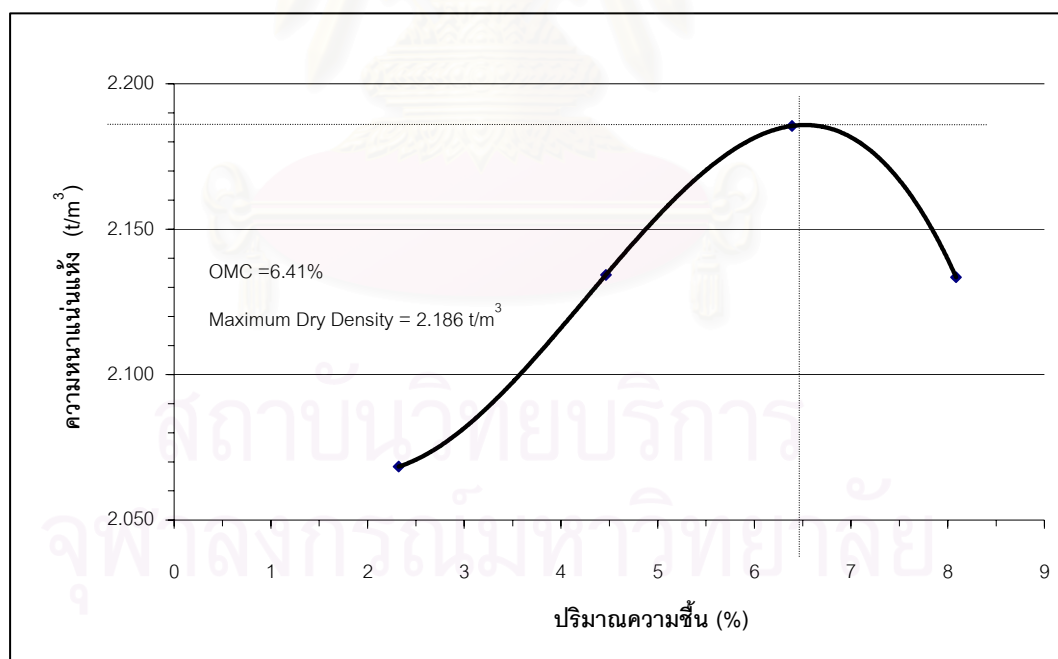
\*Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

รูปที่ 4.6 ขนาดคละของวัสดุรวมทั้ง 3 ส่วนผสม

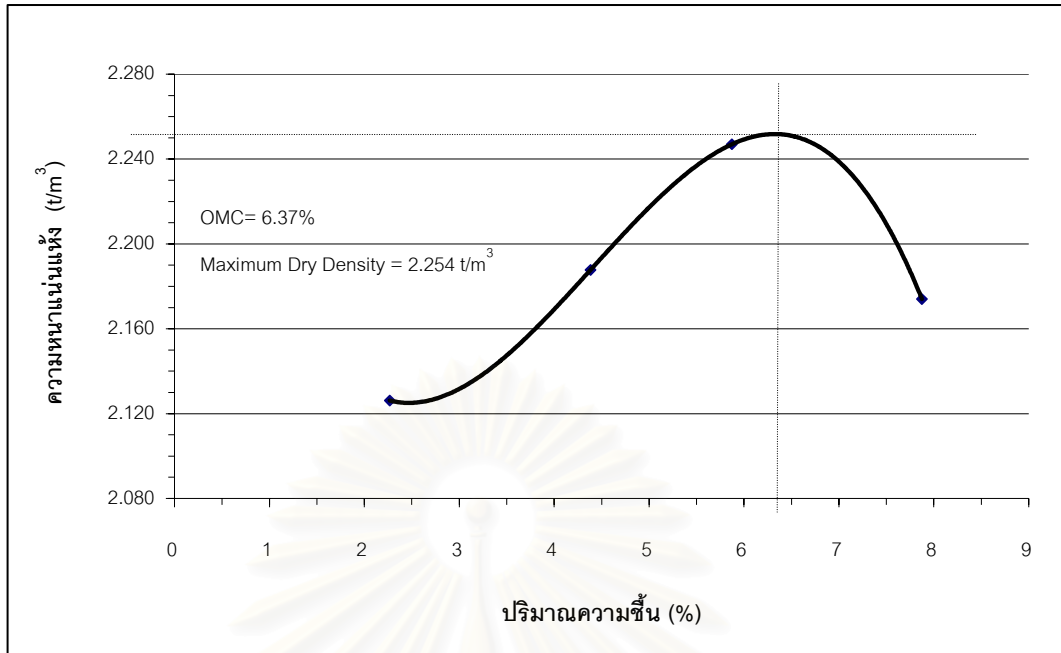
### 4.3.2 ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับวัสดุมวลรวม

ภายหลังจากได้ส่วนผสมของวัสดุมวลรวมที่มีขนาดคละที่เหมาะสมแล้ว ส่วนผสมทั้งสาม จะได้รับการนำมาทดสอบ เพื่อนำมาหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC) โดยวิธีการทดลองบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน อ้างอิงตามมาตรฐาน AASHTO T180 และ มาตรฐานกรมทางหลวง ทม.-ท.108/2517 ผลการทดสอบการหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 4.7-4.9 และตารางที่ 4.9

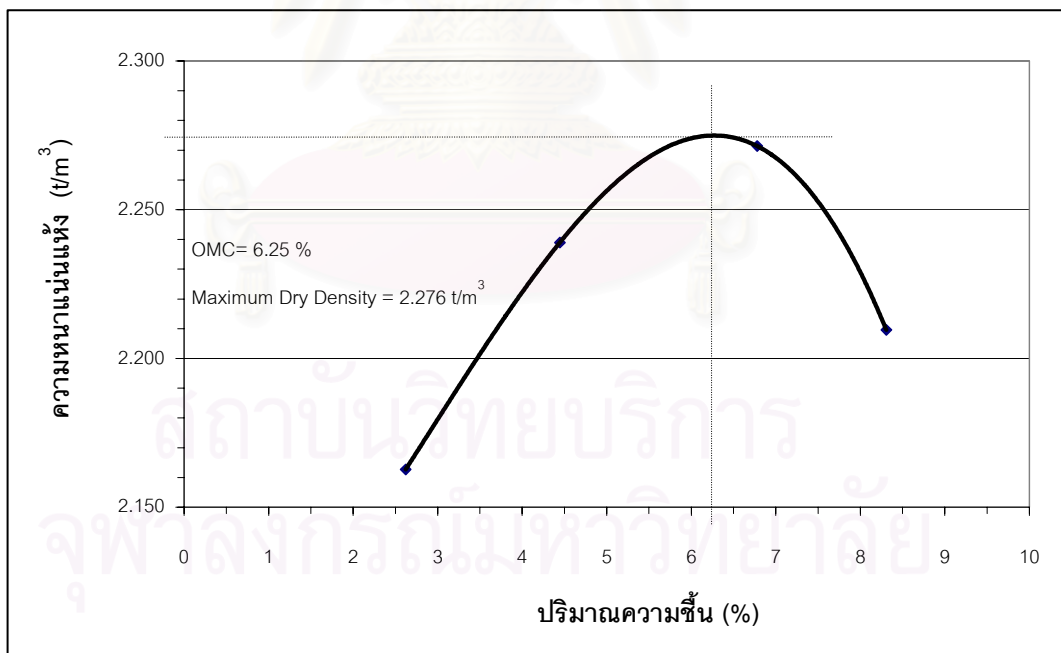
ปริมาณความชื้นของวัสดุมวลรวมที่พอเหมาะในระหว่างการผสมโฟมแอสฟัลต์ และในระหว่างการบดอัด เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการออกแบบส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ ความชื้นที่เหมาะสมจะช่วยให้การกระจายตัวของโฟมแอสฟัลต์เข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวม และช่วยให้บดอัดได้ความหนาแน่นสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณที่สูงเกินไปจะส่งผลถึงความแข็งแรงและเวลาที่ใช้ในการบดอัดส่วนผสมได้



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 80% RAP



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 50% RAP



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 0% RAP



ตารางที่ 4.9 สรุปค่าปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของแต่ละส่วนผสม

การทดสอบ	ส่วนผสม 1 80%RAP	ส่วนผสม 2 50%RAP	ส่วนผสม 3 0%RAP
ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม OMC (%)	6.41	6.37	6.25
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด ( $t/m^3$ )	2.184	2.254	2.276

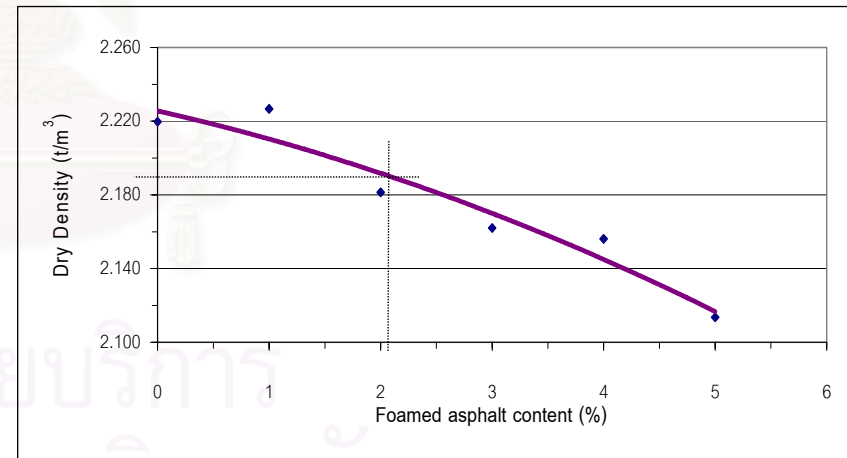
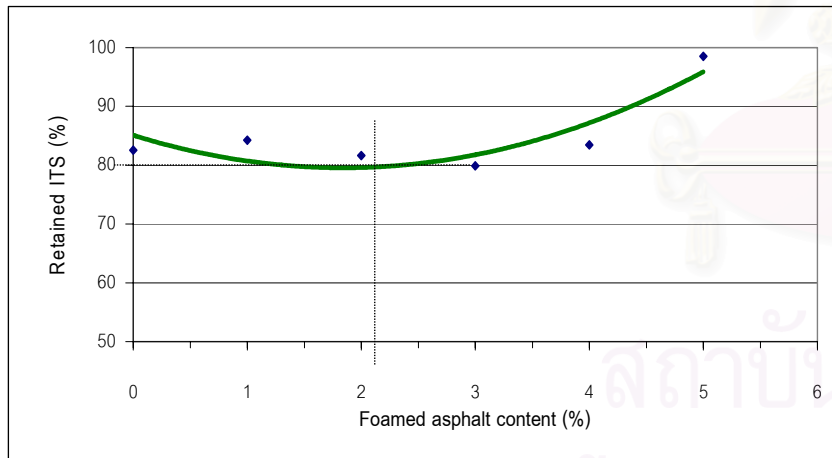
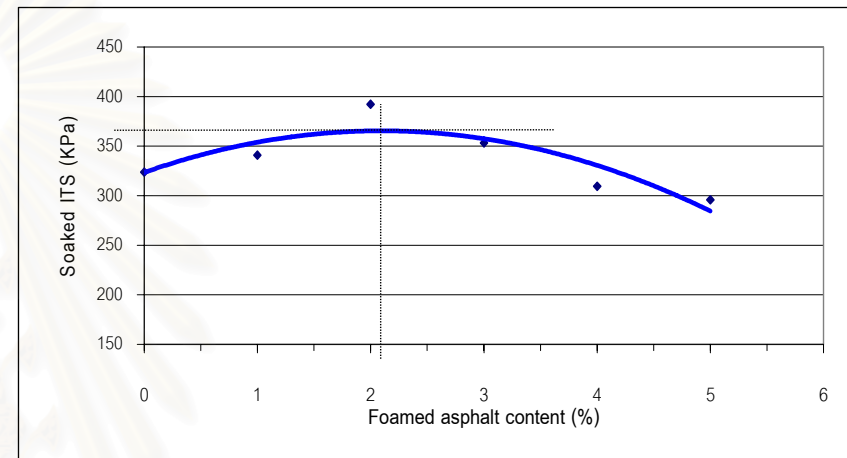
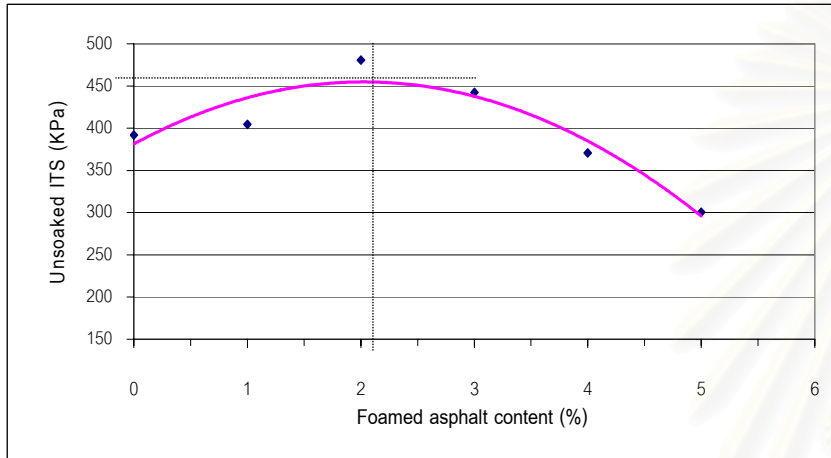
ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าส่วนผสม 80%RAP ต้องการค่าความชื้นสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากในขนาดคละที่มีปริมาณส่วนละเอียด (ผ่านตะแกรงเบอร์ 4) มาก จะต้องการความชื้นเข้าไปผสมกับมวลรวมในปริมาณที่สูงกว่า ในขณะที่เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นแห้งของส่วนผสม จะพบว่าส่วนผสม 50%RAP และ 0%RAP ให้ค่าที่สูงใกล้เคียงกัน ส่วนของ 80%RAP ให้ค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดคละของส่วนผสมแล้ว การมีแอสฟัลต์เก่าเคลือบผิวมวลรวมจะส่งผลถึงค่าความหนาแน่นจากการบดอัดด้วย (ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และมีฤกษ์ พัชร, 2544)

#### 4.4 การออกแบบส่วนผสมโพนแอสฟัลต์

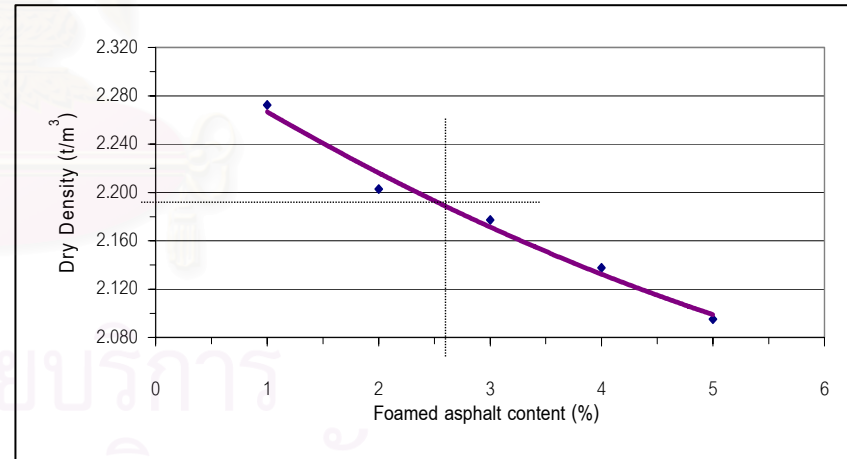
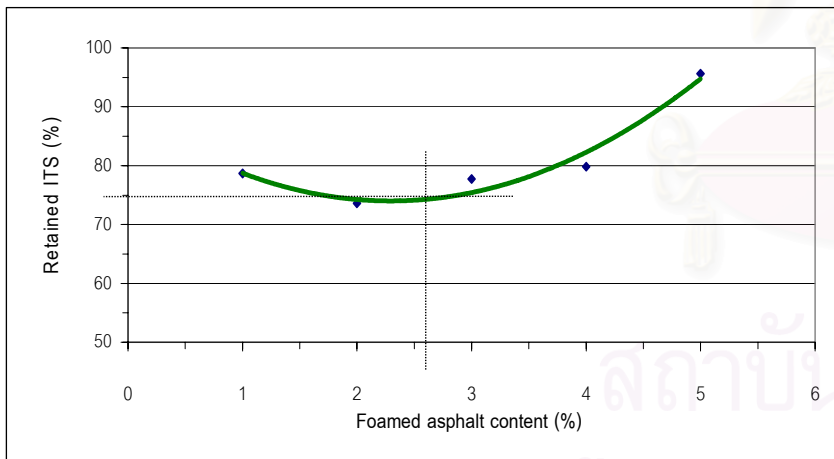
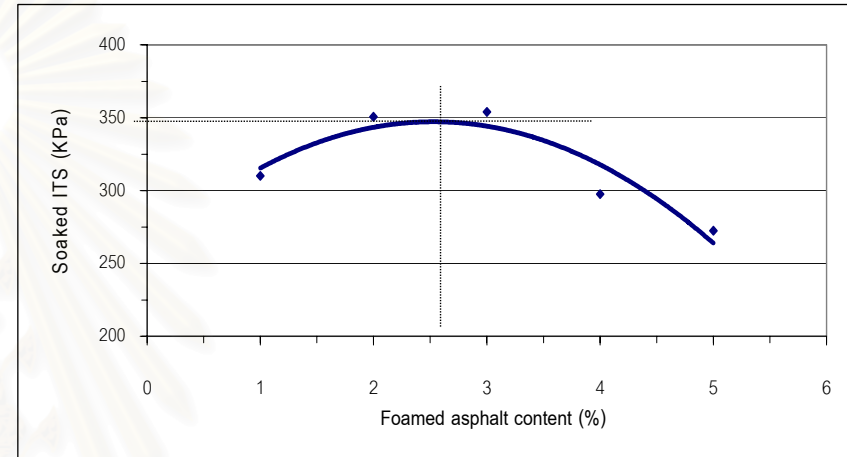
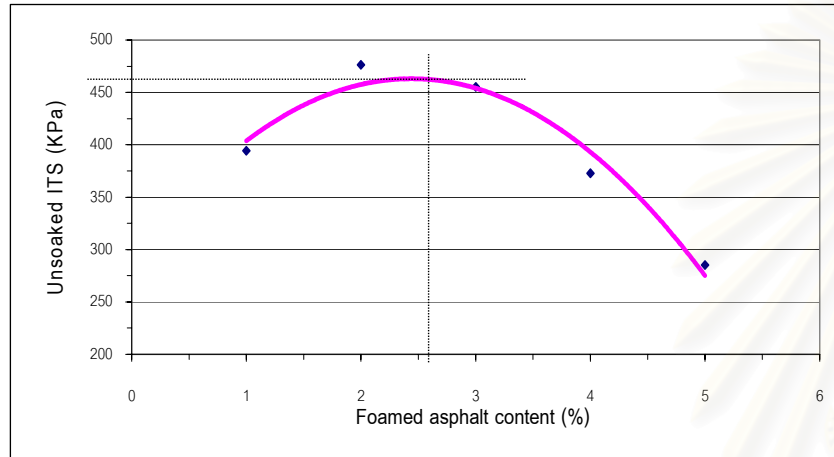
เมื่อได้ขนาดคละและค่าปริมาณความชื้นที่ต้องการในแต่ละส่วนผสมแล้ว ส่วนผสมทั้งสามจะนำไปทดสอบเพื่อหาปริมาณโพนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมกับแต่ละส่วนผสม โดยการออกแบบนั้นพิจารณาจากค่า ดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่นแห้งของส่วนผสม (Dry Density)
- ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำ (Soaked ITS)
- ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ (Unsoaked ITS)
- อัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำต่อสภาพแห้ง (Retained ITS)

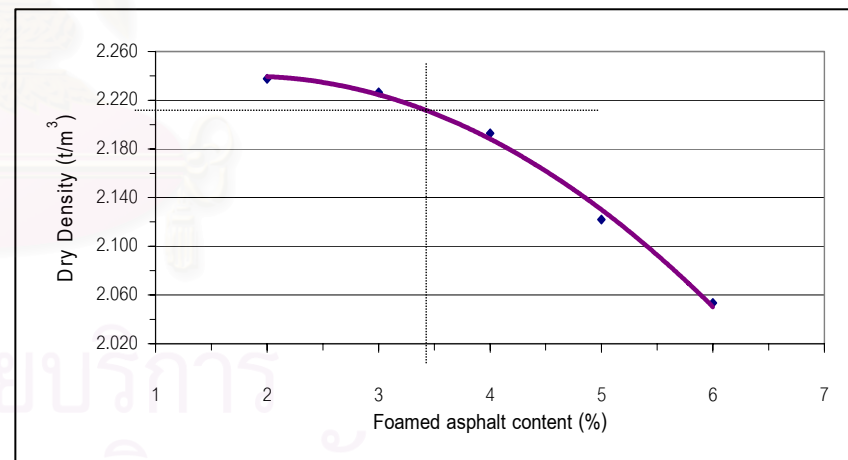
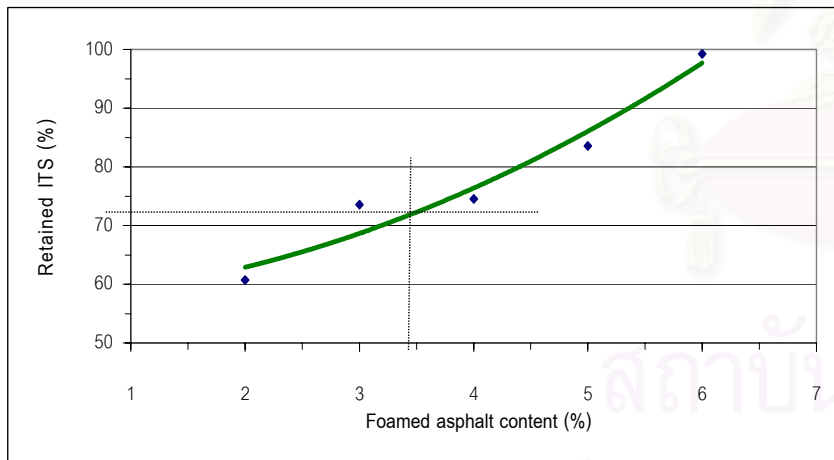
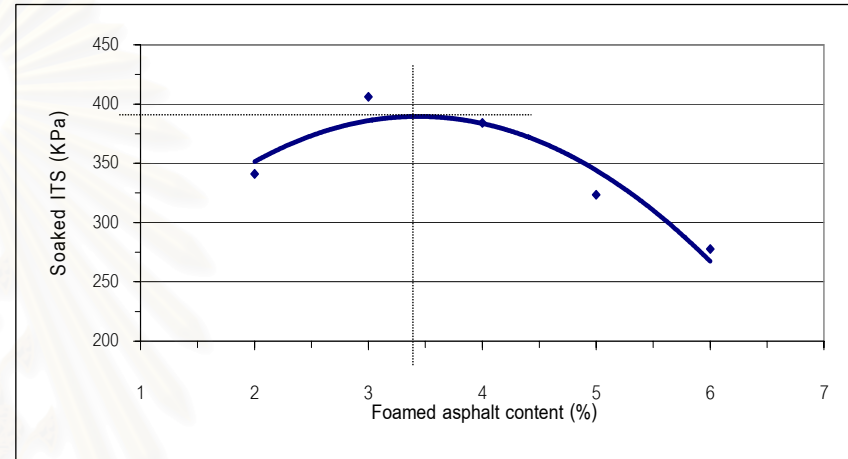
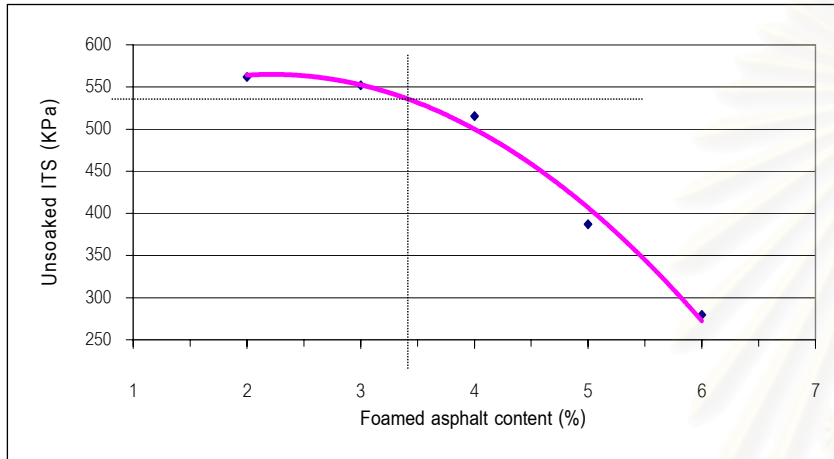
เกณฑ์การออกแบบพิจารณาจาก ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมโพนแอสฟัลต์มีความอ่อนไหวต่อความเสียหายจากความชื้นดังที่กล่าวมาแล้ว ผลการทดสอบในขั้นตอนนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.10-4.12 และตารางที่ 4.10-4.11



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบเพื่อออกแบบส่วนผสม 80%RAP



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบเพื่อออกแบบส่วนผสม 50%RAP



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบเพื่อออกแบบส่วนผสม 0%RAP

ตารางที่ 4.10 ผลการออกแบบส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์

การทดสอบ	ส่วนผสม 1	ส่วนผสม 2	ส่วนผสม 3
	80%RAP	50%RAP	0%RAP
Optimum content (%)	2.1	2.6	3.4
Unsoaked ITS* (kPa)	453	465	540
Soaked ITS* (kPa)	366	348	390
Retained ITS* (%)	80	75	72
Dry Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.188	2.190	2.210

\*Indirect Tensile Strength

ผลการออกแบบพบว่าส่วนผสม 80%RAP 50%RAP และ 0%RAP ต้องการปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์เท่ากับ 2.1% 2.6% และ 3.4% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่มีวัสดุเก่า ผสมอยู่ในปริมาณมากจะต้องการปริมาณโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสภาพวัสดุเก่าที่ดูดซึมแอสฟัลต์ได้น้อยกว่า ในขณะที่จะพบว่าส่วนผสม 0%RAP ให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทั้ง Soaked ITS และ Unsoaked ITS สูงสุด แต่จะพบว่าส่วนผสมที่ปริมาณวัสดุเก่าผสมอยู่มากจะให้ค่าอัตราส่วน Soaked ITS ต่อ Unsoaked ITS (Retained ITS) ที่สูงกว่าหรือกล่าวได้ว่ามีอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมสูงหลังจากการแช่น้ำ

ตารางที่ 4.11 ค่าแนะนำสำหรับการออกแบบส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์โดยทั่วไป

เอกสารอ้างอิง	การทดสอบ	ส่วนผสม		
		80%RAP	50%RAP	0%RAP
Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)	Optimum content (%)	---	1.5-30	2.5-3.0
Maccarrone (1994)	Unsoaked ITS (kPa)	>200		
	Soaked ITS (kPa)	>100		
	Retained ITS (%)	>50		

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลจากการออกแบบส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์กับค่าที่แนะนำจากแหล่งอ้างอิงอื่น พบว่าคุณสมบัติของส่วนผสมที่ได้อยู่ผ่านมาตรฐานตามค่าที่แนะนำทุกประการ แสดงให้เห็นว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์และวัสดุผสมรวมในประเทศสามารถนำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม

หลังจากทราบค่าปริมาณโพลีเมอร์ที่ความต้องการของแต่ละส่วนผสมแล้ว ส่วนผสมทั้งสามจะนำไปทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมโดยการทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม ซึ่ง เป็นวิธีการทดสอบที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุงานทาง เนื่องจาก

- เป็นวิธีการทดสอบมีลักษณะเรียบง่ายและไม่ซับซ้อน
- ลักษณะการแตกร้าวของวัสดุ เนื่องมาจากการทดสอบไม่มีผลจากสภาพของผิวของวัสดุทดสอบ ทำให้แน่ใจได้ว่าผลที่ได้จากการทดสอบเป็นคุณสมบัติของวัสดุอย่างแท้จริง
- ลักษณะการแตกร้าวของวัสดุ เกิดขึ้นที่บริเวณที่มีแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ
- ความแปรปรวนของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำ

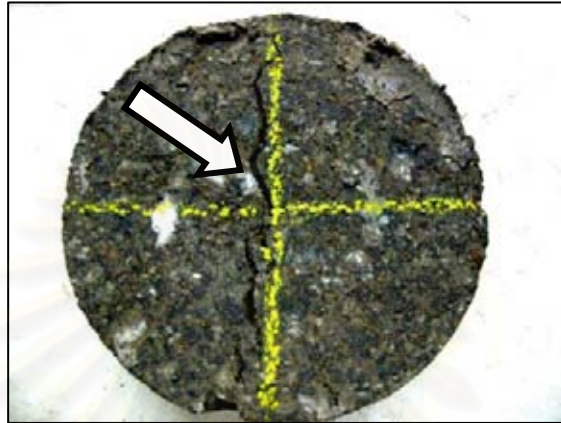
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล สำหรับการทดสอบแบบแรงดึงทางอ้อม ทั้งการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Indirect Tensile Strength) การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus) ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) และความต้านทานต่อการยุบตัวถาวร (Permanent Deformation) ของทั้งสามส่วนผสม แสดงได้ดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength: ITS)

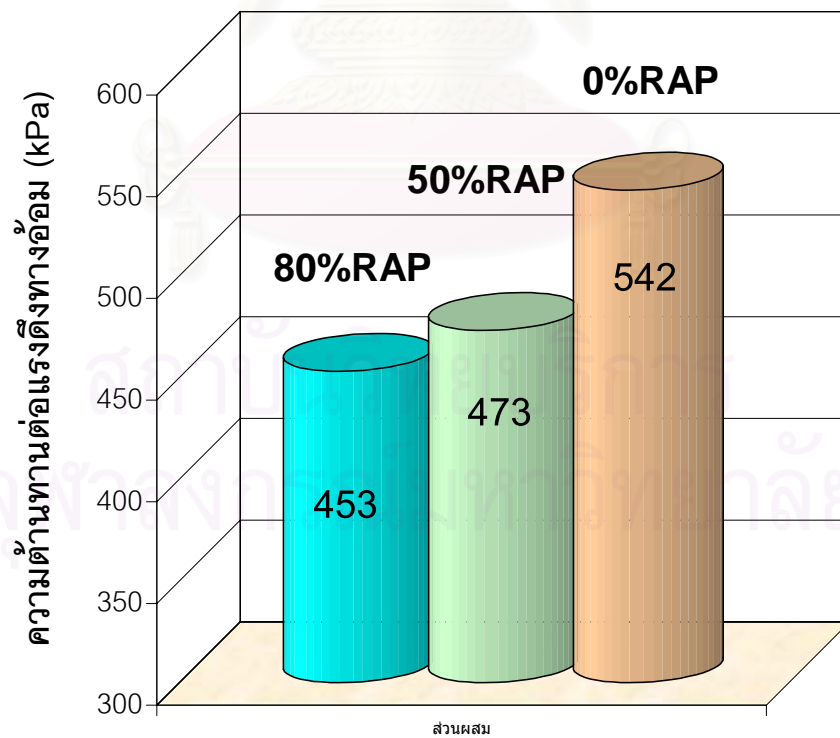


รูปที่ 4.13 เครื่องมือทดสอบและการจัดวางก้อนตัวอย่างในการทดสอบหา  
ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ในการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ก่อนตัวอย่างของแต่ละส่วนผสม จะได้รับการป้อนน้ำหนักเพื่อให้เกิดการยุบตัวคงที่ในอัตรา 2 นิวตันนาที ที่อุณหภูมิ 25°C การป้อนน้ำหนัก จะกระทำจนกระทั่งก่อนตัวอย่างเกิดการพังทลาย ผลการทดสอบที่ได้ทั้ง แสดงดังรูปที่ 4.14 - 4.15 และตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.14 ลักษณะการพังทลายของก้อนตัวอย่าง



รูปที่ 4.15 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแต่ละส่วนผสม

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบผลค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่ได้อ้อมที่  
ได้จากแหล่งอ้างอิงอื่นๆ

ส่วนผสม	ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (kPa) (Indirect Tensile Strength: ITS)			
	ค่าจากการ ทดสอบ	Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)	Maccarrone (1994)	Interim Technical Guideline (2002)
ส่วนผสม 1 80%RAP	453	---		
ส่วนผสม 2 50%RAP	473	350-800	>200	100-500
ส่วนผสม 3 0%RAP	542	450-900		

ผลการทดสอบพบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของ ส่วนผสม 80%RAP 50%RAP และ 0%RAP มีค่าเท่ากับ 453 473 และ 542 kPa ตามลำดับ ค่าที่ได้นี้เมื่อพิจารณาแล้วให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการออกแบบส่วนผสมของแต่ละส่วนผสมที่ให้ค่าเท่ากับ 453 465 และ 540 kPa ตามลำดับ

ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแต่ละส่วนผสมเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ แหล่งอ้างอิงที่อื่นๆพบว่า Wirtgen Cold Recycling Manual (2001) ให้ค่าโดยทั่วไปของส่วนผสม 50%RAP และ 0%RAP อยู่ในช่วง 350-800 kPa และ 450 -900 kPa ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดเจนว่า ช่วงค่าความต้านทานนั้นครอบคลุมถึงค่าที่ได้จากการทดสอบของทั้งสองส่วนผสม ในขณะที่ Maccarrone (1994) แนะนำว่าค่าความต้านทานไม่ควรน้อยกว่า 200 kPa รวมทั้งจาก Interim Technical Guideline (2002) จากแอฟริกาใต้ แนะนำว่าค่าความต้านทานโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 100-500 kPa จากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของทั้ง สามส่วนผสมสามารถผ่านค่าที่แนะนำไว้ทั้งหมด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมโพลี แอสฟัลต์ทั้งสามส่วนผสมที่ใช้วัสดุภายในประเทศสามารถให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



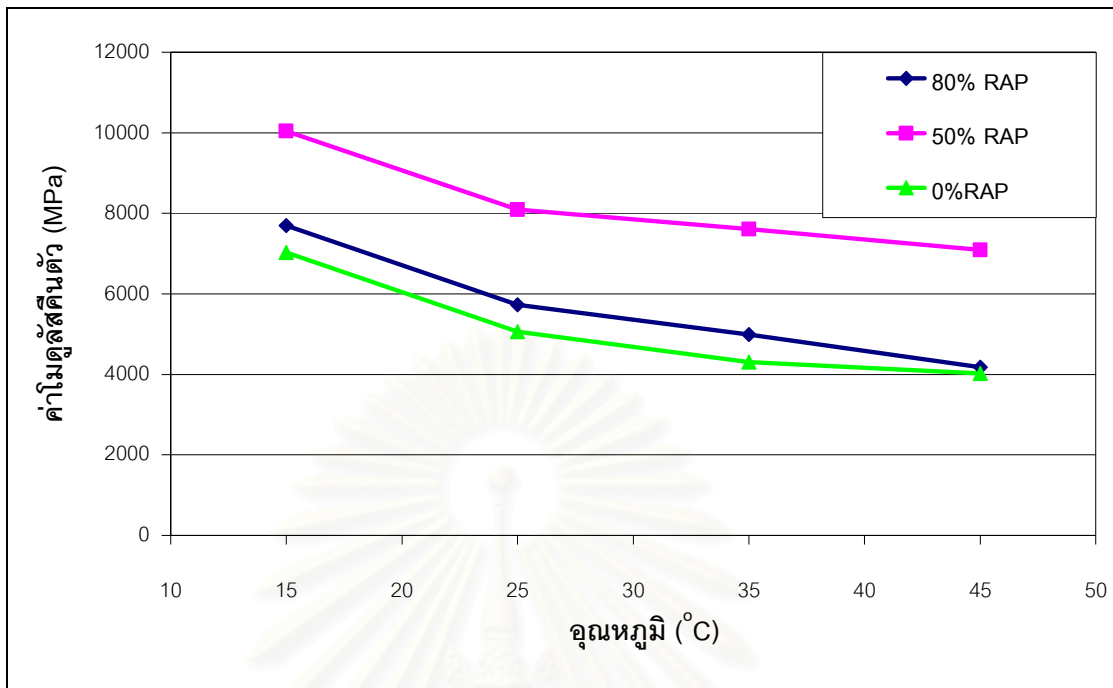
#### 4.5.2 ค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus)

ค่าโมดูลัสคืนตัวมีความสำคัญในการหาพฤติกรรมของวัสดุงานทาง เนื่องจากเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความอ่อนไหวในการตอบสนองต่อน้ำหนักที่กระทำต่อวัสดุ การทดสอบนี้กระทำที่อุณหภูมิ 15°C 25°C 35°C และ 45°C โดยแต่ละอุณหภูมิก้อนตัวอย่างจะได้รับการป้อนน้ำหนักเท่ากับ 25% 20% 15% และ 10% ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแต่ละส่วนผสมตามลำดับ

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน ดังนั้นค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นสิ่งสำคัญ การทดสอบจึงกำหนดอุณหภูมิสูงสุดไว้ที่ 45°C ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวของแต่ละส่วนผสม

ส่วนผสม		อุณหภูมิ(°C)			
		15 °C	25 °C	35 °C	45 °C
80%RAP	ระดับการป้อนน้ำหนัก (kPa)	113	91	68	45
	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)	7697	5725	4989	4180
50%RAP	ระดับการป้อนน้ำหนัก (kPa)	118	95	71	47
	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)	10044	8095	7604	7094
0%RAP	ระดับการป้อนน้ำหนัก (kPa)	136	108	81	54
	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)	7032	5058	4306	4027



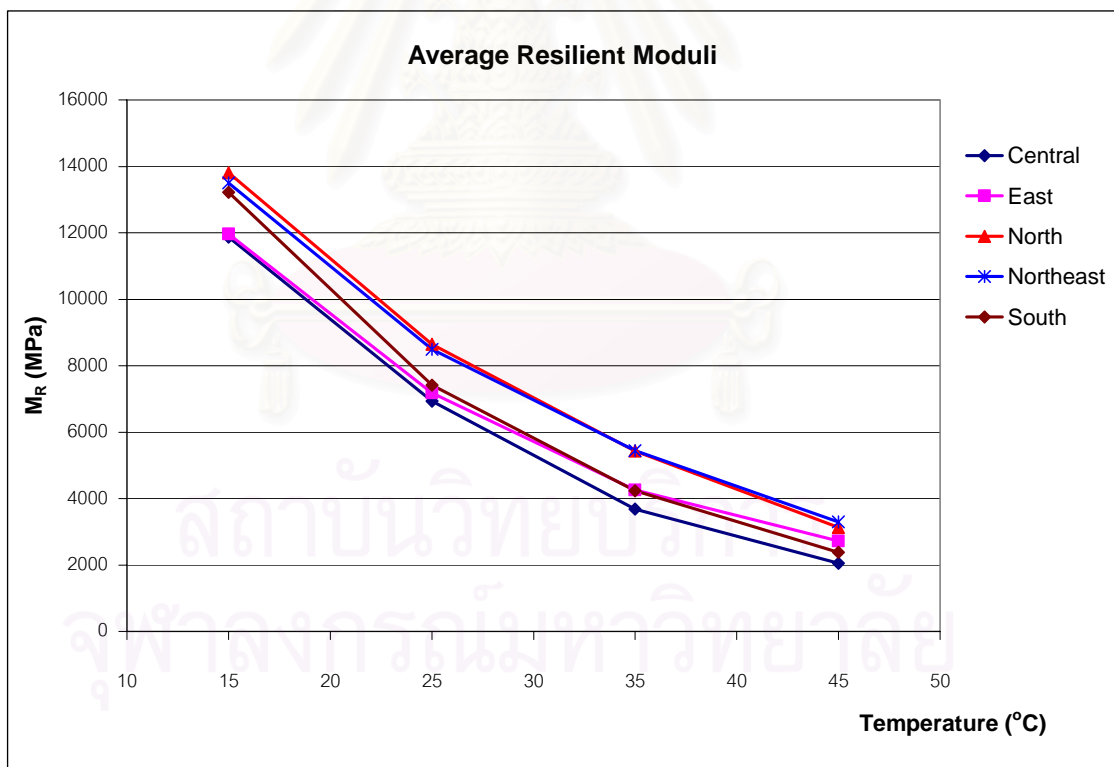
รูปที่ 4.16 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของส่วนผสมในแต่ละอุณหภูมิ

จากส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์ที่นำมาทดสอบทั้ง 3 สัดส่วน พบว่าส่วนผสม 50%RAP ให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวสูงที่สุดในทุกช่วงของอุณหภูมิ ขณะที่ในสองส่วนผสมที่เหลือให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากผลของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสคั้นตัวแสดงให้เห็นว่าส่วนผสม 80%RAP มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากโดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิสูง เมื่อเทียบกับส่วนผสม 50%RAP และ 0%RAP

ในด้านอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าโมดูลัสคั้นตัวของส่วนผสมโพลีเมอร์แอสฟัลต์ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่ใช้อยู่ในประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งอ้างอิงข้อมูลจาก Pavement Technology Project: Technical Report No.7 (2001) ของกรมทางหลวง โดยเป็นการทดสอบวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ขุดเจาะมาจากถนน 75 สายทางทั่วทุกภาคของประเทศไทย

เมื่อเปรียบเทียบผลจากรูปที่ 4.16 กับ 4.17 แม้ว่าค่าโมดูลัสคั้นตัวของส่วนผสมโม่แอสฟัลต์ทั้งสามจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ก็แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ส่วนผสมโม่แอสฟัลต์มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature Susceptibility) น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน

ทั้งนี้เนื่องมาจากส่วนผสมโม่แอสฟัลต์ประกอบด้วย ปริมาณแอสฟัลต์ในจำนวนที่ต่ำกว่า แอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน ทำให้อุณหภูมิซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์โดยตรง ส่งผลต่อส่วนผสมโม่แอสฟัลต์ได้น้อยกว่า นอกจากนี้แล้วยังเป็นผลจากรูปแบบการกระจายตัวของโม่แอสฟัลต์ที่จะเข้าไปผสมกับฝุ่นละเอียดเกิดเป็นรูปแบบของมอร์ต้าซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดวัสดุรวมที่มีขนาดใหญ่ไว้ด้วยกัน แทนการที่ตัวโม่แอสฟัลต์จะเข้าไปเคลือบกับวัสดุรวมทั้งหมดโดยตรงเหมือนกับแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน จึงทำให้อุณหภูมิส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมได้น้อยกว่า



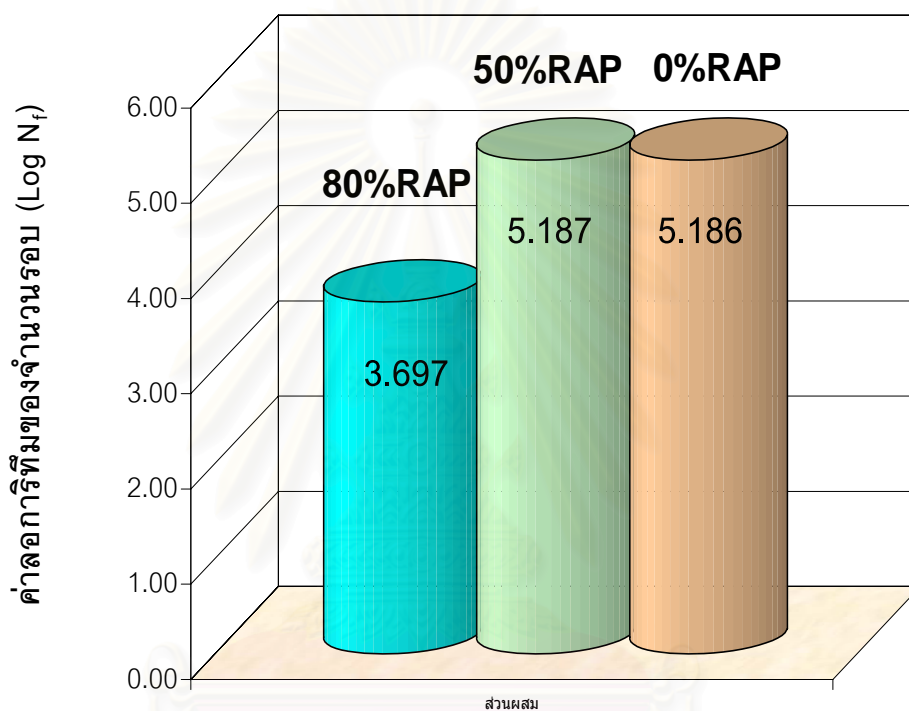
รูปที่ 4.17 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนในแต่ละอุณหภูมิ

ที่มา : Pavement Technology Project: Technical Report No.7 (2001)

Based on Pavement Performance and Elastic Modulus Evaluation

#### 4.5.3 ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance)

การทดสอบนี้กำหนดให้น้ำหนักขนาด 0.25 MPa กระทำกับก้อนตัวอย่างในลักษณะกระทำซ้ำ ที่อุณหภูมิ 25°C จนกระทั่งก้อนตัวอย่างมีค่าโมดูลัสคืนตัวลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากค่าเริ่มต้น เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นลง จะได้ข้อมูลผลการทดสอบเป็นจำนวนครั้งของการป้อนน้ำหนักที่ทำให้ค่าโมดูลัสคืนตัวลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ( $N_f$ ) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18



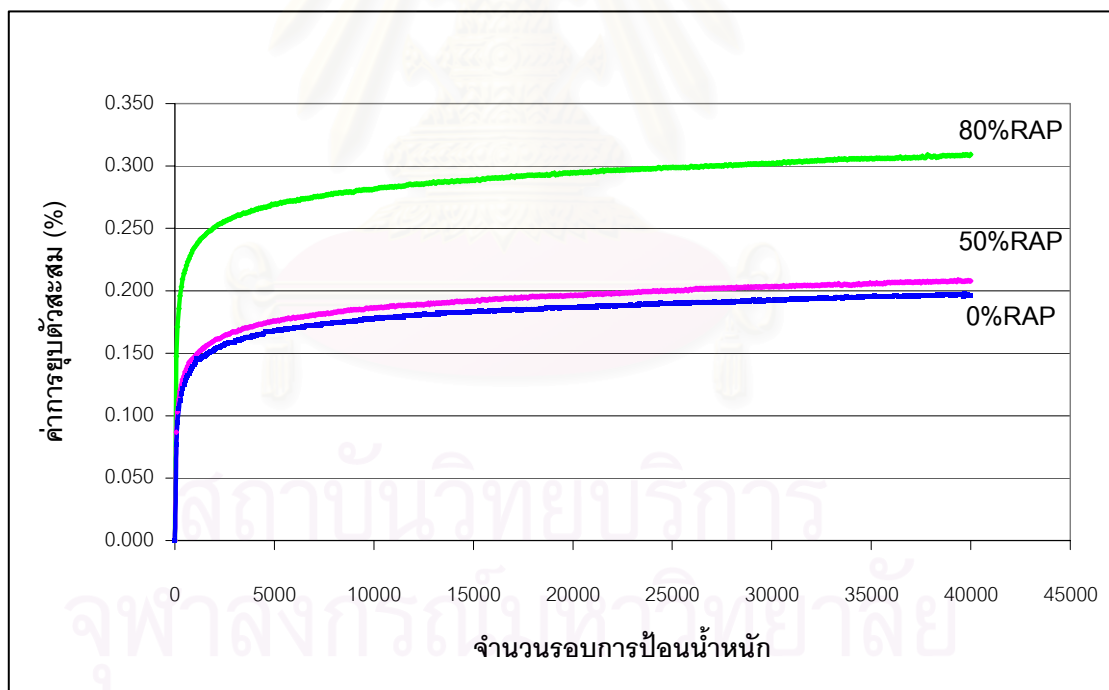
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการล้าของแต่ละส่วนผสม

ผลการทดสอบพบว่าส่วนผสม 80%RAP ให้ค่า  $\log(N_f)$  ต่ำที่สุดแสดงถึงมีความต้านทานต่อการล้าต่ำที่สุดซึ่งน่าที่จะเป็นผลจากคุณภาพวัสดุเก่าที่ผสมอยู่ รวมถึงปริมาณแอสฟัลต์ที่มีจำนวนน้อยในส่วนผสม ทำให้ส่วนผสมขาดความยืดหยุ่น โอกาสที่ส่วนผสมจะเสียหายเนื่องจากการล้าจึงเป็นไปได้ง่าย ในขณะที่ทั้งส่วนผสม 50%RAP และ 0%RAP ให้ค่าความต้านทานต่อการล้าที่สูงใกล้เคียงกัน จะเห็นว่าแม้จะมีการผสมวัสดุชั้นทางเก่า(RAP) ในส่วนผสมถึง 50% แต่ความสามารถในการต้านทานต่อการล้าของส่วนผสม ก็มีได้แตกต่างจากการใช้วัสดุมวลรวมใหม่ทั้งหมดแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามหากผสมวัสดุเก่ามากเกินไปในการทดสอบคือมากถึง 80% จะพบว่าส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อการล้าอย่างชัดเจน

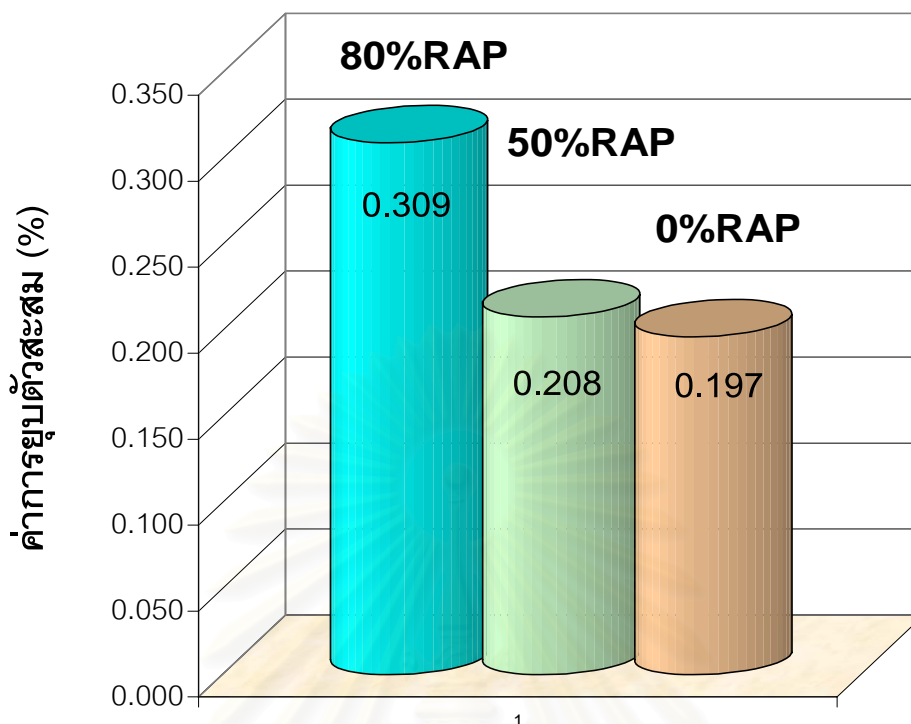
#### 4.5.4 ความต้านทานต่อการยวบยถาวร (Permanent Deformation)

เป็นการศึกษาถึงสมรรถนะในการต้านทานการยวบยถาวรของส่วนผสมโพนแอสฟัลต์โดยใช้การทดสอบแบบ Dynamic Creep Test การทดสอบจะทำการป้อนน้ำหนักตามแนวแกนในลักษณะกระทำซ้ำขนาด 200 kPa ด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที แบ่งเป็นช่วงเวลาในการป้อนน้ำหนัก 0.5 วินาที และช่วงเวลาพัก 1.5 วินาที ในสภาพอุณหภูมิที่ 50°C สมรรถนะของส่วนผสมจะพิจารณาจากค่าความเครียดสะสม (Accumulated Strain) หรือค่าการยวบยถาวรในแต่ละจำนวนครั้งที่ป้อนน้ำหนัก (Number of Pulses)

เนื่องจากส่วนผสมโพนแอสฟัลต์ที่ทำการทดสอบค่าความเครียดสะสม หรือค่าการยวบยถาวรมีค่าการยวบยถาวรน้อย ทำให้ต้องใช้เวลาในการทดสอบจนกระทั่งส่วนผสมมีค่าการยวบยถาวรเท่ากับ 1% ดังนั้นจึงอ้างอิงตามมาตรฐานออสเตรเลีย AS 2891.12.1-1995 กำหนดให้ดำเนินการทดสอบจนถึง 40,000 รอบ ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.19 ค่าการยวบยถาวรสะสมในแต่ละจำนวนรอบของการป้อนน้ำหนัก



รูปที่ 4.20 ค่าการยวบตัวสะสมที่จำนวนรอบการป้อนน้ำหนัก 40,000 รอบ

ผลการทดสอบพบว่าที่รอบการป้อนน้ำหนัเท่ากับ 40,000 รอบ ส่วนผสม 80%RAP เกิดค่าการยวบตัวสะสมมากที่สุด แสดงถึงส่วนผสมนี้มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้มากที่สุด ขณะที่ส่วนผสม 0%RAP เกิดค่าการยวบตัวสะสมน้อยที่สุด ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ส่วนผสมที่มีปริมาณวัสดุเก่าผสมอยู่มาก เมื่อถูกน้ำหนักกระทำซ้ำเป็นระยะเวลาหลายๆ จะทำให้ความต้านทานต่อการยวบตัวลดลงซึ่งน่าจะขึ้นอยู่กับคุณภาพวัสดุที่ส่งผลถึงเสถียรภาพของส่วนผสมเป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าส่วนผสม 50%RAP สามารถให้ค่าความต้านทานต่อการยวบตัวที่ไม่แตกต่างจากส่วนผสม 0%RAP มากนัก

## บทที่ 5

### ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ข้อสรุป

การนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็น (Cold Recycling) เป็นวิธีการที่สามารถนำวัสดุเก่ามาปรับปรุงสภาพเพื่อนำกลับไปใช้งานใหม่โดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่วัสดุมวลรวมในระหว่างการผสม ข้อดีของวิธีการนี้คือ

1. ช่วยประหยัดวัสดุงานทางใหม่และสถานที่ทิ้งวัสดุเก่า
2. ช่วยรักษาระดับผิวทางและความกว้างของถนนให้คงสภาพเดิมมากที่สุด เนื่องจากความหนาของชั้นทางใหม่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
3. ช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ให้ความร้อนแก่วัสดุ
4. ช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

วิธีการนี้ใช้ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันเป็นสารปรับปรุงสภาพวัสดุเก่า แต่จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงเกินไปจะทำให้ชั้นทางมีความเปราะสูง หรือทำให้ความยืดหยุ่นของชั้นทางลดลง ขณะที่การใช้แอสฟัลต์อิมัลชันจะต้องให้ความชื้นแก่วัสดุมวลรวมในปริมาณที่สูงเพื่อช่วยในการผสมให้เข้ากัน ความชื้นสูงในส่วนผสมทำให้เกิดปัญหาในการบดอัดเนื่องจากข้อจำกัดและปัญหาที่เกิดขึ้น จึงได้มีการพัฒนาการใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์ในรูปแบบใหม่ขึ้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานผสมเย็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โฟมแอสฟัลต์ (Foamed Asphalt) ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถกระจายตัวเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่มีสภาพชื้นและเย็นได้ดี

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการนำโฟมแอสฟัลต์มาปรับปรุงคุณภาพของวัสดุชั้นทางเก่าเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ในประเทศไทย โดยทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุชั้นทางเก่าในปริมาณที่แตกต่างกันโดยกำหนดอัตราส่วนจาก 80%, 50% และ 0% มาผสมเข้ากับวัสดุมวลรวมใหม่

วิธีดำเนินการศึกษาเริ่มจากการเตรียมวัสดุมวลรวมทั้งสามสัดส่วนซึ่งต้องปรับขนาดละเอียดให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม จากนั้นจึงทดสอบหาโฟมแอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุด โฟมแอสฟัลต์ที่ได้จะนำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสมเพื่อทราบถึงปริมาณโฟมแอสฟัลต์ที่ต้องการของแต่ละส่วนผสม ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ซึ่งมีปริมาณโฟมแอสฟัลต์ตามผลการออกแบบจะได้รับการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัว ความต้านทานต่อการล้าและความต้านทานต่อการยุบตัวถาวรเป็นขั้นตอนสุดท้าย ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. โฟมแอสฟัลต์เป็นกระบวนการพัฒนาการใช้งานแอสฟัลต์ซีเมนต์ในรูปแบบใหม่ กระทำได้โดยการฉีดแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อนอุณหภูมิ 160-200 °C และน้ำปริมาณ 2.0-2.5% เข้าไปผสมกัน น้ำเมื่อกระทบกับความร้อนจะระเหยเป็นไออย่างรวดเร็ว ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะแทรกอยู่ในเนื้อแอสฟัลต์ ทำให้แอสฟัลต์มีปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะฟองโฟมแต่จะทำให้ความหนืดของแอสฟัลต์จะลดลง แอสฟัลต์ในรูปโฟมจะมีความสามารถในการกระจายตัวเข้าไปผสมกับวัสดุมวลรวมที่มีสภาพชื้นและเย็นได้ดี
2. การศึกษานี้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC60/70 เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ ผลการทดสอบพบว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์อุณหภูมิ 170 °C และปริมาณน้ำ 2.5% ทำให้เกิดโฟมแอสฟัลต์ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด คือ มีค่าการขยายตัวเท่ากับ 14 เท่า และค่าครึ่งชีวิตเท่ากับ 11.7 วินาที
3. แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด AC60/70 ซึ่งใช้งานอยู่ทั่วไปในประเทศไทยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตโฟมแอสฟัลต์ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ ในขณะที่การผสมระหว่างวัสดุชั้นทางเก่าและวัสดุมวลรวมใหม่สามารถปรับขนาดละเอียดให้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับนำไปผสมกับโฟมแอสฟัลต์ได้
4. เนื่องจากส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีปริมาณแอสฟัลต์ผสมอยู่จำนวนไม่มากนัก จึงทำให้ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์มีความทนทานต่อความเสียหายจากความชื้นต่ำ ดังนั้นจึงผสมปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เข้าไป 1% ของน้ำหนักมวลรวม ทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานต่อความชื้น (Moisture Resistance) ให้แก่ส่วนผสม



5. ผลการออกแบบส่วนผสมพบว่าส่วนผสมที่มีวัสดุชั้นทางเก่า (RAP) ในสัดส่วน 80%, 50% และ 0% ต้องการปริมาณโพลีแอสฟัลต์เท่ากับ 2.1%, 2.6% และ 3.4% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่มีวัสดุเก่ามากต้องการปริมาณโพลีแอสฟัลต์ในปริมาณที่น้อย ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุเก่ามีแอสฟัลต์เก่าผสมอยู่ทำให้การดูดซึมแอสฟัลต์ใหม่ของวัสดุรวมรวมทำได้น้อยลง
6. ถึงแม้จะพบว่า ส่วนผสมที่มีวัสดุเก่าผสมอยู่มากจะมีความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมต่ำ แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ส่วนผสมที่มีวัสดุเก่าผสมอยู่มากจะมีอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมในสภาพที่ผ่านการแช่น้ำต่อสภาพไม่แช่น้ำสูง (Retained Strength) หรือมีอัตราส่วนความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมหลังจากการแช่น้ำสูง แสดงถึงข้อดีของการใช้วัสดุชั้นทางเก่า
7. ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวสำหรับการศึกษาคั้งนี้ พบว่าส่วนผสม 50%RAP ให้ค่าสูงที่สุดในทุกช่วงของอุณหภูมิ
8. แม้ว่าค่าโมดูลัสคืนตัวของส่วนผสมโพลีแอสฟัลต์จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก็ตาม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อน แสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมโพลีแอสฟัลต์มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ (Temperature Susceptibility) น้อยกว่าอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมโพลีแอสฟัลต์ประกอบด้วยปริมาณแอสฟัลต์ในจำนวนต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนทำให้อุณหภูมิซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์โดยตรง มีผลกระทบต่อส่วนผสมโพลีแอสฟัลต์ได้น้อยกว่า นอกจากนี้ด้วยเหตุที่โพลีแอสฟัลต์ไม่ได้เคลือบกับมวลรวมที่มีขนาดใหญ่โดยตรง ทำให้อุณหภูมิส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมได้น้อยกว่า
9. ผลการทดสอบความต้านทานต่อการล้าและการยุบตัวถาวรซึ่งเป็นค่าบ่งชี้สมรรถนะในการใช้งานจริงของส่วนผสม พบว่าส่วนผสม 80%RAP ให้ค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุด แสดงถึงมีโอกาสเกิดความเสียหายในการใช้งานได้มากที่สุด ขณะที่ทั้งส่วนผสม 50%RAP และ 0%RAP ให้ค่าความต้านทานที่สูงใกล้เคียงกัน

10. จากผลการศึกษาที่ได้ แสดงให้เห็นว่า การผสมวัสดุชั้นทางเก่า (RAP) ลงในส่วนผสมนั้นสามารถทำได้ถึงอัตราส่วน 50% โดยที่ความสามารถในการต้านทานต่อการล้าและการยุบตัวของส่วนผสมไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก นอกจากนี้ส่วนผสมนี้ยังสามารถช่วยลดราคาค่าวัสดุ (แอสฟัลต์และวัสดุมวลรวมใหม่) ลงประมาณ 34% ในขณะที่การผสมวัสดุชั้นทางเก่าถึง 80% จะมีราคาค่าวัสดุลดลง 55% แต่จะทำให้ต้านทานต่อการล้าและการยุบตัวลดลงกว่า 40% ดังแสดงในตารางที่ ง-7

สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่โดยวิธีการผสมเย็นเพื่อปรับปรุงบรูณะทางหลวงในหลายเส้นทางมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2537 โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 4% ผสมเป็นสารปรับปรุงสภาพวัสดุชั้นทางเก่า โดยทั่วไปความหนาของชั้นทางที่บรูณะปรับปรุงจะอยู่ที่ประมาณ 20 ซม.

สำหรับการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันพบปัญหาในระหว่างการก่อสร้างคือ ต้องการความชื้นให้แก่วัสดุมวลรวมในปริมาณที่สูงเพื่อช่วยในการผสมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ความชื้นสูงในส่วนผสมทำให้เกิดปัญหาในการบดอัด ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้ในประเทศไทย

การนำวัสดุชั้นทางเก่ากลับมาใช้งานใหม่โดยใช้โฟมแอสฟัลต์ เป็นวิธีการที่หลายประเทศนำไปพัฒนาและใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งประเทศในแถบยุโรป อเมริกา และออสเตรเลีย รวมถึงในเอเชีย เช่น มาเลเซีย และไต้หวัน เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีและข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแอสฟัลต์อิมัลชันในหลายประการดังนี้

- 1) โฟมแอสฟัลต์ทำให้ชั้นทางมีความยืดหยุ่นและความต้านทานต่อการล้าได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์
- 2) โฟมแอสฟัลต์สามารถนำไปใช้กับวัสดุได้หลายประเภท ได้แก่ กรวด หินคลุกทราย ลูกกรงหรือกระเบื้องทรายปนดินเหนียว ในขณะที่ปูนซีเมนต์ไม่เหมาะสมกับวัสดุมวลรวมเม็ดละเอียด เนื่องจากต้องใช้ในปริมาณสูงเพื่อให้ได้กำลังสูง
- 3) ภายหลังจากการบดอัดสามารถเปิดการจราจรได้ทันที ในขณะที่ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันต้องการเวลาในการบ่มเพื่อพัฒนากำลัง
- 4) ชั้นทางโฟมแอสฟัลต์ใช้แอสฟัลต์จำนวนน้อยเป็นส่วนผสม ดังนั้นจึงประหยัดค่าแอสฟัลต์และค่าขนส่ง

- 5) โฟมแอสฟัลต์ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรดมาตรฐานในการผลิตและกระบวนการผลิตซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์อิมัลชันที่ต้องทำภายในโรงงานที่ควบคุมคุณภาพสูงและยังต้องผสมสารอิมัลซิไฟร์ที่มีราคาสูง
- 6) การก่อสร้างสามารถกระทำภายใต้สภาพฝนตกเล็กน้อยได้ โดยแอสฟัลต์ไม่หลุดออกจากวัสดุมวลรวม ในขณะที่การใช้ปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันไม่สามารถกระทำได้
- 7) ส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์สามารถเก็บไว้ได้นานก่อนการบดอัดโดยปราศจากการแยกตัวของแอสฟัลต์โดยการควบคุมความชื้นของส่วนผสมไม่ให้ระเหยอย่างรวดเร็ว ต่างจากการใช้ปูนซีเมนต์ต้องบดอัดให้แล้วเสร็จใน 2 ชั่วโมงนับตั้งแต่การผสมเริ่มขึ้น

การใช้โฟมแอสฟัลต์มีข้อดีหลายประการดังที่กล่าวมาแล้ว แต่เนื่องจากวิธีการนี้ต้องการเครื่องจักรที่ผลิตขึ้นเฉพาะเพื่อการผลิตโฟมแอสฟัลต์ ดังนั้นราคาเครื่องจักรนำเข้าในประเทศไทยจึงยังมีราคาสูง โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้อยู่ในประเทศไทย พบว่าราคาเครื่องจักรในการใช้ปูนซีเมนต์จะอยู่ที่ 200-250 บาทต่อตารางเมตร (ข้อมูลจากสำนักบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง, 2545) ในขณะที่การใช้โฟมแอสฟัลต์จะมีราคาเครื่องจักรที่สูงกว่า ทั้งนี้จากราคาเครื่องจักรที่สูงกว่าประมาณ 5 ล้านบาท และราคาแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่มีราคาประมาณ 7,500 บาทต่อตัน สูงกว่าปูนซีเมนต์ที่มีราคา 2,100-2,300 บาทต่อตัน เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันดิบซึ่งส่วนใหญ่จะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ขณะที่ปูนซีเมนต์สามารถผลิตได้เองในประเทศจึงมีราคาต่ำกว่า

แต่อย่างไรก็ตาม จากราคาค่างานโดยประมาณในประเทศแอฟริกาใต้ซึ่งเป็นประเทศที่มีการพัฒนาและใช้งานโฟมแอสฟัลต์อย่างแพร่หลาย ดังตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าราคาค่างานในการใช้โฟมแอสฟัลต์มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากชั้นทางที่ผสมโฟมแอสฟัลต์จะต้องการความหนาชั้นทางน้อยกว่าการใช้ปูนซีเมนต์ และต้องการแอสฟัลต์ผสมในปริมาณน้อย (2%-4%) ดังนั้นในระยะยาวและหากมีการก่อสร้างในปริมาณมากๆ ในประเทศไทย จะสามารถทำให้ราคาค่างานในการใช้โฟมแอสฟัลต์ลดลงใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ได้

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบราคาโดยประมาณของการบูรณะบำรุงทางวิธีต่างๆ

ที่มา : Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

Option	Cost per m <sup>2</sup> (US\$)
1.Reconstruction	30.12
2.Overlay	20.40
3.Cold Recycling	
■ Cement	18.86
■ Asphalt emulsion with cement	12.07
■ Foamed asphalt with cement	10.72

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1.เนื่องส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ประกอบด้วยปริมาณแอสฟัลต์ที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นความแข็งแรงของส่วนผสมจึงขึ้นอยู่กับชนิดล้อยกันของเม็ดมวลรวมเป็นสำคัญ ดังนั้นขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาและทำการศึกษาคู่ต่อเพื่อให้สามารถทราบถึงขนาดคละที่เหมาะสมที่สุดสำหรับวัสดุในประเทศ

2.จากการศึกษาที่ผ่านมาบ่งชี้ว่า โฟมแอสฟัลต์สามารถนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพวัสดุงานทางได้หลายประเภท ดังนั้นในกรณีพื้นที่ที่ขาดวัสดุมวลรวมประเภทหินปูนหรือมีวัสดุมวลรวมที่มีคุณภาพต่ำ การนำเอาวัสดุงานทางประเภทอื่นๆ เช่น ททราย ดินลูกรัง มาปรับปรุงคุณภาพด้วยโฟมแอสฟัลต์ จึงควรได้รับการพิจารณาและทำการศึกษาเพื่อเป็นการนำวัสดุท้องถิ่นในประเทศมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

3.การศึกษานี้เน้นศึกษาเฉพาะความเหมาะสมในการใช้งานโฟมแอสฟัลต์ทางด้านวิศวกรรมเป็นหลัก แต่ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์เป็นอีกด้านหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาและทำการศึกษาคู่ไป ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมของการนำโฟมแอสฟัลต์มาใช้งานสำหรับประเทศไทยในทุกด้าน

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กระทรวงคมนาคม. กรมทางหลวง, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง. 2545. คู่มือทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยเครื่องมือ UTM-5P. สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

กระทรวงคมนาคม. กรมทางหลวง. 2545 รายงานประจำปีกรมทางหลวง 2541-2545. กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.

ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์ และมีฤกษ์ พัชร. 2544. การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตเก่าโดยใช้ปูนซีเมนต์. สัมมนาวิศวกรรมกรรมทาง ครั้งที่ 1, หน้า 173-192. 16-17 กรกฎาคม 2544. กรุงเทพมหานคร.

สมเกียรติ เตรียมแจ้งอรุณ. 2527. วิธีการปรับสภาพวัสดุจราจรแอสฟัลติกคอนกรีตเก่ามาใช้งานใหม่ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

### ภาษาต่างประเทศ

Akeroyd, F.M.L. 1989. Advances in Foamed Bitumen Technology. Fifth Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA' 89) held in Swaziland 5-9 June 1989 Section 8: 1-4

Asphalt Academy. 2002. Interim Technical Guideline: The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials. First edition. Southern Africa: Asphalt Academy

Bergeron. 1992. Researd Perspective In-situ Recycling and Rehabilitation. Internal Seminar. Division of Road and Materials. Ministry of Transportation. Quebec. Canada.

Bowering, R.H. 1970. Properties and Behaviour of Foamed Bitumen mixtures for Road Building. The Fifth Australian Road Research Board Conference held in Canberra Australian: 453-477.

- Chiu, C.t., Huang, M.Y. and Lu, L.C. 2002. A Study on the Application of Foamed Asphalt in Taiwan. Department of Civil Engineering Chung Hua University Taiwan.
- Kendall, M., Baker, B., Evans, P. and Ramanujam, J. 2000. Foamed Bitumen Stabilisation[Online]. Available from: <http://www.auststab.com.au/tp26.pdf> [2003, August 7]
- Koender, B.G., Stoker, D.A., Robertus, C., Larsen, O., and Johansen, J. 2002. WAM-Foam, asphalt production at low operating temperatures. The Ninth International Conference on Asphalt Pavement (2002).
- Maccarrone, S., Holleran, G., Leonard, D.J. and Hey, S. 1994. Pavement Recycling using Foamed Bitumen. 17<sup>th</sup> ARRB Conference held in Gold Coast Queensland Volume 17 Part 3: 349-365.
- Maccarrone, S., Holleran, G., and Ky, A. 1995. Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hotmix. 9<sup>th</sup> AAPA International Asphalt Conference.
- Ministry of Transport and Communication. Department of Highways.2001. Pavement Technology Project: Technical Report No.7 Based on Pavement Performance and Elastic Modulus Evaluation. Department of Highways. Ministry of Transport and Communication. Thailand
- Muthen, K.M. 1999. Foamed Asphalt Mixes: Mix Design Procedure[Online]. Available from: <http://www.asphalt.csir.co.za/foamasph/foamasph.pdf>[2003, August 7]
- Nataatmadja, A. 2002. Foamed Bitumen Mix: soil or asphalt?. The Ninth International Conference on Asphalt Pavement (2002).
- Ramanujam, J.M. and Fernando, D.P. 1997. Foamed Bitumen Trial at Gladfield – Cunningham Highway. Proceedings of the Southern Region Symposium. 20-22 November Australia.
- Ramanujam, J.M. and Jones, J.D. 2000. Characterization of Foamed Bitumen Stabilisation. <http://www.auststab.com.au/tp27.pdf>
- Robert, F.L., Engelbrecht, J.C. and Kennedy, T.W. 1984. Evaluation of Recycled Mixtures Using Foamed Asphalt. Transportation Research Record Vol.968 : 78-85

- Ruckel, P.J., Kole, L.L., Zator, R.E., Button, J.W. and Epps, J.A. 1982. Foamix Asphalt Advances. Asphalt Pavement Construction: New Materials and Techniques. Philadelphia. PA: American Society for Testing and Materials (ASTM STP; 724): 93-109.
- Ruckel, P.J., Acott, S.M., and Bowering, R.H. 1983. Foamed-Asphalt Paving Mixture: Preparation of Design Mixture and Treatment Test Specimens. Transportation Research Record Vol.911: 88-95.
- Wijk, A.V. and Wood, L.e. 1983. Use of Foamed Asphalt in Recycling of an Asphalt Pavement. Transportation Research Record Vol.911: 96-103.
- Wirtgen Group. 2001. Future-Orientated Technologies. Edition: March 2001. Germany
- Wirtgen Group. 2001. Wirtgen Cold Recycling Manual. 2<sup>nd</sup> revised issue September 2001. Germany.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





## ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดสอบหาคุณลักษณะของโพลีแอสฟัลต์ที่เหมาะสม  
เพื่อนำไปออกแบบสวนผสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก-1 เครื่องมือสำหรับผลิตโฟมแอสฟัลต์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ ก-2 อุปกรณ์สำหรับใช้วัด  
ค่าการขยายตัว และค่าครึ่งชีวิต  
ของโฟมแอสฟัลต์



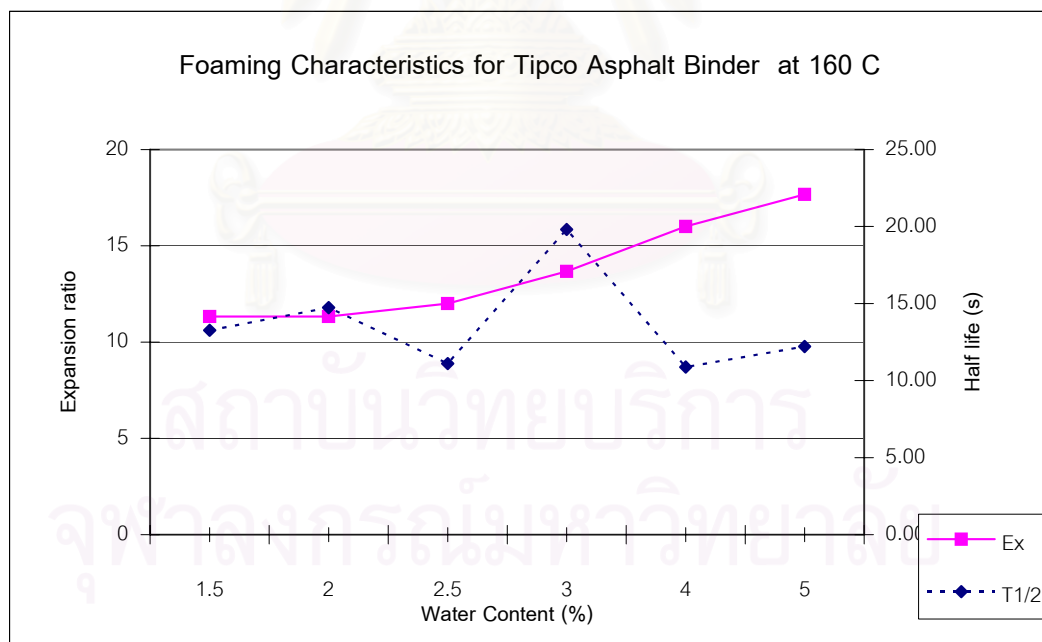
รูปที่ ก-3 การวัดค่าการขยายตัว และค่าครึ่งชีวิต  
ของโฟมแอสฟัลต์

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบคุณลักษณะของโฟแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 160 °C

Foaming Characteristic

Tester : Worapat Ketnoot	Date : 23/1/2003	Injection time : 4.81 sec
Bitumen Type : AC 60-70	Water Pressure : 5 bar	Air Pressure : 4 bar
Pressure ; 5 bar		
Temperature ; 160 °C		
Flow-through : 104 g/sec		

Water content %	Flow-through (L/h)	#1		#2		#3		Average Value	
		Ex	T <sub>1/2</sub>	Ex	T <sub>1/3</sub>	Ex	T <sub>1/4</sub>	Ex	T <sub>1/2</sub>
1.5	5.62	11	13.38	11	12.84	12	13.57	11	13.26
2	7.49	11	14.47	11	12.69	12	17.06	11	14.74
2.5	9.36	12	10.62	12	11.6	***	***	12	11.11
3	11.23	13	20.31	14	19.87	14	19.25	14	19.81
4	14.98	16	12.56	16	9.53	16	10.56	16	10.88
5	18.72	17	10.13	18	12.32	18	14.19	18	12.21



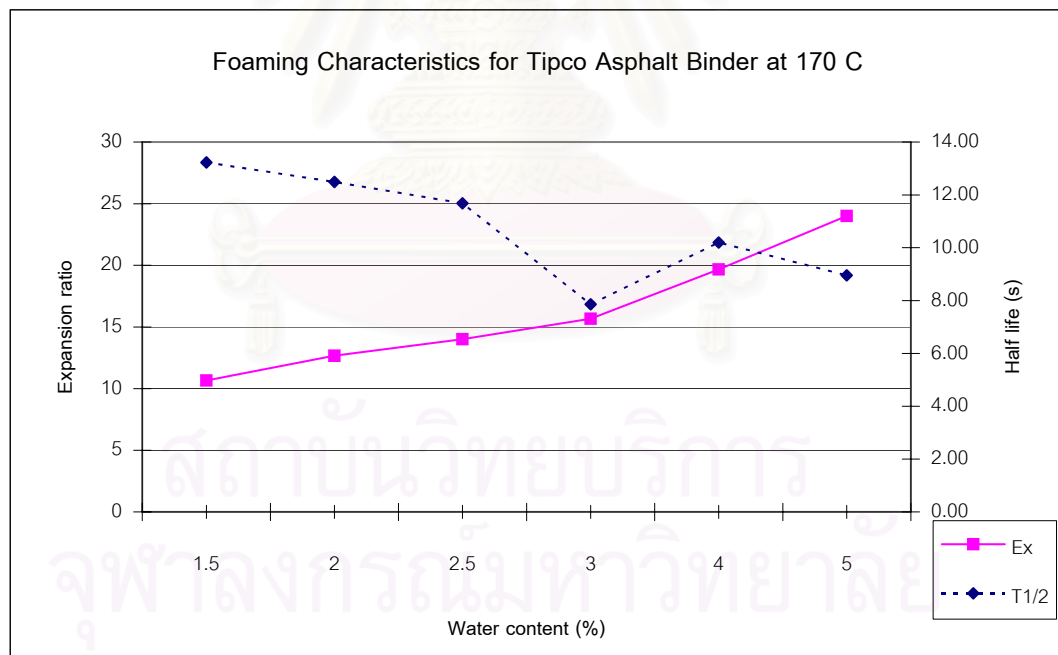
รูปที่ ก-4 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 160 °C

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบคุณลักษณะของโฟแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 170 °C

Foaming Characteristic

Tester : Worapat Ketnoot	Date : 24/1/2003	Injection time : 4.81 sec
Bitumen Type : AC 60-70	Water Pressure : 5 bar	Air Pressure : 4 bar
Pressure ; 5 bar		
Temperature ; 170 °C		
Flow-through : 104 g/sec		

Water content %	Flow-through (L/h)	#1		#2		#3		Average Value	
		Ex	T <sub>1/2</sub>	Ex	T <sub>1/3</sub>	Ex	T <sub>1/4</sub>	Ex	T <sub>1/2</sub>
1.5	5.62	10	12.47	11	14.06	11	13.15	11	13.23
2	7.49	12	12.59	13	12.88	13	11.99	13	12.49
2.5	9.36	14	11.43	14	11.93	***	***	14	11.68
3	11.23	15	7.87	17	7.37	15	8.34	16	7.86
4	14.98	18	9.22	21	10.94	20	10.43	20	10.20
5	18.72	24	6.63	24	11.59	24	8.63	24	8.95



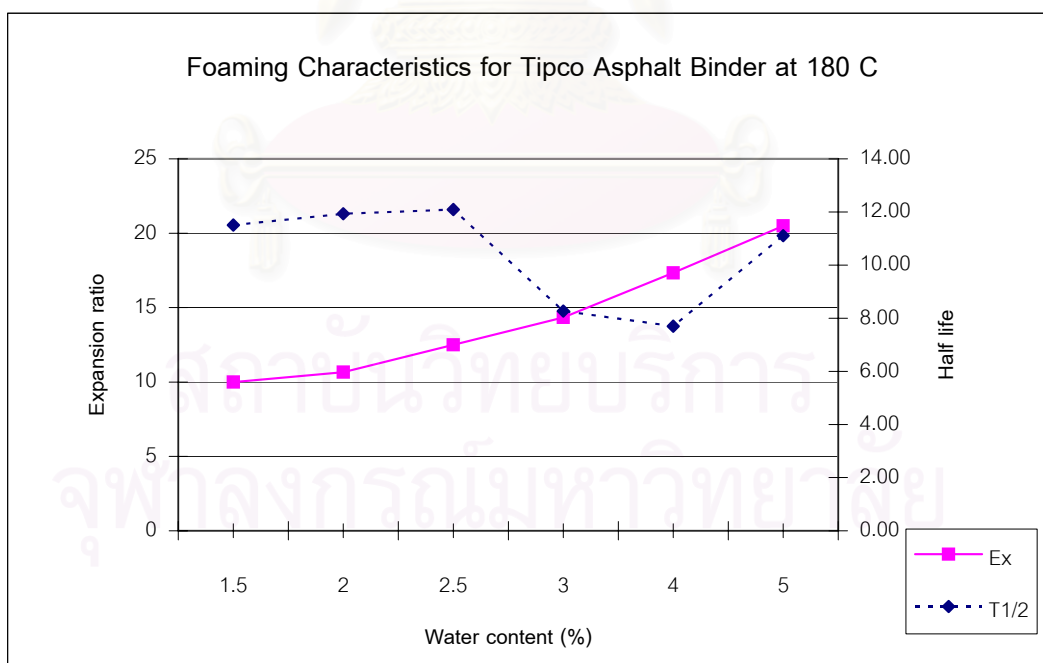
รูปที่ ก-5 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 170 °C

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบคุณลักษณะของโฟแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 180 °C

Foaming Characteristic

Tester : Worapat Ketnoot	Date : 29/1/2003	Injection time : 4.81 sec
Bitumen Type : AC 60-70	Water Pressure : 5 bar	Air Pressure : 4 bar
Pressure ; 5 bar		
Temperature ; 180 °C		
Flow-through : 104 g/sec		

Water content %	Flow-through (L/h)	#1		#2		#3		Average Value	
		Ex	T <sub>1/2</sub>	Ex	T <sub>1/3</sub>	Ex	T <sub>1/4</sub>	Ex	T <sub>1/2</sub>
1.5	5.62	10	12.47	10	11.96	10	10.09	10	11.51
2	7.49	11	11.44	11	12.66	10	11.69	11	11.93
2.5	9.36	13	12.41	12	11.78	***	***	13	12.10
3	11.23	14	7.35	14	8.44	15	9.03	14	8.27
4	14.98	18	7.29	17	7.78	17	8.03	17	7.70
5	18.72	20	10.54	21	11.68	***	***	21	11.11



รูปที่ ก-6 ค่าการขยายตัวและค่าครึ่งชีวิตที่อุณหภูมิ 180 °C



ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดสอบวัสดุมวลรวม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์เก่าในวัสดุชั้นทางเดิม

Binder content of RAP	1	2	3
Wt.bowl + filter ring (g)	408.0	407.8	408.2
Wt.bowl + filter ring + sample (g)	1629.5	1639.3	1637.1
Wt. sample (g)..... $W_1$	1221.5	1231.5	1228.9
Wt.bowl + filter ring + extracted aggregate (g)	1604.1	1612.8	1611.5
Wt.extracted aggregate (g)..... $W_2$	1196.1	1205.0	1203.3
Wt.ash in extract (g)..... $W_3$	3.5	4.0	3.8
Binder content by wt.aggregate (%) $100(W_1 - W_2 - W_3) / (W_2 + W_3)$	1.83	1.86	1.81
Binder content by correction (%)	2.06	2.09	2.04
	2.06		

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-1 ชุดเครื่องมือสำหรับการหาปริมาณแอสฟัลต์เก่าในวัสดุชั้นทางเดิม



ตารางที่ ข-2 ขนาดคละของวัสดุรวมสำหรับส่วนผสม 80%RAP

ขนาด ตะแกรง (เบอร์)	ขนาด ตะแกรง (มม.)	ปริมาณที่ผ่านตะแกรง (%)				
		RAP	หินฝุ่น	ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์	ส่วนผสม1 (80%RAP)	*ขนาดคละ ที่แนะนำ
1 1/2" inch	37.5	100.0		100	100.0	83-100
1" inch	25.0	96.0		100	96.8	76-100
3/4" inch	19.0	92.9		100	94.3	70-94
1/2" inch	12.5	84.9		100	87.9	62-86
3/8" inch	9.5	76.5		100	81.2	57-81
No.4	4.75	55.8	100	100	64.7	45-68
No.8	2.36	36.1	79.8	100	45.0	35-57
No.16	1.18	22.8	54.6	100	29.6	26-47
No.30	0.60	14.9	37.8	100	20.1	19-39
No.50	0.30	9.1	26.3	100	13.3	12-31
No.100	0.15	6.0	18.8	100	9.4	8-25
No.200	0.075	4.6	14.2	100	7.3	5-20
สัดส่วนผสม (%)		80	19	1	100	

\*Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ขนาดคละของวัสดุรวมสำหรับส่วนผสม 50%RAP

ขนาด ตะแกรง (เบอร์)	ปริมาณที่ผ่านตะแกรง (%)					
	RAP	หินฝุ่น	nominal size 3/4"	ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์	ส่วนผสม 2 (50%RAP)	*ขนาดคละ ที่แนะนำ
1 1/2 " inch	100.0			100	100.0	83-100
1" inch	96.0			100	98.0	76-100
3/4" inch	92.9		100	100	96.5	70-94
1/2" inch	84.9		56.7	100	84.2	62-86
3/8" inch	76.5		21.2	100	73.3	57-81
No.4	55.8	100	0.3	100	59.0	45-68
No.8	36.1	79.8		100	43.0	35-57
No.16	22.8	54.6		100	28.8	26-47
No.30	14.9	37.8		100	19.8	19-39
No.50	9.1	26.3		100	13.4	12-31
No.100	6.0	18.8		100	9.6	8-25
No.200	4.6	14.2		100	7.5	5-20
สัดส่วน ผสม (%)	50	30	19	1	100	

\*Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-4 ขนาดคละของวัสดุรวมสำหรับส่วนผสม 0%RAP

ขนาด ตะแกรง (เบอร์)	ปริมาณที่ผ่านตะแกรง (%)						
	หิน ฝุ่น	nominal size 3/8"	nominal size 3/4"	nominal size 1 1/2"	ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์	ส่วนผสม3 (0%RAP)	*ขนาดคละ ที่แนะนำ
1 1/2" inch				100	100	100.0	83-100
1" inch				89.2	100	99.2	76-100
3/4" inch			100	34.6	100	92.2	70-94
1/2" inch			56.7	1.2	100	77.9	62-86
3/8" inch		100	21.2	0.3	100	70.3	57-81
No.4	100	24.2	0.3		100	54.7	45-68
No.8	79.8	0.7			100	41.0	35-57
No.16	54.6	0.6			100	28.4	26-47
No.30	37.8				100	19.9	19-39
No.50	26.3				100	14.1	12-31
No.100	18.8				100	10.4	8-25
No.200	14.2				100	8.1	5-20
สัดส่วน ผสม(%)	50	15	20	14	1	100	

\*Wirtgen Cold Recycling Manual (2001)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 80%RAP

การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน Modified Compaction Test
---

ส่วนผสม 1 (80% RAP)

Density	1	2	3	4
Wt. mold+soil (g)	11141	11377.1	11576.3	11536.5
Wt. mold (g)	6729	6729	6729	6729
Wt.soil (g)	4412	4648.1	4847.3	4807.5
Volume (cm <sup>3</sup> )	2084.73	2084.73	2084.73	2084.73
Wet density (cm <sup>3</sup> )	2.12	2.23	2.33	2.31
Dry Density (cm <sup>3</sup> )	2.068	2.134	2.186	2.134

Water content	1		2		3		4	
No. can	1B	1T	2B	2T	3B	3T	4B	4T
Wt.can (g)	36.61	35.16	35.14	36.44	35.52	36.89	36.65	36.19
Wt. can+wet (g)	179.01	176.77	172.33	177.69	178.88	177.46	198.13	202.71
Wt. can+dry (g)	175.57	173.77	166.46	171.66	170.25	169.04	186	190.3
wt.water (g)	3.44	3	5.87	6.03	8.63	8.42	12.13	12.41
Wt. dry soil (g)	138.96	138.61	131.32	135.22	134.73	132.15	149.35	154.11
Water content (%)	2.48	2.16	4.47	4.46	6.41	6.37	8.12	8.05
	2.32		4.46		6.39		8.09	

ตารางที่ ข- 6 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 50%RAP

การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน Modified Compaction Test
---

ส่วนผสม 2 (50% RAP)

Density	1	2	3	4
Wt. mold+soil (g)	11262.0	11489.9	11688.4	11618.1
Wt. mold (g)	6729.0	6729.0	6729.0	6729.0
Wt.soil (g)	4533.0	4760.9	4959.4	4889.1
Volume (cm <sup>3</sup> )	2084.7	2084.7	2084.7	2084.7
Wet density (cm <sup>3</sup> )	2.17	2.28	2.38	2.35
Dry Density (cm <sup>3</sup> )	2.126	2.188	2.247	2.174

Water content	1		2		3		4	
No. can	1B	1T	2B	2T	3B	3T	4B	4T
Wt.can (g)	36.64	36.19	36.47	35.09	36.43	37.01	36.69	36.45
Wt. can+wet (g)	173.39	182.23	180.27	179.31	208.86	210.90	227.35	229.18
Wt. can+dry (g)	170.48	178.86	173.75	173.74	199.57	200.98	215.78	212.80
wt.water (g)	2.91	3.37	6.52	5.57	9.29	9.92	11.57	16.38
Wt. dry soil (g)	133.84	142.67	137.28	138.65	163.14	163.97	179.09	176.35
Water content (%)	2.17	2.36	4.75	4.02	5.69	6.05	6.46	9.29
	2.27		4.38		5.87		7.87	

ตารางที่ ข-7 ผลการทดสอบหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสม 0%RAP

การบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน Modified Compaction Test
---

ส่วนผสม 3 (0% RAP)

Density	1	2	3	4
Wt. mold+soil (g)	11355.8	11604.2	11785.3	11718.1
Wt. mold (g)	6729	6729	6729	6729
Wt.soil (g)	4626.8	4875.2	5056.3	4989.1
Volume (cm <sup>3</sup> )	2084.73	2084.73	2084.73	2084.73
Wet density (cm <sup>3</sup> )	2.22	2.34	2.43	2.39
Dry Density (cm <sup>3</sup> )	2.163	2.239	2.271	2.210

Water content	1		2		3		4	
No. can	1B	1T	2B	2T	3B	3T	4B	4T
Wt.can (g)	36.64	35.11	36.52	35.1	36.46	37.02	36.52	37.21
Wt. can+wet (g)	148.77	140.57	170.66	157.25	216.57	203.13	214.76	227.08
Wt. can+dry (g)	145.87	137.91	164.58	152.39	205.18	192.54	203.75	209.77
wt.water (g)	2.9	2.66	6.08	4.86	11.39	10.59	11.01	17.31
Wt. dry soil (g)	109.23	102.8	128.06	117.29	168.72	155.52	167.23	172.56
Water content (%)	2.65	2.59	4.75	4.14	6.75	6.81	6.58	10.03
	2.62		4.45		6.78		8.31	



รูปที่ ข-2 การทดสอบหาความชื้นที่เหมาะสมสำหรับส่วนผสมโฟมแอสฟัลต์ (OMC Test)

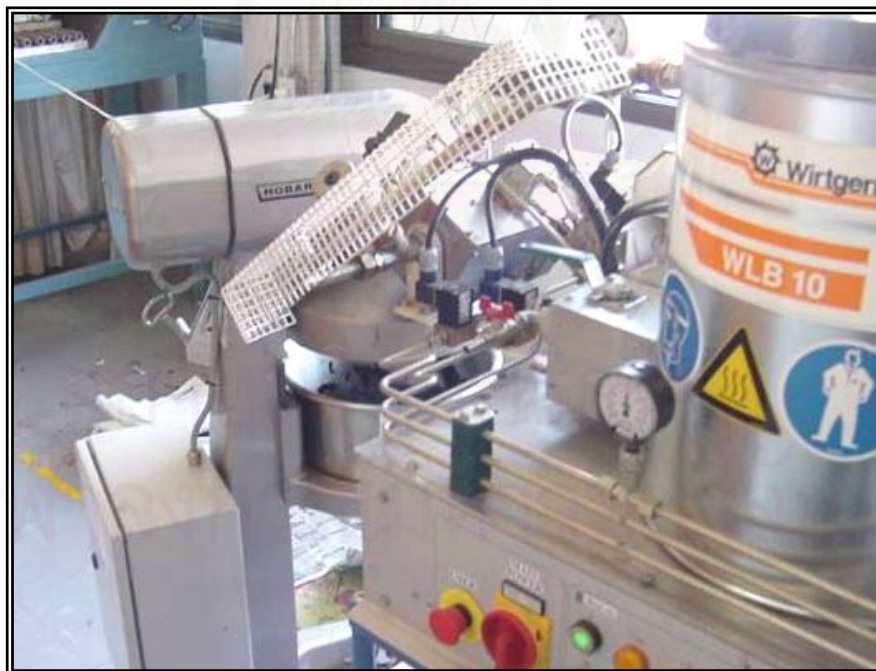


ภาคผนวก ค

ข้อมูลผลการออกแบบส่วนผสมโพลีเมแอสฟัลต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ ค-1 เครื่องผสมโสมแอสฟัลต์กับวัสดุมวลรวม (Mixer)



รูปที่ ค-2 การแช่ก้อนตัวอย่างในน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง  
ก่อนการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม



รูปที่ ค-3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม  
ในขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ ค-1 ผลการออกแบบส่วนผสม 80% RAP

Sample	wt.mold	wt.mold+mix	Wt.mix	Heigth (mm)					Diameter (mm)			Water content	Dry Density Kg/m <sup>3</sup>	Aver_Dens t/m <sup>3</sup>	Force (kN)	ITS (KPa)	Aver_ITS (KPa)	Retained ITS (%)
				#1	#2	#3	#4	Aver_H	#1	#2	Aver_D							
0-1	1338.5	2489.2	1150.7	59.8	61.0	61.1	60.3	60.6	101.57	101.42	101.5	5.23	2231	2.220	3.76	389	392	83
0-2	1340.1	2491.3	1151.2	60.1	61.4	61.5	60.4	60.9	101.57	101.48	101.5		**		5.31	**		
0-3	1349.3	2498.8	1149.5	61.1	60.9	61.2	60.8	61.0	101.54	101.41	101.5		2213		3.84	395		
0-4	1352.9	2502.9	1150.0	61.2	61.1	60.7	60.4	60.8	101.39	101.47	101.4		2222		3.01	310	324	
0-5	1343.4	2493.4	1150.0	61.1	60.7	61.0	60.9	60.9	101.46	101.42	101.4		2219		3.25	335		
0-6	1341.2	2491.8	1150.6	61.1	60.2	60.8	61.7	60.9	101.54	101.58	101.6		2214		3.17	326		
1-1	1342.5	2492.3	1149.8	59.3	59.9	60.8	60.2	60.1	101.5	101.5	101.5	4.88	2247	2.227	4.12	430	405	84
1-2	1344.6	2493.7	1149.1	61.6	59.8	60.0	62.1	60.9	101.5	101.5	101.5		2216		3.76	387		
1-3	1350.6	2498.1	1147.5	59.4	60.7	62.2	60.8	60.8	101.4	101.4	101.4		2219		3.84	396		
1-4	1339.7	2490.3	1150.6	62.3	58.9	59.3	62.5	60.7	101.4	101.5	101.5		2226		3.15	325	341	
1-5	1354.1	2501.6	1147.5	60.8	60.1	61.2	61.4	60.9	101.5	101.5	101.5		**		4.05	**		
1-6	1341.3	2488.5	1147.2	61.0	60.0	60.2	61.1	60.6	101.4	101.5	101.4		2225		3.44	356		
2-1	1336.2	2485.9	1149.7	62.3	62.4	60.9	60.7	61.6	101.6	101.5	101.5	4.77	2200	2.181	4.79	488	481	82
2-2	1355.9	2507.1	1151.2	60.8	61.6	63.8	62.5	62.2	101.5	101.5	101.5		2182		4.70	474		
2-3	1326.1	2475.6	1149.5	60.4	61.3	62.0	61.5	61.3	101.5	101.5	101.5				4.97	**		
2-4	1349.3	2498.7	1149.4	62.9	64.1	61.1	60.3	62.1	101.6	101.5	101.5		2182		3.75	379	392	
2-5	1357.9	2508.8	1150.9	63.1	64.4	62.5	60.4	62.6	101.5	101.5	101.5		2170		4.11	412		
2-6	1302.6	2450.1	1147.5	62.5	63.6	62.7	60.4	62.3	101.5	101.5	101.5		2173		3.84	387		

ตารางที่ ค-1 ผลการออกแบบส่วนผสม 80% RAP (ต่อ)

Sample	wt.mold	wt.mold+mix	Wt.mix	Height (mm)					Diameter (mm)			Water content	Dry Density Kg/m <sup>3</sup>	Aver_Dens t/m <sup>3</sup>	Force (kN)	ITS (KPa)	Aver_ITS (KPa)	Retained ITS (%)
				#1	#2	#3	#4	Aver_H	#1	#2	Aver_D							
3-1	1315.7	2463.6	1147.9	61.7	62.1	62.0	61.4	61.8	101.7	101.6	101.6	4.82	2186	2.162	5.10	517	442	80
3-2	1340.3	2489.5	1149.2	62.5	63.1	62.4	61.9	62.5	101.6	101.8	101.7		2161		4.24	425		
3-3	1302.5	2452.2	1149.7	61.7	63.1	62.6	62.2	62.4	101.7	101.6	101.6		2168		3.84	385		
3-4	1356.8	2507.5	1150.7	62.99	63.09	62.77	62.66	62.9	101.7	101.7	101.7		2151		3.65	363	353	
3-5	1340.6	2489.9	1149.3	63.67	62.39	62.13	62.88	62.8	101.7	101.7	101.7		2151		3.32	331		
3-6	1316.1	2467.3	1151.2	63.03	63.55	62.34	62.3	62.8	101.7	101.6	101.6		2156		3.67	366		
4-1	1349.3	2501.6	1152.3	62.5	62.5	63.1	63.0	62.8	101.8	101.7	101.7	4.97	2151	2.156	3.68	367	371	83
4-2	1348.5	2499.7	1151.2	62.1	62.5	63.2	62.9	62.7	101.7	101.7	101.7		2153		3.76	375		
4-3	1354.1	2506.9	1152.8	62.1	63.6	63.6	62.2	62.9	101.5	101.6	101.6		2154		3.71	370		
4-4	1332.0	2484.7	1152.7	64.3	63.5	61.4	61.2	62.6	101.7	101.6	101.7		2160		2.94	294	309	
4-5	1337.2	2486.8	1149.6	61.4	62.2	62.8	62.2	62.2	101.7	101.7	101.7		2169		3.01	303		
4-6	1306.6	2461.2	1154.6	64.0	63.1	61.8	62.7	62.9	101.9	101.7	101.8		2148		3.33	331		
5-1	1350.4	2501.8	1151.4	65.4	64.0	63.0	64.1	64.1	101.6	101.7	101.6	4.87	2110	2.114	3.16	309	300	98
5-2	1351.4	2499.8	1148.4	64.9	63.6	63.5	63.1	63.8	101.6	101.7	101.7		2115		3.02	296		
5-3	1351.2	2499.6	1148.4	63.0	63.2	64.0	63.6	63.5	101.6	101.5	101.6		2129		3.00	296		
5-4	1336.5	2483.0	1146.5	63.5	63.6	64.2	64.3	63.9	101.7	101.7	101.7		2106		3.17	310	296	
5-5	1340.6	2488.7	1148.1	63.4	63.3	63.4	65.4	63.9	101.8	101.6	101.7		2110		3.04	298		
5-6	1306.3	2459.3	1153.0	63.9	63.2	64.4	64.9	64.1	101.7	101.7	101.7		2112		2.86	279		

ตารางที่ ค-2 ผลการออกแบบส่วนผสม 50% RAP

Sample	wt.mold	wt.mold+mix	Wt.mix	Heigth (mm)					Diameter (mm)			Water content	Dry Density Kg/m3	Aver_Dens g/cm3	Force (kN)	ITS (KPa)	Aver_ITS (KPa)	Retained ITS (%)
				#1	#2	#3	#4	Aver_H	#1	#2	Aver_D							
1-1	1341.1	2490.6	1149.5	57.7	60.8	62.2	59.1	60.0	101.7	101.8	101.7	4.73	**	2.272	2.82	**	394	79
1-2	1344.3	2497.1	1152.8	61.0	59.4	58.0	58.4	59.2	101.5	101.7	101.6		2293		4.15	439		
1-3	1350.4	2499.1	1148.7	60.3	60.9	59.6	59.0	59.9	101.5	101.6	101.5		2259		3.34	349		
1-4	1339.5	2489.7	1150.2	61.3	61.7	59.6	59.4	60.5	101.6	101.7	101.6		2237		3.35	347	310	
1-5	1342.2	2490.8	1148.6	58.4	60.5	59.1	57.6	58.9	101.4	101.6	101.5		2301		3.25	346		
1-6	1353.9	2501.0	1147.1	61.3	62.3	63.3	61.0	62.0	101.5	101.7	101.6		**		2.35	237		
2-1	1357.6	2508.9	1151.3	61.8	59.3	61.2	63.8	61.5	101.4	101.6	101.5	4.99	**	2.203	3.96	**	476	74
2-2	1325.9	2475.8	1149.9	61.2	62.0	60.6	60.4	61.1	101.7	101.7	101.7		2207		4.50	461		
2-3	1355.7	2503.8	1148.1	60.7	60.2	63.2	63.1	61.8	101.6	101.6	101.6		2182		4.85	492		
2-4	1349.1	2499.4	1150.3	61.5	62.0	60.3	60.5	61.1	101.7	101.5	101.6		2211		3.43	352	351	
2-5	1336.0	2485.6	1149.6	62.0	59.9	60.4	62.0	61.1	101.5	101.7	101.6		**		3.00	308		
2-6	1258.3	2406.1	1147.8	59.3	60.4	60.3	58.1	59.5	102.8	102.8	102.8		2211		3.78	393		
3-1	1348.5	2494.9	1146.4	61.2	61.9	63.4	62.0	62.1	101.5	101.7	101.6	5.06	2164	2.177	4.38	441	455	78
3-2	1354.0	2506.4	1152.4	62.9	61.4	60.8	62.3	61.8	101.5	101.6	101.6		2190		4.63	469		
3-3	1306.4	2455.8	1149.4	64.5	63.6	61.7	62.6	63.1	101.6	101.7	101.7		**		3.60	**		
3-4	1349.2	2497.3	1148.1	61.2	63.2	61.4	60.4	61.5	101.5	101.7	101.6		2191		3.75	382	354	
3-5	1332.0	2482.6	1150.6	63.8	63.0	61.5	63.4	62.9	101.7	101.7	101.7		**		3.25	323		
3-6	1337.2	2484.1	1146.9	62.1	60.7	62.1	63.4	62.1	101.6	101.8	101.7		2165		3.54	357		

ตารางที่ ค-2 ผลการออกแบบส่วนผสม 50% RAP (ต่อ)

Sample	wt.mold	wt.mold+mix	Wt.mix	Height (mm)					Diameter (mm)			Water content	Dry Density Kg/m3	Aver_Dens g/cm3	Force (kN)	ITS (KPa)	Aver_ITS (KPa)	Retained ITS (%)
				#1	#2	#3	#4	Aver_H	#1	#2	Aver_D							
4-1	1351.1	2501.4	1150.3	63.8	63.4	61.6	63.2	63.0	101.6	101.7	101.6	5.13	2142	2.138	3.76	374	373	80
4-2	1351.4	2499.2	1147.8	62.8	63.6	63.0	62.9	63.1	101.6	101.6	101.6		2135		3.70	368		
4-3	1350.4	2499.2	1148.8	63.6	63.0	62.2	62.5	62.8	101.6	101.6	101.6		2143		3.78	377		
4-4	1340.4	2491.8	1151.4	62.5	63.6	63.7	63.4	63.3	101.6	101.7	101.6		2132		2.90	287	297	
4-5	1306.6	2457.6	1151.0	62.8	62.8	63.6	63.1	63.1	101.7	101.7	101.7		2134		2.98	296		
4-6	1336.6	2488.0	1151.4	63.3	62.2	62.8	63.5	63.0	101.6	101.8	101.7		2141		3.12	310		
5-1	1302.4	2453.4	1151.0	63.6	64.7	64.5	63.5	64.1	101.7	101.7	101.7	4.89	2107	2.095	3.02	295	285	96
5-2	1340.5	2494.1	1153.6	64.2	64.3	64.0	65.1	64.4	101.6	101.6	101.6		2105		2.83	275		
5-3	1315.9	2465.5	1149.6	64.6	64.6	63.5	64.6	64.3	101.5	101.6	101.6		**		3.69	**		
5-4	1315.5	2465.8	1150.3	64.4	64.8	65.3	65.4	65.0	101.8	101.7	101.7		2075		3.00	289	273	
5-5	1340.1	2490.3	1150.2	65.3	65.2	65.0	64.1	64.9	101.7	101.7	101.7		2079		2.61	252		
5-6	1356.6	2504.6	1148.0	64.4	64.1	63.3	63.9	63.9	101.7	101.6	101.7		2109		2.83	277		

ตารางที่ ค-3 ผลการออกแบบส่วนผสม 0% RAP

Sample	wt.mold	wt.mold+mix	Wt.mix	Height (mm)					Diameter (mm)			Water content	Dry Density Kg/m3	Aver_Dens g/cm3	Force (kN)	ITS (KPa)	Aver_ITS (KPa)	Retained ITS (%)
				#1	#2	#3	#4	Aver_H	#1	#2	Aver_D							
2-1	1341.2	2487.0	1145.8	61.1	60.7	61.5	61.6	61.2	101.5	101.8	101.6	5.28	2190	2.238	5.18	530	562	61
2-2	1344.5	2493.8	1149.3	59.3	59.2	59.5	60.3	59.6	101.6	101.6	101.6		2259		5.8	610		
2-3	1350.5	2500.0	1149.5	60.3	59.6	59.0	60.3	59.8	101.6	101.5	101.6		2253		5.21	546		
2-4	1339.6	2488.6	1149.0	60.0	59.9	60.8	61.2	60.5	101.6	101.7	101.6		2223		3.16	327	341	
2-5	1342.3	2489.4	1147.1	60.7	58.9	58.9	59.8	59.6	101.6	101.5	101.6		2256		2.92	307		
2-6	1354.0	2514.6	1160.6	61.3	61.2	59.8	60.3	60.7	101.6	101.5	101.5		2244		3.77	390		
3-1	1349.2	2491.9	1142.7	59.0	59.3	61.1	59.8	59.8	101.7	101.6	101.6	4.57	2251	2.227	5.25	550	552	74
3-2	1357.7	2505.8	1148.1	60.3	58.9	60.8	62.3	60.5	101.8	101.5	101.7		2234		5.36	554		
3-3	1258.2	2407.3	1149.1	60.3	59.4	59.0	59.6	59.6	103.2	102.8	103.0		**		4.85	**		
3-4	1355.9	2502.5	1146.6	61.2	62.5	61.3	58.5	60.9	101.5	101.7	101.6		2220		3.49	359	406	
3-5	1325.9	2475.1	1149.2	61.6	60.1	60.9	61.6	61.1	101.8	101.6	101.7		2215		3.81	390		
3-6	1336.0	2487.9	1151.9	61.8	62.7	60.7	60.1	61.3	101.7	101.6	101.6		2213		4.59	469		
4-1	1306.5	2456.1	1149.6	62.2	61.5	60.5	60.7	61.2	101.6	101.7	101.7	4.34	2216	2.193	5.67	580	515	75
4-2	1354.1	2506.9	1152.8	63.5	62.7	61.3	62.0	62.4	101.6	101.6	101.6		2184		4.7	472		
4-3	1348.5	2498.5	1150.0	60.9	62.6	62.3	61.1	61.7	101.8	101.9	101.8		2193		4.88	494		
4-4	1337.2	2488.1	1150.9	61.6	62.2	61.8	62.1	61.9	101.7	101.7	101.7		2192		3.84	388	384	
4-5	1332.1	2483.6	1151.5	63.5	61.2	60.3	63.0	62.0	101.6	101.5	101.6		2196		3.63	367		
4-6	1349.2	2500.9	1151.7	61.9	62.2	63.1	62.5	62.4	101.7	101.7	101.7		2175		3.97	398		

ตารางที่ ค-3 ผลการออกแบบส่วนผสม 0% RAP (ต่อ)

Sample	wt.mold	wt.mold+mix	Wt.mix	Height (mm)					Diameter (mm)			Water content	Dry Density Kg/m3	Aver_Dens g/cm3	Force (kN)	ITS (KPa)	Aver_ITS (KPa)	Retained ITS (%)
				#1	#2	#3	#4	Aver_H	#1	#2	Aver_D							
5-1	1340.5	2488.8	1148.3	66.5	65.8	63.9	63.3	64.9	101.7	101.6	101.6	3.82	2100	2.122	3.91	377	387	84
5-2	1351.1	2501.4	1150.3	63.8	65.0	64.0	63.9	64.2	101.7	101.6	101.6		2128		3.91	382		
5-3	1336.5	2488.6	1152.1	64.3	63.9	63.5	64.3	64.0	101.7	101.8	101.8		2131		4.12	403		
5-4	1350.3	2502.5	1152.2	64.5	64.1	62.5	63.3	63.6	101.7	101.7	101.7		2147		3.5	344	324	
5-5	1351.5	2497.8	1146.3	62.7	63.1	65.3	64.9	64.0	101.7	101.8	101.8		2121		3.26	319		
5-6	1306.4	2451.1	1144.7	65.2	64.7	64.9	63.2	64.5	101.7	101.6	101.7		2104		3.17	308		
6-1	1316.0	2461.3	1145.3	65.5	65.6	65.1	66.1	65.6	101.7	101.7	101.7	5.46	2039	2.053	3.01	287	280	99
6-2	1340.6	2484.4	1143.8	64.7	63.5	64.8	65.5	64.6	101.8	101.7	101.7		2064		3.04	294		
6-3	1302.5	2454.1	1151.6	64.6	65.5	66.7	65.6	65.6	101.8	101.6	101.7		2050		2.7	258		
6-4	1340.2	2484.1	1143.9	64.8	65.3	63.5	63.5	64.3	101.7	101.7	101.7		2077		3.14	306	278	
6-5	1315.6	2460.3	1144.7	64.6	64.6	65.2	65.4	64.9	101.7	101.6	101.7		2059		2.61	252		
6-6	1356.8	2500.4	1143.6	66.2	66.4	64.5	65.5	65.6	101.7	101.7	101.7		2032		2.89	275		





**ภาคผนวก ง**

**ข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรม  
ของส่วนผสมโพลีเมออสฟัลด์**

**สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**



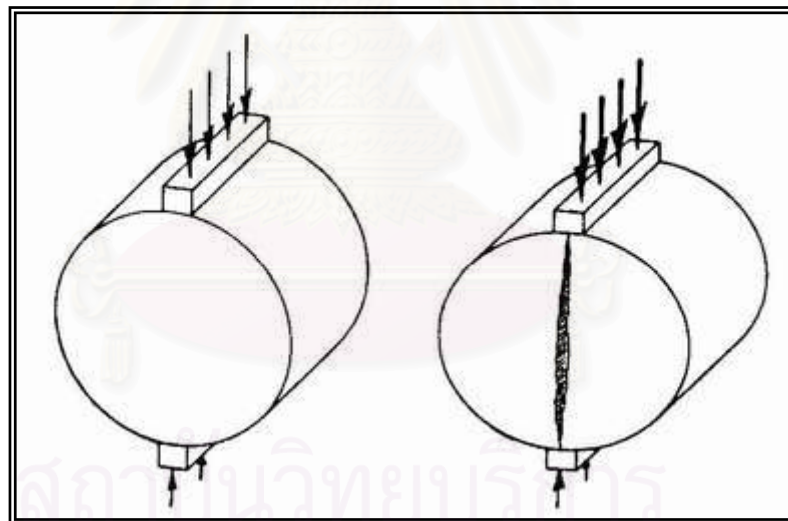
รูปที่ ง-1 เครื่องทดสอบ UTM-5P



รูปที่ ง-2 คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ UTM-5P



รูปที่ ง-3 แผงควบคุมอุณหภูมิของเครื่อง UTM-5P



รูปที่ ง-4 ลักษณะการแตกร้าวจากการทดสอบ

- ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม
- ค่าโมดูลัสคืนตัว
- ความต้านทานต่อการล้า

ตารางที่ ง-1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 25 °C

Mixture Type	Sample No.	Diameter (mm)	Height (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Force Level (kN)	Indirect Tensile Strength (kPa)	
80%RAP	1	101.57	62.73	10012	4.82	481	453
	2	101.57	63.40	10119	4.38	433	
	3	101.48	62.64	9989	4.44	445	
50%RAP	1	101.49	61.50	9809	4.89	499	473
	2	101.61	62.34	9954	4.46	448	
	3	101.55	63.18	10082	4.76	472	
0%RAP	1	101.59	61.72	9852	5.75	584	542
	2	101.61	62.18	9928	5.07	511	
	3	101.63	61.97	9897	5.27	532	

ตารางที่ ง-2 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 15 °C

Mixture Type	Sample No.	Height (mm)	Diameter (mm)	Force Level (kN)	Direction	Resilient Modulus (MPa)						Average Mr of sample	Average Mr of mixture
						#1	#2	#3	#4	#5	Average		
80% RAP	8R02	63.07	101.54	1.14	1	8978	8679	8978	8679	8431	8749	8312	7697
					2	7830	8014	8075	7860	7600	7876		
	8R05	63.31	101.53	1.144	1	7303	6909	6909	7101	7128	7070	7464	
					2	8456	7927	7490	7927	7490	7858		
	8R09	63.41	101.51	1.146	1	6639	6845	7008	6665	6665	6764	7314	
					2	7586	7823	8410	7884	7615	7864		
50% RAP	5R02	61.93	101.60	1.169	1	11801	11801	11351	12338	11351	11728	12140	10044
					2	11932	11932	12520	13164	13211	12552		
	5R04	63.03	101.53	1.189	1	7699	7244	7244	7244	7479	7382	8124	
					2	9264	8922	8889	8334	8922	8866		
	5R06	63.17	101.55	1.192	1	9810	9846	9846	10262	10187	9990	9868	
					2	10225	9424	9424	9846	9810	9746		
0% RAP	0R04	62.37	101.54	1.348	1	7065	7065	7394	7394	7394	7262	7346	7032
					2	7239	7439	7625	7215	7625	7429		
	0R05	62.30	101.52	1.347	1	7290	7837	7124	7463	7290	7401	7702	
					2	8012	8197	7573	8012	8223	8003		
	0R06	62.14	101.55	1.344	1	6531	6510	6397	6531	6531	6500	6048	
					2	5499	5786	5615	5598	5482	5596		

ตารางที่ ง-3 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 25 °C

Mixture Type	Sample No.	Height (mm)	Diameter (mm)	Force Level (kN)	Direction	Resilient Modulus (MPa)						Average Mr of sample	Average Mr of mixture
						#1	#2	#3	#4	#5	Average		
80% RAP	8R02	63.07	101.54	0.912	1	6758	6802	6775	6630	6543	6702	6492	5725
					2	6341	6345	6248	6278	6198	6282		
	8R05	63.31	101.53	0.915	1	6283	6132	6262	6420	5906	6201	5778	
					2	5432	5256	5273	5351	5469	5356		
	8R09	63.41	101.51	0.916	1	4656	4747	4672	4672	4656	4681	4903	
					2	5075	5238	5164	4989	5164	5126		
50% RAP	5R02	61.93	101.60	0.935	1	9287	9951	9609	9640	9951	9688	9571	8094
					2	9577	10283	8785	8985	9640	9454		
	5R04	63.03	101.53	0.951	1	6801	6653	6801	7140	6823	6844	6964	
					2	6978	7140	7163	7140	7000	7084		
	5R06	63.17	101.55	0.954	1	7700	7725	7489	7700	7700	7663	7747	
					2	7873	8080	7651	7676	7873	7831		
0% RAP	0R04	62.37	101.54	1.079	1	5111	5140	5216	5024	5216	5141	5332	5058
					2	5526	5526	5511	5511	5542	5523		
	0R05	62.30	101.52	1.077	1	5450	5272	5352	5535	5419	5406	5619	
					2	5698	5871	6004	5698	5888	5832		
	0R06	62.14	101.55	1.075	1	4637	4725	4712	4712	4776	4712	4223	
					2	3759	3730	3821	3681	3681	3734		

ตารางที่ ง-4 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 35 °C

Mixture Type	Sample No.	Height (mm)	Diameter (mm)	Force Level (kN)	Direction	Resilient Modulus (MPa)						Average Mr of sample	Average Mr of mixture
						#1	#2	#3	#4	#5	Average		
80% RAP	8R02	63.07	101.54	0.684	1	5987	5887	5723	5604	5978	5836	5604	4989
					2	5587	5487	5300	5278	5211	5373		
	8R05	63.31	101.53	0.686	1	5478	5312	5201	5289	5299	5316	5242	
					2	5388	5388	5108	4976	4976	5167		
	8R09	63.41	101.51	0.687	1	3962	4099	3994	3863	3976	3979	4120	
					2	4208	4265	4303	4227	4303	4261		
50% RAP	5R02	61.93	101.60	0.702	1	8852	8852	9871	8852	9871	9260	9341	7610
					2	9220	9220	9574	9914	9180	9422		
	5R04	63.03	101.53	0.713	1	6520	6912	6697	6492	6668	6658	6429	
					2	6353	6168	6141	6168	6168	6200		
	5R06	63.17	101.55	0.715	1	7485	7264	7057	7264	6831	7180	7061	
					2	6831	6890	6996	6996	6996	6942		
0% RAP	0R04	62.37	101.54	0.809	1	4445	4360	4311	4311	4344	4354	4562	4306
					2	4742	4742	4760	4804	4804	4770		
	0R05	62.30	101.52	0.808	1	6040	6040	5772	5699	5816	5873	5369	
					2	4812	4812	4895	4895	4913	4865		
	0R06	62.14	101.55	0.806	1	2765	2809	2733	2837	2728	2774	2985	
					2	3039	3324	3236	3130	3249	3196		

ตารางที่ ง-5 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมิ 45 °C

Mixture Type	Sample No.	Height (mm)	Diameter (mm)	Force Level (kN)	Direction	Resilient Modulus (MPa)						Average Mr of sample	Average Mr of mixture
						#1	#2	#3	#4	#5	Average		
80% RAP	8R02	63.07	101.54	0.456	1	5247	5333	5498	5221	5124	5285	4812	4180
					2	4687	4457	4215	4135	4198	4338		
	8R05	63.31	101.53	0.458	1	4746	4233	4233	4322	3989	4305	4536	
					2	5019	4380	5087	4607	4746	4768		
	8R09	63.41	101.51	0.458	1	3046	3064	3106	3085	3064	3073	3193	
					2	3280	3280	3327	3236	3446	3314		
50% RAP	5R02	61.93	101.60	0.468	1	8431	8959	9423	9019	8959	8958	8875	7094
					2	8172	8959	8602	8545	9677	8791		
	5R04	63.03	101.53	0.476	1	6065	5697	5947	5947	5537	5839	5773	
					2	5887	5887	5574	5574	5610	5706		
	5R06	63.17	101.55	0.477	1	6758	6197	7052	7420	7052	6896	6636	
					2	6197	6487	6758	6197	6238	6375		
0% RAP	0R04	62.37	101.54	0.539	1	4319	4556	4916	4556	4422	4554	4715	4027
					2	4944	4944	4916	4790	4790	4877		
	0R05	62.30	101.52	0.539	1	4742	4678	4742	4742	4770	4735	4931	
					2	5197	4924	5197	5227	5086	5126		
	0R06	62.14	101.55	0.537	1	2317	2195	2248	2289	2263	2262	2435	
					2	2728	2628	2628	2556	2493	2607		





รูปที่ ง-5 การจัดวางก้อนตัวอย่างสำหรับการทดสอบ  
ความต้านทานต่อการยุบต่อถาวร

ตารางที่ ง-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบต่อถาวร

อุณหภูมิ 50 °C

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
128	0.098	0.252	0.164	0.171	0.102	0.089	0.118	0.103	0.096	0.094	0.095
256	0.116	0.283	0.189	0.196	0.125	0.104	0.131	0.120	0.114	0.110	0.112
384	0.126	0.301	0.201	0.209	0.134	0.113	0.140	0.129	0.125	0.119	0.122
512	0.129	0.310	0.211	0.217	0.142	0.117	0.146	0.135	0.130	0.126	0.128
640	0.134	0.319	0.217	0.223	0.147	0.125	0.147	0.140	0.135	0.130	0.133
768	0.138	0.325	0.221	0.228	0.152	0.128	0.151	0.144	0.138	0.135	0.137
896	0.141	0.330	0.227	0.233	0.154	0.130	0.153	0.146	0.141	0.138	0.140
1024	0.144	0.333	0.230	0.236	0.158	0.131	0.155	0.148	0.145	0.140	0.143
1152	0.146	0.338	0.232	0.239	0.161	0.133	0.157	0.150	0.150	0.142	0.146
1280	0.148	0.341	0.235	0.241	0.163	0.136	0.158	0.152	0.147	0.145	0.146
1408	0.150	0.343	0.236	0.243	0.165	0.138	0.160	0.154	0.149	0.145	0.147
1536	0.150	0.346	0.239	0.245	0.166	0.139	0.162	0.156	0.150	0.147	0.149
1664	0.152	0.348	0.241	0.247	0.168	0.141	0.162	0.157	0.151	0.149	0.150
1792	0.153	0.349	0.242	0.248	0.169	0.142	0.163	0.158	0.152	0.150	0.151
1920	0.154	0.351	0.245	0.250	0.171	0.143	0.164	0.159	0.153	0.151	0.152
2048	0.155	0.353	0.246	0.251	0.173	0.145	0.165	0.161	0.155	0.153	0.154
2176	0.156	0.355	0.248	0.253	0.173	0.146	0.166	0.162	0.156	0.154	0.155
2304	0.157	0.356	0.249	0.254	0.174	0.147	0.166	0.162	0.157	0.154	0.156

ตารางที่ ๖-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
2432	0.159	0.357	0.250	0.255	0.175	0.148	0.168	0.164	0.158	0.155	0.157
2560	0.160	0.358	0.251	0.256	0.176	0.149	0.169	0.165	0.159	0.156	0.158
2688	0.160	0.359	0.252	0.257	0.177	0.150	0.169	0.165	0.160	0.157	0.159
2816	0.160	0.360	0.253	0.258	0.178	0.151	0.170	0.166	0.160	0.157	0.159
2944	0.161	0.362	0.254	0.259	0.179	0.152	0.170	0.167	0.161	0.157	0.159
3072	0.162	0.363	0.254	0.260	0.179	0.152	0.170	0.167	0.161	0.159	0.160
3200	0.163	0.363	0.256	0.261	0.181	0.154	0.171	0.169	0.163	0.159	0.161
3328	0.163	0.364	0.256	0.261	0.181	0.154	0.171	0.169	0.163	0.159	0.161
3456	0.164	0.365	0.258	0.262	0.182	0.155	0.172	0.170	0.163	0.160	0.162
3584	0.164	0.365	0.258	0.262	0.183	0.156	0.172	0.170	0.164	0.162	0.163
3712	0.165	0.366	0.259	0.263	0.183	0.157	0.172	0.171	0.165	0.161	0.163
3840	0.166	0.367	0.260	0.264	0.183	0.158	0.173	0.171	0.165	0.162	0.164
3968	0.166	0.367	0.260	0.264	0.183	0.158	0.174	0.172	0.165	0.162	0.164
4096	0.166	0.369	0.262	0.266	0.185	0.159	0.174	0.173	0.167	0.162	0.165
4224	0.167	0.369	0.262	0.266	0.185	0.160	0.175	0.173	0.167	0.163	0.165
4352	0.168	0.369	0.262	0.266	0.185	0.160	0.175	0.173	0.167	0.164	0.166
4480	0.168	0.370	0.263	0.267	0.187	0.160	0.175	0.174	0.167	0.165	0.166
4608	0.168	0.370	0.263	0.267	0.187	0.161	0.175	0.174	0.169	0.165	0.167
4736	0.169	0.371	0.264	0.268	0.187	0.161	0.176	0.175	0.169	0.166	0.168
4864	0.170	0.373	0.265	0.269	0.189	0.161	0.176	0.175	0.169	0.165	0.167
4992	0.170	0.373	0.265	0.269	0.189	0.162	0.177	0.176	0.170	0.166	0.168
5120	0.170	0.373	0.265	0.269	0.189	0.162	0.177	0.176	0.170	0.166	0.168
5248	0.170	0.375	0.266	0.270	0.189	0.162	0.177	0.176	0.171	0.166	0.169
5376	0.170	0.375	0.266	0.270	0.190	0.163	0.177	0.177	0.170	0.166	0.168
5504	0.171	0.375	0.267	0.271	0.191	0.163	0.177	0.177	0.171	0.167	0.169
5632	0.171	0.376	0.268	0.272	0.191	0.165	0.177	0.178	0.172	0.167	0.170
5760	0.171	0.377	0.268	0.272	0.191	0.165	0.178	0.178	0.172	0.168	0.170
5888	0.171	0.377	0.268	0.272	0.192	0.165	0.178	0.178	0.172	0.168	0.170
6016	0.172	0.377	0.268	0.272	0.192	0.165	0.178	0.178	0.174	0.168	0.171
6144	0.173	0.378	0.268	0.273	0.192	0.165	0.179	0.179	0.173	0.168	0.171

ตารางที่ ๖-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
6272	0.172	0.377	0.269	0.273	0.192	0.165	0.179	0.179	0.174	0.168	0.171
6400	0.173	0.379	0.269	0.274	0.192	0.166	0.179	0.179	0.175	0.168	0.172
6528	0.173	0.379	0.269	0.274	0.192	0.167	0.180	0.180	0.174	0.169	0.172
6656	0.173	0.379	0.270	0.274	0.192	0.167	0.180	0.180	0.174	0.170	0.172
6784	0.174	0.379	0.270	0.274	0.194	0.167	0.180	0.180	0.175	0.169	0.172
6912	0.173	0.380	0.271	0.275	0.194	0.167	0.181	0.181	0.175	0.170	0.173
7040	0.174	0.381	0.271	0.275	0.194	0.167	0.180	0.180	0.175	0.169	0.172
7168	0.175	0.381	0.271	0.276	0.194	0.168	0.181	0.181	0.175	0.170	0.173
7296	0.175	0.381	0.271	0.276	0.195	0.168	0.181	0.181	0.175	0.170	0.173
7424	0.175	0.381	0.272	0.276	0.195	0.168	0.181	0.181	0.176	0.171	0.174
7552	0.175	0.382	0.273	0.277	0.195	0.168	0.181	0.181	0.177	0.171	0.174
7680	0.175	0.383	0.273	0.277	0.196	0.169	0.182	0.182	0.176	0.171	0.174
7808	0.176	0.383	0.273	0.277	0.196	0.169	0.181	0.182	0.177	0.171	0.174
7936	0.175	0.384	0.273	0.277	0.196	0.169	0.182	0.182	0.177	0.172	0.175
8064	0.177	0.384	0.273	0.278	0.197	0.169	0.183	0.183	0.177	0.172	0.175
8192	0.177	0.383	0.274	0.278	0.197	0.170	0.183	0.183	0.178	0.172	0.175
8320	0.177	0.384	0.275	0.279	0.197	0.170	0.183	0.183	0.177	0.173	0.175
8448	0.177	0.384	0.274	0.278	0.197	0.170	0.183	0.183	0.178	0.172	0.175
8576	0.177	0.385	0.275	0.279	0.198	0.171	0.183	0.184	0.178	0.173	0.176
8704	0.177	0.385	0.275	0.279	0.199	0.171	0.184	0.185	0.178	0.173	0.176
8832	0.177	0.386	0.275	0.279	0.199	0.172	0.184	0.185	0.178	0.174	0.176
8960	0.177	0.385	0.275	0.279	0.199	0.172	0.184	0.185	0.179	0.173	0.176
9088	0.178	0.387	0.275	0.280	0.199	0.172	0.184	0.185	0.178	0.174	0.176
9216	0.179	0.387	0.275	0.280	0.199	0.172	0.184	0.185	0.179	0.174	0.177
9344	0.178	0.387	0.276	0.280	0.199	0.172	0.184	0.185	0.180	0.174	0.177
9472	0.179	0.387	0.277	0.281	0.199	0.172	0.184	0.185	0.180	0.174	0.177
9600	0.179	0.387	0.277	0.281	0.200	0.173	0.185	0.186	0.180	0.174	0.177
9728	0.179	0.387	0.277	0.281	0.200	0.172	0.185	0.186	0.181	0.174	0.178
9856	0.179	0.387	0.277	0.281	0.201	0.173	0.185	0.186	0.181	0.174	0.178
9984	0.179	0.388	0.277	0.281	0.201	0.173	0.185	0.186	0.180	0.175	0.178

ตารางที่ 6-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
10112	0.179	0.389	0.278	0.282	0.201	0.173	0.185	0.186	0.181	0.176	0.179
10240	0.179	0.389	0.279	0.282	0.201	0.174	0.185	0.187	0.181	0.176	0.179
10368	0.180	0.389	0.279	0.283	0.202	0.174	0.185	0.187	0.181	0.175	0.178
10496	0.181	0.389	0.278	0.283	0.201	0.174	0.185	0.187	0.181	0.176	0.179
10624	0.181	0.389	0.278	0.283	0.202	0.174	0.185	0.187	0.181	0.176	0.179
10752	0.180	0.390	0.279	0.283	0.202	0.174	0.185	0.187	0.182	0.176	0.179
10880	0.181	0.390	0.279	0.283	0.202	0.174	0.187	0.188	0.182	0.176	0.179
11008	0.181	0.389	0.279	0.283	0.202	0.176	0.186	0.188	0.182	0.176	0.179
11136	0.181	0.390	0.279	0.283	0.202	0.175	0.186	0.188	0.182	0.177	0.180
11264	0.181	0.391	0.280	0.284	0.202	0.176	0.187	0.188	0.182	0.177	0.180
11392	0.181	0.391	0.279	0.284	0.202	0.176	0.186	0.188	0.182	0.176	0.179
11520	0.181	0.391	0.280	0.284	0.202	0.176	0.186	0.188	0.183	0.177	0.180
11648	0.181	0.392	0.281	0.285	0.202	0.176	0.187	0.188	0.184	0.177	0.181
11776	0.182	0.393	0.281	0.285	0.203	0.176	0.187	0.189	0.183	0.177	0.180
11904	0.182	0.392	0.281	0.285	0.202	0.176	0.187	0.188	0.183	0.178	0.181
12032	0.182	0.393	0.281	0.285	0.203	0.176	0.187	0.189	0.184	0.177	0.181
12160	0.182	0.393	0.282	0.286	0.204	0.176	0.188	0.189	0.184	0.178	0.181
12288	0.182	0.393	0.281	0.285	0.204	0.176	0.187	0.189	0.184	0.177	0.181
12416	0.182	0.393	0.282	0.286	0.203	0.176	0.188	0.189	0.184	0.178	0.181
12544	0.182	0.393	0.282	0.286	0.204	0.176	0.187	0.189	0.185	0.179	0.182
12672	0.183	0.393	0.283	0.286	0.204	0.176	0.188	0.189	0.184	0.178	0.181
12800	0.183	0.394	0.283	0.287	0.204	0.176	0.187	0.189	0.184	0.178	0.181
12928	0.183	0.394	0.283	0.287	0.204	0.177	0.188	0.190	0.184	0.178	0.181
13056	0.183	0.394	0.283	0.287	0.205	0.176	0.188	0.190	0.184	0.179	0.182
13184	0.183	0.395	0.283	0.287	0.205	0.177	0.188	0.190	0.186	0.179	0.183
13312	0.183	0.395	0.283	0.287	0.205	0.177	0.188	0.190	0.185	0.179	0.182
13440	0.183	0.395	0.283	0.287	0.205	0.177	0.189	0.190	0.186	0.179	0.183
13568	0.184	0.396	0.283	0.288	0.205	0.177	0.189	0.190	0.185	0.179	0.182
13696	0.184	0.395	0.283	0.287	0.205	0.178	0.189	0.191	0.186	0.179	0.183
13824	0.184	0.395	0.283	0.287	0.205	0.178	0.189	0.191	0.186	0.179	0.183

ตารางที่ 6-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
13952	0.184	0.396	0.284	0.288	0.207	0.177	0.189	0.191	0.186	0.180	0.183
14080	0.184	0.396	0.283	0.288	0.206	0.178	0.190	0.191	0.186	0.179	0.183
14208	0.184	0.397	0.284	0.288	0.207	0.178	0.190	0.192	0.186	0.180	0.183
14336	0.184	0.396	0.283	0.288	0.207	0.178	0.190	0.192	0.186	0.180	0.183
14464	0.184	0.397	0.284	0.288	0.206	0.178	0.190	0.191	0.186	0.180	0.183
14592	0.184	0.397	0.284	0.288	0.206	0.179	0.190	0.192	0.186	0.180	0.183
14720	0.184	0.397	0.284	0.288	0.207	0.179	0.190	0.192	0.187	0.180	0.184
14848	0.185	0.397	0.284	0.289	0.207	0.178	0.190	0.192	0.187	0.180	0.184
14976	0.185	0.397	0.284	0.289	0.207	0.179	0.190	0.192	0.187	0.180	0.184
15104	0.185	0.397	0.284	0.289	0.207	0.179	0.190	0.192	0.187	0.180	0.184
15232	0.185	0.398	0.284	0.289	0.207	0.179	0.191	0.192	0.187	0.180	0.184
15360	0.184	0.398	0.284	0.289	0.207	0.179	0.190	0.192	0.187	0.180	0.184
15488	0.186	0.398	0.285	0.290	0.209	0.179	0.191	0.193	0.187	0.180	0.184
15616	0.185	0.398	0.285	0.289	0.208	0.179	0.191	0.193	0.187	0.180	0.184
15744	0.186	0.399	0.286	0.290	0.208	0.179	0.191	0.193	0.187	0.180	0.184
15872	0.186	0.399	0.285	0.290	0.209	0.179	0.191	0.193	0.188	0.180	0.184
16000	0.186	0.399	0.286	0.290	0.209	0.180	0.191	0.193	0.188	0.181	0.185
16128	0.186	0.400	0.286	0.291	0.209	0.180	0.192	0.194	0.188	0.180	0.184
16256	0.186	0.399	0.286	0.290	0.208	0.180	0.192	0.193	0.188	0.181	0.185
16384	0.186	0.399	0.286	0.290	0.209	0.179	0.192	0.193	0.188	0.180	0.184
16512	0.186	0.399	0.286	0.290	0.209	0.180	0.192	0.194	0.189	0.181	0.185
16640	0.187	0.400	0.286	0.291	0.209	0.181	0.192	0.194	0.189	0.180	0.185
16768	0.187	0.399	0.287	0.291	0.210	0.180	0.192	0.194	0.189	0.181	0.185
16896	0.187	0.401	0.288	0.292	0.210	0.181	0.192	0.194	0.189	0.181	0.185
17024	0.187	0.401	0.286	0.291	0.209	0.180	0.192	0.194	0.189	0.181	0.185
17152	0.188	0.401	0.287	0.292	0.209	0.181	0.192	0.194	0.189	0.182	0.186
17280	0.187	0.401	0.287	0.292	0.210	0.181	0.192	0.194	0.189	0.181	0.185
17408	0.188	0.401	0.287	0.292	0.211	0.182	0.192	0.195	0.189	0.180	0.185
17536	0.187	0.402	0.287	0.292	0.211	0.181	0.192	0.195	0.189	0.181	0.185
17664	0.188	0.401	0.288	0.292	0.210	0.182	0.192	0.195	0.189	0.182	0.186

ตารางที่ 6-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
17792	0.188	0.402	0.288	0.293	0.211	0.181	0.192	0.195	0.189	0.181	0.185
17920	0.188	0.402	0.288	0.293	0.211	0.182	0.193	0.195	0.189	0.182	0.186
18048	0.188	0.401	0.288	0.292	0.211	0.182	0.193	0.195	0.189	0.182	0.186
18176	0.188	0.402	0.288	0.293	0.211	0.182	0.193	0.195	0.189	0.182	0.186
18304	0.188	0.403	0.288	0.293	0.211	0.182	0.193	0.195	0.189	0.181	0.185
18432	0.188	0.402	0.288	0.293	0.212	0.182	0.193	0.196	0.189	0.182	0.186
18560	0.188	0.402	0.288	0.293	0.212	0.182	0.193	0.196	0.189	0.183	0.186
18688	0.188	0.403	0.289	0.293	0.212	0.182	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
18816	0.188	0.402	0.288	0.293	0.212	0.183	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
18944	0.189	0.403	0.289	0.294	0.212	0.183	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
19072	0.190	0.403	0.290	0.294	0.212	0.183	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
19200	0.189	0.403	0.288	0.293	0.212	0.183	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
19328	0.189	0.404	0.289	0.294	0.212	0.183	0.193	0.196	0.190	0.182	0.186
19456	0.188	0.403	0.290	0.294	0.212	0.182	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
19584	0.189	0.404	0.290	0.294	0.212	0.183	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
19712	0.189	0.404	0.290	0.294	0.212	0.184	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
19840	0.189	0.404	0.289	0.294	0.212	0.184	0.193	0.196	0.190	0.183	0.187
19968	0.189	0.404	0.290	0.294	0.212	0.183	0.194	0.196	0.190	0.183	0.187
20096	0.190	0.404	0.290	0.295	0.212	0.184	0.194	0.197	0.190	0.183	0.187
20224	0.190	0.404	0.290	0.295	0.212	0.184	0.193	0.196	0.191	0.183	0.187
20352	0.190	0.405	0.290	0.295	0.212	0.184	0.194	0.197	0.192	0.183	0.188
20480	0.190	0.405	0.290	0.295	0.212	0.184	0.194	0.197	0.191	0.184	0.188
20608	0.190	0.405	0.290	0.295	0.212	0.184	0.195	0.197	0.190	0.183	0.187
20736	0.190	0.405	0.290	0.295	0.213	0.184	0.195	0.197	0.191	0.184	0.188
20864	0.190	0.405	0.290	0.295	0.213	0.184	0.195	0.197	0.190	0.183	0.187
20992	0.191	0.405	0.291	0.296	0.213	0.184	0.195	0.197	0.190	0.183	0.187
21120	0.191	0.406	0.291	0.296	0.213	0.184	0.195	0.197	0.192	0.183	0.188
21248	0.191	0.405	0.291	0.296	0.213	0.185	0.195	0.198	0.192	0.184	0.188
21376	0.191	0.406	0.291	0.296	0.213	0.185	0.195	0.198	0.192	0.184	0.188
21504	0.191	0.407	0.292	0.297	0.213	0.184	0.194	0.197	0.191	0.184	0.188

ตารางที่ 6-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
21632	0.191	0.406	0.292	0.296	0.213	0.185	0.195	0.198	0.191	0.184	0.188
21760	0.191	0.407	0.292	0.297	0.213	0.186	0.195	0.198	0.192	0.185	0.189
21888	0.191	0.406	0.292	0.296	0.213	0.185	0.195	0.198	0.192	0.184	0.188
22016	0.191	0.406	0.292	0.296	0.214	0.185	0.195	0.198	0.192	0.184	0.188
22144	0.191	0.406	0.292	0.296	0.213	0.186	0.195	0.198	0.191	0.184	0.188
22272	0.191	0.407	0.292	0.297	0.214	0.185	0.195	0.198	0.192	0.184	0.188
22400	0.191	0.407	0.292	0.297	0.214	0.185	0.195	0.198	0.192	0.185	0.189
22528	0.191	0.407	0.292	0.297	0.214	0.186	0.195	0.198	0.192	0.184	0.188
22656	0.191	0.408	0.292	0.297	0.214	0.186	0.196	0.199	0.192	0.185	0.189
22784	0.191	0.408	0.292	0.297	0.215	0.186	0.195	0.199	0.192	0.185	0.189
22912	0.191	0.408	0.292	0.297	0.215	0.186	0.195	0.199	0.193	0.185	0.189
23040	0.191	0.408	0.292	0.297	0.214	0.186	0.196	0.199	0.192	0.185	0.189
23168	0.191	0.408	0.293	0.297	0.215	0.186	0.196	0.199	0.192	0.184	0.188
23296	0.191	0.408	0.293	0.297	0.215	0.186	0.197	0.199	0.193	0.184	0.189
23424	0.191	0.408	0.294	0.298	0.215	0.186	0.196	0.199	0.193	0.185	0.189
23552	0.192	0.409	0.292	0.298	0.215	0.186	0.197	0.199	0.193	0.185	0.189
23680	0.191	0.409	0.293	0.298	0.215	0.186	0.197	0.199	0.194	0.185	0.190
23808	0.191	0.409	0.293	0.298	0.215	0.186	0.197	0.199	0.194	0.185	0.190
23936	0.191	0.409	0.293	0.298	0.215	0.186	0.197	0.199	0.193	0.185	0.189
24064	0.191	0.409	0.294	0.298	0.216	0.187	0.197	0.200	0.194	0.186	0.190
24192	0.191	0.409	0.294	0.298	0.216	0.186	0.197	0.200	0.194	0.186	0.190
24320	0.192	0.410	0.294	0.299	0.215	0.186	0.197	0.199	0.194	0.185	0.190
24448	0.191	0.409	0.294	0.298	0.216	0.188	0.197	0.200	0.194	0.186	0.190
24576	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.187	0.197	0.200	0.194	0.185	0.190
24704	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.186	0.197	0.200	0.194	0.186	0.190
24832	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.186	0.198	0.200	0.194	0.186	0.190
24960	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.187	0.197	0.200	0.194	0.186	0.190
25088	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.188	0.197	0.200	0.194	0.186	0.190
25216	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.187	0.198	0.200	0.194	0.186	0.190
25344	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.187	0.198	0.200	0.194	0.186	0.190

ตารางที่ 6- ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
25472	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.187	0.198	0.200	0.195	0.187	0.191
25600	0.192	0.410	0.294	0.299	0.216	0.187	0.198	0.200	0.194	0.186	0.190
25728	0.191	0.410	0.294	0.298	0.216	0.188	0.198	0.201	0.195	0.186	0.191
25856	0.192	0.410	0.294	0.299	0.217	0.187	0.199	0.201	0.194	0.186	0.190
25984	0.193	0.412	0.294	0.300	0.216	0.188	0.198	0.201	0.195	0.187	0.191
26112	0.193	0.410	0.295	0.299	0.217	0.188	0.199	0.201	0.195	0.186	0.191
26240	0.193	0.410	0.295	0.299	0.218	0.188	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
26368	0.192	0.410	0.295	0.299	0.218	0.188	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
26496	0.193	0.411	0.295	0.300	0.218	0.188	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
26624	0.193	0.412	0.295	0.300	0.218	0.188	0.198	0.201	0.195	0.187	0.191
26752	0.193	0.412	0.295	0.300	0.218	0.188	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
26880	0.193	0.412	0.295	0.300	0.218	0.188	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
27008	0.193	0.412	0.295	0.300	0.218	0.188	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
27136	0.193	0.412	0.295	0.300	0.218	0.189	0.199	0.202	0.195	0.188	0.192
27264	0.194	0.412	0.295	0.300	0.218	0.189	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
27392	0.194	0.412	0.295	0.300	0.218	0.189	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
27520	0.194	0.412	0.295	0.300	0.218	0.189	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
27648	0.194	0.413	0.295	0.301	0.218	0.189	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
27776	0.194	0.412	0.295	0.300	0.218	0.190	0.199	0.202	0.196	0.187	0.192
27904	0.194	0.413	0.296	0.301	0.218	0.189	0.200	0.202	0.195	0.187	0.191
28032	0.194	0.412	0.295	0.300	0.218	0.189	0.199	0.202	0.195	0.187	0.191
28160	0.194	0.413	0.295	0.301	0.218	0.189	0.199	0.202	0.197	0.187	0.192
28288	0.194	0.413	0.295	0.301	0.218	0.190	0.200	0.203	0.196	0.187	0.192
28416	0.194	0.414	0.295	0.301	0.218	0.190	0.200	0.203	0.195	0.188	0.192
28544	0.194	0.413	0.296	0.301	0.218	0.190	0.200	0.203	0.197	0.188	0.193
28672	0.194	0.414	0.296	0.301	0.219	0.190	0.200	0.203	0.196	0.187	0.192
28800	0.194	0.414	0.297	0.302	0.220	0.190	0.200	0.203	0.196	0.188	0.192
28928	0.194	0.414	0.297	0.302	0.219	0.190	0.200	0.203	0.197	0.188	0.193
29056	0.194	0.414	0.297	0.302	0.219	0.190	0.200	0.203	0.197	0.189	0.193
29184	0.194	0.414	0.297	0.302	0.220	0.190	0.200	0.203	0.196	0.187	0.192



ตารางที่ 6- ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
29312	0.194	0.414	0.296	0.301	0.219	0.190	0.200	0.203	0.197	0.187	0.192
29440	0.194	0.414	0.297	0.302	0.219	0.190	0.200	0.203	0.197	0.188	0.193
29568	0.195	0.414	0.297	0.302	0.220	0.190	0.200	0.203	0.196	0.188	0.192
29696	0.194	0.415	0.297	0.302	0.220	0.191	0.200	0.204	0.197	0.188	0.193
29824	0.195	0.414	0.297	0.302	0.220	0.190	0.200	0.203	0.197	0.189	0.193
29952	0.194	0.414	0.297	0.302	0.220	0.190	0.200	0.203	0.197	0.188	0.193
30080	0.195	0.415	0.297	0.302	0.220	0.190	0.200	0.203	0.197	0.188	0.193
30208	0.195	0.414	0.297	0.302	0.220	0.191	0.200	0.204	0.197	0.189	0.193
30336	0.195	0.415	0.297	0.302	0.220	0.190	0.200	0.203	0.197	0.189	0.193
30464	0.195	0.415	0.297	0.302	0.220	0.191	0.200	0.204	0.197	0.188	0.193
30592	0.196	0.415	0.299	0.303	0.221	0.191	0.200	0.204	0.197	0.189	0.193
30720	0.196	0.415	0.297	0.303	0.220	0.191	0.200	0.204	0.197	0.189	0.193
30848	0.196	0.415	0.299	0.303	0.220	0.191	0.200	0.204	0.197	0.189	0.193
30976	0.196	0.415	0.299	0.303	0.220	0.191	0.200	0.204	0.198	0.190	0.194
31104	0.196	0.415	0.298	0.303	0.221	0.191	0.200	0.204	0.198	0.189	0.194
31232	0.196	0.415	0.299	0.303	0.221	0.191	0.201	0.204	0.197	0.189	0.193
31360	0.196	0.416	0.299	0.304	0.221	0.191	0.200	0.204	0.198	0.189	0.194
31488	0.196	0.416	0.298	0.303	0.221	0.191	0.200	0.204	0.198	0.189	0.194
31616	0.196	0.416	0.299	0.304	0.221	0.191	0.201	0.204	0.197	0.189	0.193
31744	0.196	0.417	0.299	0.304	0.221	0.191	0.200	0.204	0.197	0.189	0.193
31872	0.196	0.416	0.299	0.304	0.221	0.191	0.200	0.204	0.198	0.189	0.194
32000	0.196	0.417	0.299	0.304	0.221	0.191	0.200	0.204	0.197	0.190	0.194
32128	0.197	0.416	0.299	0.304	0.221	0.191	0.200	0.204	0.198	0.189	0.194
32256	0.196	0.417	0.299	0.304	0.221	0.191	0.201	0.204	0.198	0.190	0.194
32384	0.197	0.417	0.299	0.304	0.221	0.191	0.200	0.204	0.199	0.190	0.195
32512	0.197	0.417	0.299	0.304	0.221	0.192	0.201	0.205	0.199	0.189	0.194
32640	0.196	0.417	0.300	0.304	0.221	0.192	0.201	0.205	0.198	0.189	0.194
32768	0.197	0.418	0.300	0.305	0.221	0.192	0.201	0.205	0.199	0.190	0.195
32896	0.197	0.418	0.300	0.305	0.221	0.192	0.202	0.205	0.198	0.190	0.194
33024	0.196	0.418	0.301	0.305	0.221	0.192	0.201	0.205	0.198	0.189	0.194

ตารางที่ 6-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
33152	0.197	0.418	0.301	0.305	0.222	0.192	0.202	0.205	0.199	0.189	0.194
33280	0.197	0.418	0.300	0.305	0.222	0.192	0.201	0.205	0.199	0.191	0.195
33408	0.198	0.418	0.300	0.305	0.221	0.192	0.202	0.205	0.199	0.190	0.195
33536	0.198	0.418	0.300	0.305	0.221	0.192	0.200	0.204	0.198	0.190	0.194
33664	0.198	0.418	0.301	0.306	0.221	0.192	0.203	0.205	0.198	0.191	0.195
33792	0.197	0.418	0.300	0.305	0.222	0.192	0.201	0.205	0.199	0.191	0.195
33920	0.198	0.419	0.300	0.306	0.222	0.192	0.200	0.205	0.199	0.190	0.195
34048	0.198	0.418	0.301	0.306	0.222	0.192	0.200	0.205	0.199	0.191	0.195
34176	0.198	0.418	0.301	0.306	0.221	0.192	0.201	0.205	0.199	0.190	0.195
34304	0.198	0.418	0.301	0.306	0.222	0.192	0.201	0.205	0.199	0.191	0.195
34432	0.198	0.418	0.300	0.305	0.222	0.192	0.201	0.205	0.199	0.191	0.195
34560	0.198	0.418	0.301	0.306	0.222	0.192	0.202	0.205	0.200	0.190	0.195
34688	0.198	0.419	0.301	0.306	0.223	0.192	0.202	0.206	0.200	0.191	0.196
34816	0.198	0.418	0.301	0.306	0.223	0.192	0.202	0.206	0.200	0.191	0.196
34944	0.198	0.419	0.301	0.306	0.223	0.193	0.203	0.206	0.200	0.191	0.196
35072	0.198	0.418	0.301	0.306	0.223	0.193	0.202	0.206	0.200	0.191	0.196
35200	0.198	0.419	0.301	0.306	0.223	0.192	0.202	0.206	0.200	0.191	0.196
35328	0.198	0.419	0.301	0.306	0.223	0.192	0.203	0.206	0.200	0.191	0.196
35456	0.198	0.419	0.301	0.306	0.223	0.192	0.203	0.206	0.200	0.191	0.196
35584	0.198	0.419	0.301	0.306	0.223	0.192	0.202	0.206	0.200	0.191	0.196
35712	0.198	0.419	0.301	0.306	0.223	0.192	0.203	0.206	0.200	0.191	0.196
35840	0.199	0.419	0.301	0.306	0.224	0.194	0.202	0.207	0.200	0.191	0.196
35968	0.198	0.419	0.301	0.306	0.224	0.193	0.202	0.206	0.200	0.191	0.196
36096	0.198	0.419	0.301	0.306	0.224	0.193	0.203	0.207	0.200	0.191	0.196
36224	0.199	0.419	0.301	0.306	0.224	0.193	0.203	0.207	0.200	0.192	0.196
36352	0.198	0.419	0.302	0.306	0.224	0.193	0.203	0.207	0.200	0.191	0.196
36480	0.198	0.421	0.303	0.307	0.224	0.194	0.203	0.207	0.200	0.191	0.196
36608	0.198	0.419	0.302	0.306	0.224	0.193	0.203	0.207	0.200	0.191	0.196
36736	0.199	0.419	0.303	0.307	0.224	0.194	0.203	0.207	0.200	0.191	0.196
36864	0.199	0.419	0.302	0.307	0.224	0.194	0.203	0.207	0.200	0.191	0.196

ตารางที่ ง-6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (ต่อ)

Number of Pulse (cycle)	Accumulate Strain (%)										
	80% RAP Mixture				50% RAP Mixture				0% RAP Mixture		
	#1	#2	#3	Average	#1	#2	#3	Average	#1	#2	Average
36992	0.198	0.419	0.302	0.306	0.224	0.194	0.203	0.207	0.200	0.192	0.196
37248	0.199	0.419	0.302	0.307	0.224	0.194	0.203	0.207	0.200	0.191	0.196
37504	0.198	0.420	0.303	0.307	0.224	0.192	0.203	0.206	0.200	0.192	0.196
37760	0.200	0.419	0.302	0.307	0.224	0.194	0.203	0.207	0.200	0.192	0.196
38016	0.199	0.421	0.302	0.307	0.224	0.194	0.203	0.207	0.201	0.192	0.197
38272	0.199	0.420	0.302	0.307	0.225	0.194	0.204	0.208	0.201	0.192	0.197
38528	0.199	0.421	0.303	0.308	0.226	0.194	0.203	0.208	0.202	0.192	0.197
38784	0.199	0.421	0.304	0.308	0.225	0.194	0.203	0.207	0.202	0.192	0.197
39040	0.200	0.421	0.304	0.308	0.225	0.194	0.205	0.208	0.202	0.192	0.197
39296	0.200	0.421	0.304	0.308	0.225	0.193	0.204	0.207	0.202	0.192	0.197
39552	0.200	0.421	0.304	0.308	0.225	0.194	0.204	0.208	0.202	0.192	0.197
39808	0.200	0.422	0.305	0.309	0.226	0.194	0.204	0.208	0.202	0.192	0.197

ตารางที่ ง-7 การเปรียบเทียบด้านราคาและด้านคุณสมบัติส่วนผสมโม่แอสฟัลต์

	ส่วนผสม	0%RAP	50%RAP	80%RAP
ราคาวัสดุ	1.ราคาวัสดุรวมใหม่ (บาท/ลบ.ม.)	350	175	70
	2.ราคาแอสฟัลต์			
	ความหนาแน่น (t/m <sup>3</sup> )	2.210	2.190	2.188
	ปริมาณแอสฟัลต์ (%)	3.4	2.6	2.1
	ราคาแอสฟัลต์ (บาท/ลบ.ม.)	564	427	345
	ราคาวัสดุรวม (1)+(2) (บาท/ลบ.ม.)	914	602	415
คุณสมบัติ	*สัดส่วนราคาวัสดุ (%)	100	66	45
	*สัดส่วนความต้านทานต่อการยุบตัวของถาวร (%)	100	96	64

หมายเหตุ -แอสฟัลต์ราคา 7500 บาท/ตัน

-วัสดุรวมใหม่ราคา 350 บาท/ลบ.ม.

\* เทียบสัดส่วนจากส่วนผสม 0% RAP

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรภัทร เกตุนุติ เกิดเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2543 และเข้าการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งและจราจร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย