

พฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุ ชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน

Engineering Performance of Asphalt Concrete by Marshall Test Using Different Reclaimed Asphalt Pavement Content

นิรชร นกแก้ว^{1*} ดำรงค์ ปาละกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

²สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง 2/486 ถ.ศรีอยุธยา เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

Nirachorn Nokkaew^{1*} Damrong Parakul²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, 39 Moo 1, Rangsit - Nakhonnayok Road, Khlong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

²Bureau of Materials, Analysis and Inspection, Department of Highways,
2/486 Ayutthaya Road, Ratchathewi, Bangkok, 10400

*Corresponding author Email: nirachorn.n@en.rmutt.ac.th

(Received: December 4, 2017; Accepted: October 4, 2018)

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ต่างกัน โดยใช้วัสดุรวมรวมหินปูนจำนวน 1 แหล่ง ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 ของมวลรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เท่ากับ ร้อยละ 5 ของมวลรวม โดยใช้วิธีมาร์แชลล์และเกณฑ์ชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวมทำให้ได้คุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมงานของการนำวัสดุผิวทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพใหม่ด้วยวิธีผสมร้อน แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ RAP ไม่คัดแยกขนาด มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมอยู่ในช่วง 579.4 ถึง 953.7 กิโลปาสกาล ค่าโมดูลัสคืนตัวอยู่ในช่วง 1,242.0 ถึง 1,504.1 กิโลปาสกาล ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบคงที่ มีค่าความเครียดอยู่ในช่วงร้อยละ 0.4935 ถึง 0.9938 และความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบพลวัต มีค่าความเครียดอยู่ในช่วง 3,870 ถึง 4,774 ไมโครสเตรน

คำสำคัญ: วัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ แอสฟัลต์คอนกรีต อัตราส่วนผสม ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว ความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

ABSTRACT

This article aims to study the performance of asphalt concrete by Marshall Test using different reclaimed asphalt pavement (RAP) content. The experimental design detailed in this study included the use of one limestone aggregate source, no separation of RAP such as 10, 20, 30, 40, 50, 60 and 70 percent by mass of aggregate, asphalt cement (AC 60-70) at 5 percent by mass of aggregate. The research methodology used Marshall Test and binder course 19.0 mm in laboratory conditions. The study found that when using the amount of no separation of RAP in the range of 10 to 40 percent by mass of aggregate had job mix formula properties to meet the requirements of Asphalt Hot-Mix Recycling. The study found that RAP had a indirect tensile strength of 579.4 to 953.7 kPa, a resilient modulus of 1,242.0 to 1,504.1 kPa, static creep of 0.4935 to 0.9938 percent and dynamic creep of 3,870 to 4,774 microstrain.

Keywords: Reclaimed asphalt pavement, asphalt concrete, mix proportion, Indirect Tensile Strength, Resilient Modulus, Creep

1. บทนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างถนนได้มีการนำเอาวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการขุดหรือผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเดิม โดยใช้หั่วกวด (Milling Drum) ซึ่งขนาดคละของวัสดุชั้นผิวทางเดิมที่ได้ จะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเดินขุดเครื่องจักรและสภาพของหั่วกวดโดยการขุดไส (Mill) ผิวทางเดิมออก การหมุนเวียนวัสดุชั้นผิวทางเดิมมาใช้งานใหม่สามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธีแรกเป็นการนำเอาวัสดุไปผสมใหม่ที่โรงงานผลิต (In-Plant Recycling) และวิธีที่สองเป็นวิธีการหมุนเวียนวัสดุแบบในที่ (In-Place Recycling) [1] ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีอันสำคัญคือสามารถรื้อถอนวัสดุชั้นผิวทางและทำการปรับปรุงหรือผสมใหม่ในที่ก่อสร้างได้ทันที ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัสดุ ในทางปฏิบัติการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่นั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อหาปริมาณของวัสดุชั้นผิวทางเดิมที่มากที่สุดให้อัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสม เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุชั้นผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างคุ้มค่า

ก่อนที่จะนำไปดำเนินการก่อสร้างชั้นผิวทางให้มีประสิทธิภาพต่อไป ในงานวิจัยของ Kai Su และคณะ [2] ได้ศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่นำกลับมาใช้ใหม่ ที่ปริมาณของ RAP เท่ากับร้อยละ 0, 40 และ 70 พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณ RAP ร้อยละ 40 เมื่อออกแบบเป็นชั้นผิวทางในห้องปฏิบัติการและจากการทดลองของสนามบิน มีสมบัติใกล้เคียงกันกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปราศจาก RAP ในทางตรงกันข้ามวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ปริมาณร้อยละ 70 ไม่สามารถเสนอรับรองสมบัติด้านความล้าของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตปกติ Feipeng Xiao และคณะ [3] ได้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของขนาดของเศษยาง (Crump Rubber Size) และอิทธิพลของส่วนผสมของ RAP ประเภทต่าง ๆ การออกแบบการทดลองประกอบด้วย การใช้ขนาดของเศษยางจำนวน 3 ขนาด และประเภทของยาง 2 ชนิดคือ ambient หรือ cryogenic ในส่วนผสมที่มี RAP เท่ากับร้อยละ 25 งานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มของเศษยางทำให้ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมในการออกแบบส่วนผสมซูเปอร์เพพมีความต้านทานต่อการเกิดร่องล้อเพิ่มขึ้นโดย

ไม่คำนึงถึงขนาดและชนิดของเศษยาง ในทางตรงกันข้าม ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength) ไม่แสดงค่าที่สำคัญต่อส่วนผสมของการใช้ขนาดของเศษยางทั้ง 3 ขนาด อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของยาง การไม่คำนึงถึงชนิดของยางเป็นการลดค่าโมดูลัสคีนตัว แต่จะเป็นการยืดเวลาของการเกิดของส่วนผสมที่ได้รับการปรับปรุง Gonzalo Valde's และคณะ [4] ได้รายงานผลของพฤติกรรมทางกลของส่วนผสมแอสฟัลต์ที่มีอัตราส่วนของ RAP ที่สูง ส่วนผสมมีความหนาแน่นเป็นครึ่งหนึ่งตามขนาดโตสุดของวัสดุรวมรวมมี 2 ขนาดคือ 12 และ 20 มิลลิเมตร และบรรจุ RAP เท่ากับร้อยละ 40 และ 60 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องตามข้อกำหนดของสเปน สมบัติทางกลจากการศึกษาเป็นการหาค่า Stiffness Modulus และความต้านทานแรงดึงทางอ้อมและพฤติกรรมการแตกร้าวและความต้านทานต่อความล้า สรุปได้ว่า อัตราของ RAP ที่สูงทำให้การรวมเข้ากันได้ดีในส่วนผสมแอสฟัลต์โดยมีสมบัติที่เหมาะสม นิชร นกแก้ว และ ดำรงค์ ปาละกุล [5] ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน โดยใช้วัสดุรวมรวมหินปูนปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 ของมวลรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เท่ากับร้อยละ 5 ของมวลรวม โดยใช้วิธีมาร์แชลล์และเกณฑ์ชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP ไม่คัดแยกขนาดอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวมทำให้ได้คุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมเฉพาะงาน การนำวัสดุผิวทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพใหม่ด้วยวิธีผสมร้อน (Asphalt Hot-Mix Recycling)

ปัจจุบันกรมทางหลวงยังใช้ข้อกำหนดการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์สำหรับควบคุมวัสดุรวมรวมผสมให้อยู่ในช่วงค่าขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุด ซึ่งเป็นค่าร้อยละของวัสดุรวมรวมที่ผ่านแต่ละขนาดตะแกรงที่กำหนดตามลักษณะของชั้นทาง เช่น

ผิวทาง (Wearing Course และ Binder Course) พื้นทาง (Base Course) และไหล่ทาง (Shoulder Course) ในทางปฏิบัติการออกแบบส่วนผสมเฉพาะงาน (Job Mix Formula) จะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบในการกำหนดอัตราส่วนผสม (Mix Proportion) เพื่อให้มวลรวมผสมอยู่ในข้อกำหนด [6]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อใช้ปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ต่างกัน โดยมีค่าช่องว่างอากาศใกล้เคียงหรือเท่ากับร้อยละ 4 ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 410/2542 [6] ที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อให้สามารถกำหนดอัตราส่วนผสมไว้เป็นแนวทางแนะนำต่อผู้ออกแบบในการพิจารณาเลือกขนาดคละของวัสดุรวมรวมผสมที่มีปริมาณของ RAP ที่เหมาะสมที่สุดและดำเนินการก่อสร้างชั้นทางในการใช้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อให้ได้งานผิวทางที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้นและทำให้มีการนำวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่มาใช้ในการก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (RAP) ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณการใช้วัสดุรวมรวมจากธรรมชาติ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตรวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการขนส่งวัสดุรวมรวมจากแหล่งผลิตตามธรรมชาติ พลังงานที่ใช้ลำเลียงวัสดุผิวทางที่ใช้งานแล้ว พลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูนและพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตวัสดุรวมรวม เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

2. วิธีดำเนินการ

2.1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

RAP ไม่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาด จำนวน 1 แหล่ง ในสายทางหลวงหมายเลข 106 ตอน อ.เถิน - อ.ลี้

RAP ผิวทางเดิมของโครงการก่อสร้าง ตาก-ลำปาง ตอน 1 (ส่วนที่ 1) เป็นวัสดุที่ปราศจากมวลรวมของชั้นทางด้านล่างที่ไม่ใช่แอสฟัลต์คอนกรีต [6] และไม่ได้นำ RAP ไปใช้ในงานลักษณะอื่นนอกจากการนำวัสดุผิวทางเดิมกลับมาปรับปรุงคุณภาพใหม่ด้วยวิธีผสมร้อน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 RAP ไม่ผ่านกระบวนกรคัดแยกขนาด

วัสดุมวลรวมใช้หินปูน จากโรงโม่หินลำปางบุญชัย ตั้งอยู่ที่ กม.3+000 ด้าน RT. offset 50 ม.

แอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้เกรด 60-70 ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง [6]

2.2. ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและตัวอย่างในการ

ทดสอบ

เก็บตัวอย่างวัสดุมวลรวมหินปูนจากยูนิตหินร้อนที่ได้จากการทำงานของโรงงานผสมทั้ง 4 ยูนิต (4 Bins) และ RAP กำหนดอัตราส่วนผสมเพื่อให้วัสดุมวลรวมผสมอยู่ในเกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร [6] และกำหนดใช้ปริมาณของ RAP เท่ากับร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 โดยมวลของวัสดุมวลรวม สัญลักษณ์ของขนาดผลของมวลรวมภายหลังการผสมคือ RAP 10, RAP 20, RAP 30, RAP 40, RAP 50, RAP 60 และ RAP 70

2.3. ขั้นตอนการทดสอบ

หาขนาดผลของวัสดุมวลรวมและ RAP [7] ดังตารางที่ 1 [5] และให้มวลรวมผสมระหว่างขนาดผลของวัสดุมวลรวมและ RAP พยายามให้อยู่ในเกณฑ์กำหนด

ขนาดผลของมวลรวมภายหลังการผสม ดังตารางที่ 2 และ 3 [6]

ตารางที่ 1 ขนาดผลของวัสดุมวลรวมหินปูนและ RAP

Sieve Size	% Passing				
	RAP	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin4
1"					100
3/4"	100			100	89.5
1/2"	98.8			70.6	5.4
3/8"	95.6		100	16.3	0.5
#4	71.7	100	17.3	1.7	
#8	48.4	65.8	1.1		
#16	33.6	41.1	0.8		
#30	25.0	27.9			
#50	19.8	20.8			
#100	16.3	15.8			
#200	14.0	11.1			

ตารางที่ 2 ขนาดผลของมวลรวมภายหลังการผสม

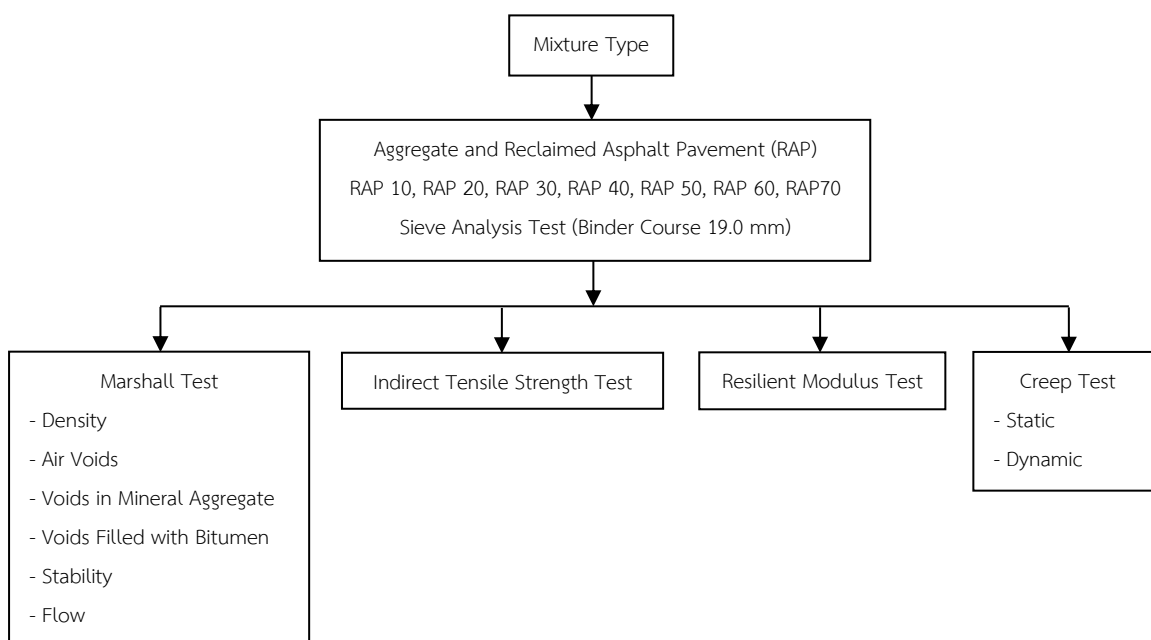
ขนาดที่ใช้เรียก มิลลิเมตร	19.0
(นิ้ว)	(3/4)
สำหรับชั้นทาง	Binder Course
ความหนา มิลลิเมตร	40 - 80
ขนาดตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
1"	100
3/4"	90 - 100
1/2"	-
3/8"	56 - 80
#4	35 - 65
#8	23 - 49
#16	-
#30	-
#50	5 - 19
#100	-
#200	2 - 8

ทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Test) [8] และใช้เกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Binder Course ขนาด 19.0 มิลลิเมตร [6]

การเตรียมก้อนตัวอย่างตามวิธีมาร์แชลล์ เพื่อหาขนาดคละที่เหมาะสมทั้ง 7 อัตราส่วนผสม เพื่อให้ได้ช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4 ดังตารางที่ 3 โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 5 โดยมวลของวัสดุรวม [8] และเตรียมตัวอย่างของอัตราส่วนผสมอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง บดทับก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมส่วนผสม โดยบดทับด้านละ 75 ครั้ง ที่อุณหภูมิส่วนผสม 150 องศาเซลเซียส เมื่อก้อนตัวอย่างเย็นลงแล้ว จึงดันก้อนตัวอย่างออกจากแบบ (Mold) ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) ทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test) และ ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Creep) โดยใช้การทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ตามแผนภาพดังรูปที่ 2

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดในการออกแบบ Recycled Asphalt Concrete

ชั้นทาง		Binder Course
รายการ		
Blows		75
Stability Min	N	6672
	lb	(1500)
Flow 0.25 mm (0.01 in.)		8 - 16
Percent Air Voids		3 - 6
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min.		13
Stability/Flow Min.		
	N/0.25 mm	556
	(lb/0.01 in.)	(125)
Percent Strength Index (Min.)		75



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการทดสอบ

ทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) อ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T 283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage

[9] และวิธีการทดสอบ ASTM D 4867 Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures [10] ใช้อัตราการป้อนน้ำหนักเพื่อให้เกิดการยุบตัวคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อ

นาที่ จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด โดยการทดสอบจะทำอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างให้ได้ 35 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำก้อนตัวอย่างติดตั้งในชุดทดสอบแรงดึงทางอ้อม ดังรูปที่ 3 แล้วทำการคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ดังสมการที่ 1

$$ITS = \frac{2P}{\pi DT} \quad (1)$$

เมื่อ ITS = ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม,
กิโลปาสกาล (kPa)

P = ค่าน้ำหนักกดสูงสุด, นิวตัน (N)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของ
ตัวอย่าง, มิลลิเมตร (mm)

T = ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง,
มิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 3 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

ทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 4123 Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures [11] และ AASHTO TP31-94 Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension [12] โดยก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบในลักษณะเดียวกับการ

ทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดความต้านทานแรงดึงทางอ้อมร้อยละ 15 ของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง

การติดตั้งก้อนตัวอย่างจะกระทำในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม แต่จะทำการติดตั้งอุปกรณ์ LVDTs (Linear Variable Differential Transducers) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างด้านข้างเพิ่มเข้าไปด้วย เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประกอบการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัว ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัว

การทดสอบจะให้น้ำหนักกดในลักษณะกระทำซ้ำ (Repeated Load) โดยใช้ความถี่ 1 Hz สัดส่วนช่วงเวลาน้ำหนัก (Load) ต่อช่วงเวลาลดน้ำหนัก (Unload) เท่ากับ 1 ต่อ 9 หรือก็คือในแต่ละครั้งใช้เวลา 1 วินาที โดยมีช่วงเวลาที่ทำการกดน้ำหนักเท่ากับ 0.1 วินาที รูปร่างของการกดน้ำหนักจะกำหนดให้เป็นรูป Haversine ซึ่งในมาตรฐานวิธีการทดสอบ ASTM D 4123 [11] ให้กระทำในช่วง 50-200 ครั้งของค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม สำหรับในการศึกษานี้ทดสอบจนกระทั่งถึงจำนวนครั้งของการกดน้ำหนักถึงรอบที่ 160

การเก็บรวบรวมข้อมูลและการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงานของเครื่อง

CRT-NU14 ทำการคำนวณให้ โดยค่าโมดูลัสคืนตัวที่ต้องการจะเป็นค่าเฉลี่ย 4 ค่าสุดท้ายที่มีค่าการคืนตัวคงที่ (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ไม่เกินร้อยละ 2) ในแต่ละก้อนตัวอย่างที่แต่ละอุณหภูมิจะทำการทดสอบ 2 ทิศทางตามแนวของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกัน แล้วนำมาเฉลี่ยจะทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสคืนตัวที่อุณหภูมินั้น ๆ

ในการคำนวณค่าโมดูลัสคืนตัวนั้นจำเป็นต้องใช้ค่าสัดส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ในการคำนวณ แต่เนื่องจากข้อจำกัดจากการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปได้เพียงด้านข้างของเครื่องมือทดสอบ นอกจากนั้นค่าสัดส่วน ปัวซองจากการทดสอบโดยปกติจะมีค่าไม่แตกต่างกันนัก ค่าสัดส่วนปัวซอง 2 ค่า ที่มักได้รับการยอมรับใช้กันคือ 0.35 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 15 และ 25 องศาเซลเซียส และ 0.40 เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส ในการศึกษาจึงกำหนดเลือกใช้ค่าสัดส่วนปัวซองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.40

ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Creep) เป็นการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อศึกษาสมรรถนะในการต้านทานต่อการเกิดความเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร โดยทำการทดสอบแบบ Dynamic Creep Test ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกน (Axial Load) ในลักษณะกระทำซ้ำต่อกันตัวอย่าง สำหรับการศึกษานี้จะอ้างอิงและดัดแปลงวิธีการทดสอบจากมาตรฐานการทดสอบของประเทศไทย AS 2891.12.1-1995 "Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt – Dynamic creep test" [13] การทดสอบจะทำการป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำขนาด 100 kPa ด้วยความถี่ 0.5 Hz แบ่งเป็นช่วงเวลาในการป้อนน้ำหนัก 0.5 วินาที และช่วงเวลาพัก 1.5 วินาทีที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 5

วิเคราะห์ผลพฤติกรรมทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสคืนตัว ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (กรณี Static Creep และ Dynamic Creep) ตามขนาดคละที่แตกต่างกันของวัสดุผสมรวม [5] และใช้ RAP ผิวทางเดิม



รูปที่ 5 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1. ผลการออกแบบอัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสม โดยออกแบบอัตราส่วนผสมให้มีช่องว่างอากาศเท่ากับ ร้อยละ 4 และใช้ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 5 โดยมวลของวัสดุผสมรวม [5] ดังตารางที่ 4

พฤติกรรมแอสฟัลต์คอนกรีตระหว่างที่ คลุกเคล้าส่วนผสมร้อนให้เข้ากันโดยควบคุมอุณหภูมิมีลักษณะเดียวกันกับการผสมร้อนของมวลรวม ผลการทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ทั้ง 6 ค่า ได้แก่ ความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ เสถียรภาพและค่าการไหล ตามขนาดคละที่แตกต่างกันของวัสดุผสมรวมและใช้ RAP ผิวทางเดิมอยู่ในข้อกำหนดของการออกแบบ Recycled Asphalt Concrete พิจารณาจากตารางที่ 3 พบว่า ปริมาณของ RAP ใดๆ ทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าค่ามวลรวมผสมของ RAP 50, RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรง 3/8" และวัสดุผสมรวมผสมที่ RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรงเบอร์ 200 จะมีค่าเกินกว่าเกณฑ์ข้อกำหนด ปริมาณ RAP

เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ค่าการไหลจะมีค่าลดลง เนื่องมาจากวัสดุมวลรวมผสมที่มีปริมาณ RAP มาก จะมีระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวมน้อย เพราะ RAP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาดและเป็นวัสดุที่มีขนาดเม็ดเล็กมีปริมาณผ่านตะแกรงมาก โดยปกติแล้ววัสดุมวลรวมที่มีลักษณะเม็ดเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ จะให้ค่าเสถียรภาพที่สูง แต่มีข้อควรคำนึงถึงคือ ค่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไป ขาดความยืดหยุ่นซึ่งอาจทำให้ผิวทางเสียหายได้ [14]

พิจารณาขนาดคละของวัสดุมวลรวมที่มีมวลรวมผสมอยู่ภายในขีดจำกัดที่กำหนด โดยพิจารณาที่ตะแกรงขนาด 3/8" และเบอร์ 200 พบว่า ปริมาณ RAP 10 ถึง RAP 40 มีค่ามวลรวมผสมอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดและผลการศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งมีค่าทั้ง 6 ค่าคือ ความ

หนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ เสถียรภาพ และค่าการไหล มีสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตสอดคล้องกับทฤษฎีคือ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากพอจะทำให้อายุการใช้งานยืนยาวและมีคุณภาพดี ผิวทางแอสฟัลต์ที่บดทับแล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความหนาแน่นช่องว่างอากาศที่เพียงพอ ปริมาตรช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้ว ซึ่งรวมช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีปริมาณเพียงพอทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์ที่ห่อหุ้มผิววัสดุมวลรวมหนาจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทนต่ออายุการใช้งานได้ยืนยาวและเสถียรภาพแสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักการจราจร [14] ซึ่งสมบัติที่กล่าวถึงนี้อยู่ในเกณฑ์กำหนดตามขนาดคละของมวลรวมภายหลังการผสมและข้อกำหนดในการออกแบบ Recycled Asphalt Concrete [6]

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP จำนวน 7 อัตราส่วนผสม

Sieve Sizes	Combined (% Passing)							
	RAP 10	RAP 20	RAP 30	RAP 40	RAP 50	RAP 60	RAP 70	Desired [6]
1"	100	100	100	100	100.0	100	100	100
3/4"	98.7	98.7	98.5	99.0	99.0	99.7		90 - 100
1/2"	85.6	85.5	82.9	87.1	88.2	95.9	96.7	-
3/8"	79.3	78.8	74.7	79.9	82.8	92.7	93.3	56 - 80
#4	42.3	41.1	40.9	42.4	43.5	49.1	54.7	35 - 65
#8	23.7	23.3	24.1	25.0	25.9	29.4	34.2	23 - 49
#16	15.2	15.2	16.1	17.0	17.9	20.4	23.7	-
#30	10.3	10.6	11.4	12.2	13.1	15.0	17.5	-
#50	7.8	8.1	8.9	9.6	10.3	11.9	13.9	5 - 19
#100	6.1	6.4	7.1	7.8	8.5	9.8	11.4	-
#200	4.5	5.0	5.8	6.5	7.2	8.4	9.8	2 - 8
MIX PROPORTION	RAP	10	20	30	40	50	60	70
	BIN 1	28	20	14	8	2	0	0
	BIN 2	40	38	30	32	32	35	26
	BIN 3	10	10	12	10	6	2	2
	BIN 4	12	12	14	10	10	3	2
Marshall Test	RAP 10	RAP 20	RAP 30	RAP 40	RAP 50	RAP 60	RAP 70	Specification
Density	2.402	2.402	2.401	2.397	2.400	2.398	2.397	2.391-2.409

ตารางที่ 4 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม RAP จำนวน 7 อัตราส่วนผสม (ต่อ)

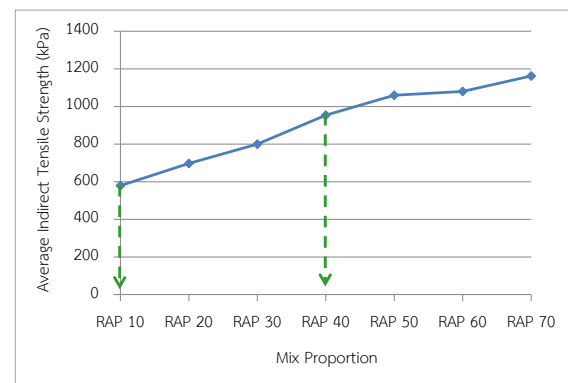
Marshall Test	RAP 10	RAP 20	RAP 30	RAP 40	RAP 50	RAP 60	RAP 70	Specification
Air Voids	3.9	3.9	3.9	4.0	3.9	3.9	3.9	3.3-4.7
VMA	14.6	14.6	14.6	14.7	14.6	14.6	14.6	>13
VFB	73.3	73.3	73.3	72.8	73.3	73.3	73.3	68-78
Stability	2,260	2,290	2,320	2,310	2,290	2,370	2,520	>1900
Flow	15	13	12	12	10	9	11	10-12

3.2. ผลของความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสม เมื่อใช้ปริมาณ RAP เท่ากับร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 โดยมวลของวัสดุรวม

พิจารณาจากรูปที่ 6 ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้นพบว่า เมื่อใช้ปริมาณ RAP เพิ่มมากขึ้นเป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุรวมในส่วนผสมในลักษณะที่คละกัณฑ์ กระบวนการรีไซเคิลโดยวิธีตัดแบบเย็น [6] มีผลต่อขนาดคละของ RAP ทำให้ความละเอียดมากขึ้นกว่าเดิม โดยเฉพาะปริมาณฝุ่นที่ตะแกรงเบอร์ 200 มากขึ้น ทั้งนี้ปริมาณส่วนละเอียดที่มากขึ้นจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสของมวลรวมมากขึ้น ที่ปริมาณแอสฟัลต์คงเดิมจะส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของเม็ดลดลง ทำให้ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง จึงไม่สามารถใช้ปริมาณร้อยละของ RAP ในปริมาณที่มากขึ้นได้ เพราะทำให้มวลรวมผสมไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน [5] และค่ามวลรวมผสมของ RAP 50, RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรง 3/8" และวัสดุรวมผสมที่ RAP 60 และ RAP 70 ที่ขนาดตะแกรงเบอร์ 200 จะมีค่าเกินกว่าเกณฑ์ข้อกำหนด ดังนั้นควรพิจารณาขนาดคละของวัสดุรวมที่มีมวลรวมผสมอยู่ภายในขีดจำกัดที่กำหนด โดยพิจารณาที่ตะแกรงขนาด 3/8" พบว่า ปริมาณที่ RAP 10 ถึง RAP 40 อยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนด [5] ถึงแม้ว่าค่าเสถียรภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและการต้านทานการไหลมีแนวโน้มลดลงก็ตาม

ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมเมื่อมีปริมาณ RAP ต่างกัน ปรากฏว่า ปริมาณที่

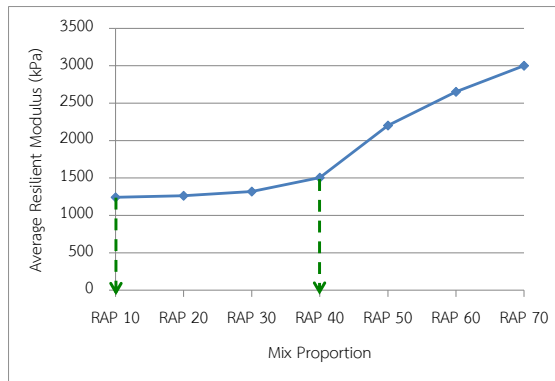
RAP 10 ถึง RAP 40 มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมอยู่ในช่วง 579.4 ถึง 953.7 kPa ดังรูปที่ 6



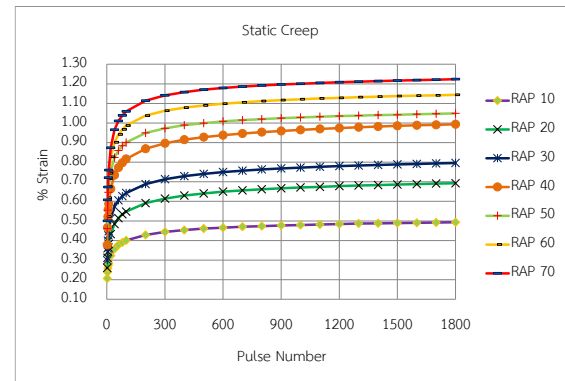
รูปที่ 6 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมอัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน

3.3. ผลค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสม และปริมาณ RAP ที่ต่างกัน

พิจารณาจากรูปที่ 7 ค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้นพบว่า เมื่อใช้ปริมาณของ RAP เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนให้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเม็ดรวมในส่วนผสมสามารถให้ค่าโมดูลัสคั้นตัวเพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคั้นตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อมีปริมาณ RAP ต่างกัน ปรากฏว่า ปริมาณที่ RAP 10 ถึง RAP 40 [5] มีค่าโมดูลัสคั้นตัวอยู่ในช่วง 1,242.0 ถึง 1,504.1 kPa ดังรูปที่ 7



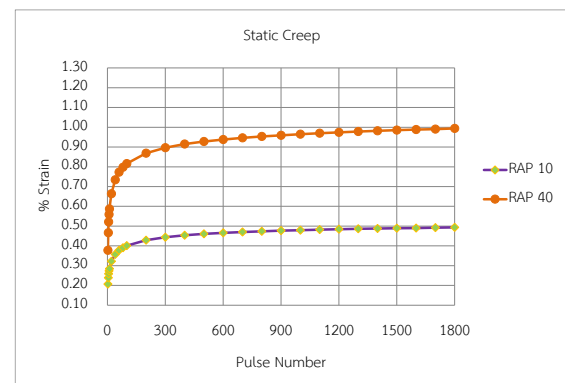
รูปที่ 7 ค่าโมดูลัสคืนตัวอัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน



รูปที่ 8 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Static Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน

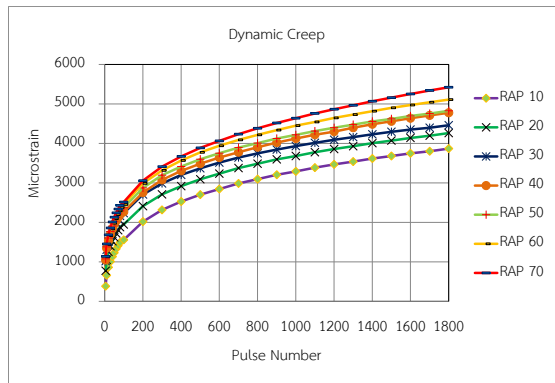
3.4. ผลความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

พิจารณาจากรูปที่ 8 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Static Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้น พบว่า เมื่อใช้ปริมาณของ RAP เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเพิ่มขึ้น เช่น RAP 70 แสดงถึงส่วนผสมที่มีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้มากที่สุด และเมื่อใช้ปริมาณของ RAP ลดลง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรลดลงเช่นกัน เช่น RAP 60, RAP 50, RAP 40, RAP 30, RAP 20 และ RAP 10 ตามลำดับ ดังนั้น แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนของ RAP ผสมอยู่น้อยจะมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรที่มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของ RAP ในปริมาณที่มาก ซึ่งแอสฟัลต์คอนกรีตที่ RAP 10 มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรมากที่สุด และค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนผสมที่มี RAP มากขึ้น ตามลำดับ กรณี Static Creep มีค่า Strain อยู่ในช่วงร้อยละ 0.4935 ถึง 0.9938 ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Static Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP 10 ถึง RAP 40

พิจารณาจากรูปที่ 10 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Dynamic Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 อัตราส่วนผสมนั้นจะเป็นไปตามลักษณะเดียวกันกับกรณี Static Creep พบว่า เมื่อใช้ปริมาณของ RAP เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร กรณี Dynamic Creep มีค่า Strain อยู่ในช่วง 3,870 ถึง 4,774 ไมโครสเตรน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร กรณี Dynamic Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP ต่างกัน



รูปที่ 11 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร กรณี Dynamic Creep อัตราส่วนผสมที่ปริมาณ RAP 10 ถึง RAP 40

4. สรุป

จากการออกแบบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปริมาณ RAP ต่างกัน โดยการกำหนดอัตราส่วนผสมให้ขนาดผลของวัสดุผสมอยู่ในขีดจำกัดที่กำหนดตามมาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/2532 [15] ของกรมทางหลวง และ RAP ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.ม.-410/2542 และทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยทำการศึกษากับวัสดุผสม 1 แห่งคือ โครงข่าย ตาก-ลำปาง ตอน 1 (ส่วนที่ 1) สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

การเลือกปริมาณ RAP ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของอัตราส่วนผสม [5] พบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าโมดูลัสคืนตัวที่ทดสอบได้ในลักษณะเดียวกัน ค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวร กรณี Static Creep และกรณี Dynamic Creep ที่ปริมาณ RAP ต่างกัน สรุปได้ว่า มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพิ่มขึ้น

การนำวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ (RAP) ไม่คัดแยกขนาดในงานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนี้สามารถกำหนดปริมาณ RAP อยู่ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 40 ของมวลรวม ซึ่งเป็นปริมาณ RAP และมีสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของชั้น Binder Course ซึ่งสามารถยอมรับได้ และปริมาณของวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้งานเท่ากับร้อยละ 40 ของมวลรวม ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ และข้อมูลนี้ใช้เฉพาะกรณีของทางหลวงหมายเลข 106 ตอนอ.เถิน - อ.ลี้ เท่านั้น เนื่องจากเป็น

การใช้ RAP ที่ไม่คัดแยกขนาด หากผู้ออกแบบจะศึกษาในสายทางอื่นๆ ควรทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลว่ามีลักษณะที่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางต่อผู้ออกแบบในการพิจารณาเลือกขนาดผลของวัสดุผสม [5]

ในกรณีที่ RAP มีมวลรวมผสมเกินขีดจำกัดที่กำหนดควรทำการคัดแยกขนาดของวัสดุผสมส่วนที่ค้างตะแกรงที่มีช่องผ่านเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22.225 มิลลิเมตร (7/8 นิ้ว) ทั้ง และใช้ตะแกรงที่มีช่องเปิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 9.525 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) เพื่อแยกขนาดผลของวัสดุผสมส่วนที่ผ่านตะแกรงทิ้งแล้วศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์เป็นไปตามข้อกำหนดของสูตรส่วนผสมเฉพาะงาน Asphalt Hot-Mix Recycling [5]

นอกจากนั้นควรศึกษาพฤติกรรมทางด้านความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่าโมดูลัสการคืนตัว และความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ในกรณีที่ใช้ RAP แบบคัดแยกขนาด ประกอบการพิจารณาเลือกใช้ปริมาณ RAP ให้สามารถใช้วัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ได้อย่างคุ้มค่าและเหมาะสมต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

การให้ความร้อนของวัสดุทั้ง 3 ชนิด ควรแยกส่วนให้ความร้อนก่อนทั้ง RAP วัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์ แล้วจึงผสมกันในภาชนะผสม

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งในการวิจัยเรื่องการศึกษาเชิงทดลองของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงปริมาณวัสดุชั้นผิวทางเดิมหมุนเวียนเพื่อใช้งานใหม่ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี เงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2558 ผ่านการพิจารณาโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Highways 8 (Nakhon Ratchasima), Department of Highways, (2016, March 26). Rehabilitation of Pavement In-Place Recycling by Foam Asphalt for Additive Materials [Online]. Available: <http://www.doh.go.th/web/hwyorg61000/In-Place%20Recycling.htm>
- [2] K. Su, Y. Hachiya and R. Maekawa, "Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement," *Resources*

Conservation and Recycling, vol. 54, pp. 37-44, 2009.

- [3] F. Xiao, S. N. Amirkhanian, J. Shen and B. Pytman, "Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1028-1034, 2009.
- [4] G. Valde's, F. Perez-Jimenez, R. Miro, A. Martinez and R. Botella, "Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)," *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1289-1297, 2011.
- [5] N. Nokkaew and D. Parakul, "Physical Properties of Asphalt Concrete by Marshall Test Using Different Reclaimed Asphalt Pavement Content," *Srinakharinwirot Engineering Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 28-37, January-June, 2016.
- [6] Asphalt Hot-Mix Recycling, Standard No. DH-S 410/1995.
- [7] Test for Gradation of Aggregate by Dry Sieve Analysis, Test Number DH-T 204/1973.
- [8] Test for Asphaltic Concrete by Marshall, Test Number DH-T 604/1974.
- [9] AASHTO T 283, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, 2014.
- [10] ASTM D 4867, Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

- [11] ASTM D4123-82, Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 1995.
- [12] AASHTO-TP31, Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension, 1996.
- [13] AS 2891.12.1-1995, Methods of sampling and testing asphalt-Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt-Dynamic creep test, Australian Standards, 1995.
- [14] N. Nokkaew, *Highway Materials Testing*. 4th ed. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2016.
- [15] Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt, Standard No. DH-S 408/1989.