

ผลของขนาดเศษยางบดผสมในมวลรวม ที่มีต่อคุณสมบัติความต้านทานการยุบตัวของ
แอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

นายศิวารักษ์ อุ่ณศิริไทย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

INFLUENCES OF CRUMB RUBBER SIZE IN AGGREGATE BLEND ON
DEFORMATION RESISTANCE PROPERTIES OF HOT MIX ASPHALT

Mr. Siwarak Unsiwilai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของขนาดเศษยางบดผสมในมวลรวม ที่มีต่อคุณสมบัติ
โดย	ความต้านทานการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน
สาขาวิชา	นายศิวรักษ์ อุ่ณศิริไทย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิศวกรรมโยธา
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกษม ชูจารุกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์)

ศิวารักษ์ อุ่นศิริไพลย์ : ผลของขนาดเศษยางบดผสมในมวลรวม ที่มีต่อคุณสมบัติความต้านทานการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน. (INFLUENCES OF CRUMB RUBBER SIZE IN AGGREGATE BLEND ON DEFORMATION RESISTANCE PROPERTIES OF HOT MIX ASPHALT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: ผศ. ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม, 129 หน้า.

การผสมเศษยางบดลงในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต มีการใช้งานในต่างประเทศมากกว่า 30 ปี โดยการผสมเข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ เรียกว่า Crumb Rubber Modified Binder (CRMB) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมประสานของแอสฟัลต์ ลดการเกิดความเสียหายต่อผิวทางได้ดี แต่ข้อจำกัดของ CRMB คือความยุ่งยากในขั้นตอนการผสมเศษยางกับแอสฟัลต์ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทางเท่านั้น งานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการนำเศษยางบดที่มีขนาดอยู่ในระดับหยาบมาผสมและแทนที่ส่วนหนึ่งของหินย่อยในมวลรวม โดยศึกษาศักยภาพในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการยุบตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดความเสียหายแบบยุบตัวในแนวร่องล้อที่เป็นรูปแบบความเสียหายหลักของถนนในประเทศไทย โดยงานวิจัยนี้ออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall Mix Design โดยเป็นส่วนผสมที่มีขนาดละเอียดแน่น (Dense Graded) และแบบช่องว่าง (Gap Graded) ตามข้อกำหนดสำหรับการก่อสร้างชั้นผิวทางส่วนผสมแต่ละรูปแบบขนาดละเอียดสนใจปัจจัยด้านขนาดยางบด 3 ขนาด คือ ค้างบนตะแกรงเบอร์ 16 เบอร์ 30 และผ่านตะแกรงเบอร์ 30 โดยแต่ละขนาดมีปัจจัยด้านปริมาณยางบดที่แทนที่หินย่อยในสัดส่วน 1% และ 2% ของปริมาตรมวลรวมทั้งหมด และพิจารณาประสิทธิภาพความต้านทานการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการทดสอบ Dynamic Creep ด้วยเครื่อง Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) และการทดสอบการยุบตัวด้วยเครื่อง Wheel Tracking ผลการทดสอบ Dynamic Creep พบว่าการผสมเศษยางบดในแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 รูปแบบขนาดละเอียดไม่ได้ส่งผลให้มีความแตกต่างของผลการทดสอบ Dynamic Creep อย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่สามารถบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการต้านทานการยุบตัวได้จากการทดสอบ Dynamic Creep ตามเงื่อนไขที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ด้านผลการทดสอบการยุบตัวด้วยเครื่อง Wheel Tracking จากการพิจารณาค่า Wheel Tracking Slope (WTS) แอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 2 รูปแบบขนาดละเอียดมีแนวโน้มเดียวกัน คือขนาดยางบดที่เล็กลงจะเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ดีขึ้น โดยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 จะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุด และปริมาณของยางบดที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้นเช่นกัน โดยการผสมยางบดในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวมจะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded ส่วนผสมที่มีเศษยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ปริมาณ 2% โดยปริมาตรมวลรวมมีความต้านทานการยุบตัวดีที่สุด โดยมีค่า WTS เท่ากับ 0.04 มิลลิเมตรต่อ 1000 รอบ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าคิดเป็น 2.10 เท่า ของส่วนผสมที่ไม่ผสมยางบด ที่มีค่า WTS เท่ากับ 0.09 มิลลิเมตรต่อ 1000 รอบ และสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded ส่วนผสมที่มีเศษยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ด้วยสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวมมีความต้านทานการยุบตัวได้ดีที่สุด โดยมีค่า WTS เท่ากับ 0.12 มิลลิเมตรต่อ 1000 รอบ โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าคิดเป็น 3.95 เท่า ของส่วนผสมที่ไม่ผสมยางบด)

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา.....2556.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5370577021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: HOT MIX ASPHALT / PERMANENT DEFORMATION / DEFORMATION RESISTANCE / CRUMB RUBBER

SIWARAK UNSIWILAI: INFLUENCES OF CRUMB RUBBER SIZE IN AGGREGATE BLEND ON DEFORMATION RESISTANCE PROPERTIES OF HOT MIX ASPHALT. ADVISOR: ASST. PROF. BOONCHAI SANGPETNGAM, Ph.D., 129 pp.

Hot mix asphalt with crumb rubber has been widely used in many countries for more than 30 years by blending scraped-tire rubber with asphalt binder, called “Crumb Rubber Modified Binder (CRMB)”. The performance of Hot Mix Asphalt using CRMB as binder is improved such that pavement distresses such as cracking, rutting are less than the conventional hot mix. But CRMB has a limitation in production process since it requires a special blending machine. This study focuses on an alternative of using crumb rubber by replacing some aggregate particles by small sized crumb rubber chips in the asphalt-aggregate mixture. This is to test whether the crumb rubber particles acting like fine-grained aggregate can improve the permanent deformation resistance of the mixture. In this study, the mixture is designed by Marshall Mix Design method for dense graded and gap graded surface layer. The mixture is blended with crumb rubber in 3 different sizes: retained on sieve #16, retained on sieve #30 and passing sieve #30. The x-sized crumb rubber is added to the mix in substitution of the same x-sized aggregate particles at the amount of 1% and 2% by the whole aggregate volume in the mixture. Permanent deformation resistance of mixture is verified by 2 testing methods; Dynamic creep test using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) and Deformation test using Wheel Tracking Device. Results from Dynamic Creep test of the two gradations show that the mixture with crumb rubber is insignificantly differ from the conventional mix (no crumb rubber added). In other words, the Dynamic Creep test conducted in this study cannot evaluate permanent deformation resistance performance of the prepared samples.

For Wheel Tracking test, permanent deformation resistance is representative by Wheel Tracking Slope (WTS). The mixture samples of both gradations show similar trends. First, an effect of crumb rubber size show that mixture with smaller sized crumb rubber performs better than mixture with larger sized one. The mixture with passing#30 crumb rubber has the best performance in the group of three sizes. Second, an effect of crumb rubber content shows that mixture with higher amount of crumb rubber has better performance than mixture with lower amount of crumb rubber. The mixture with 2% crumb rubber by aggregate volume has the best performance in the group of two crumb rubber contents. For Dense Graded mixture, conventional mixture shows WTS value = 0.09 mm/1000 cycles and mixture with 2% passing#30 crumb rubber is the best in deformation resistance performance. It shows 0.04 mm/1000 cycles in WTS term, it is 2.10 times better than conventional mix. For Gap Graded mixture, the conventional mixture shows WTS value = 0.46 mm/1000 cycles and mixture with 2% passing#30 crumb rubber has the best performance in deformation resistance. That shows 0.12 mm/1000 cycles in WTS term, it is 3.95 times better than conventional mix.

Department : Civil Engineering Student’s Signature.....
 Field of Study : Civil Engineering Advisor’s Signature.....
 Academic Year : 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สำเร็จล่วงได้เลย หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย แสงเพชรงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้แนวคิด คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัยจนสำเร็จเสร็จสิ้น รวมทั้งให้โอกาสในการทำงานต่างๆ เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์แก่ข้าพเจ้าเสมอมา จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สรวิศ นฤปิติ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. เกษม ชูจารุกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา รวมทั้งแนวคิดในการดำเนินงานวิจัยและความช่วยเหลือด้านต่างๆด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ดร. อัครพัฒน์ สว่างสุรีย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย และสำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวงที่กรุณาให้คำแนะนำ และความอนุเคราะห์ด้านสถานที่และครุภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยจนแล้วเสร็จด้วยดี

ขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการวิจัยโครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้การสนับสนุนของกองทุนรัชดาภิเษก สำหรับความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัย งานวิจัยสำเร็จล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมไปถึงครู อาจารย์ทุกท่านตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตั้งแต่พื้นฐาน ซึ่งเป็นประสบการณ์และเป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัยและการประกอบอาชีพในอนาคต

ขอขอบคุณครูปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน สำหรับแนวคิดและเทคนิคในการปฏิบัติงาน ซึ่งเสริมสร้างประสบการณ์การปฏิบัติงานแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ คุณวรรณภา กรสวัสดิ์ เจ้าหน้าที่ประสานงานฝ่ายบัณฑิตศึกษา และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือด้านต่างๆตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ที่นี้ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกคน สำหรับความช่วยเหลือ ความห่วงใย กำลังใจ ที่มีให้กันด้วยดีเสมอมา

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยสั่งสอน อบรม ดูแล ห่วงใยและใส่ใจข้าพเจ้าเป็นอย่างดี ซึ่งเป็นกำลังใจและแรงผลักดันที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถดำเนินงานสำเร็จล่วงได้ในวันนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 พฤติกรรมด้านการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	6
2.1.1 รูปแบบและสาเหตุของการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	6
2.1.2 การทดสอบที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต.....	11
2.2 มวลรวมและขนาดคละ (Aggregate and Gradation).....	23
2.2.1 คุณสมบัติของมวลรวม สำหรับการใช้งานกับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน.....	23
2.2.2 ขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน.....	29
2.3 ยางบด (Crumb Rubber).....	38
2.3.1 กระบวนการผลิตยางบด.....	38
2.3.2 ลักษณะการแปรรูปยางบดเพื่อการใช้งาน.....	41
2.4 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด (Crumb Rubber Modified Asphalt).....	42
2.4.1 ประวัติการพัฒนาวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด.....	42
2.4.2 รูปแบบการปรับปรุงคุณภาพวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบด.....	43
2.4.3 การใช้งานวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด.....	44
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมยางบดในแอสฟัลต์คอนกรีตในรูปแบบ Dry Process.....	53

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	60
3.1 กำหนดปัญหาและออกแบบการทดสอบ.....	60
3.2 ดำเนินการทดสอบ.....	65
3.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	72
3.4 สรุปผลการศึกษา.....	72
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	73
4.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	73
4.2 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วย Marshall Mix Design.....	75
4.3 การพิจารณารูปแบบการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมที่สุด.....	87
4.4 การทดสอบการต้านทานการเสีรูปลถารของแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยการทดสอบ ความคืบแบบพลวัต (Dynamic Creep).....	88
4.5 การทดสอบการต้านทานการเสีรูปลถารของแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยการทดสอบ Wheel Tracking.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	118
5.1 การสรุปผลการวิจัย.....	118
5.2 การวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	121
รายการอ้างอิง.....	124
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานวิจัย.....5
3.1	สรุปรูปแบบการทดสอบและจำนวนตัวอย่างในการทดสอบ.....70
3.2	ประมาณการณ์เวลาในการทดสอบ.....72
4.1	คุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานวิจัย จากบริษัท ไทยลูบเบส จำกัด.....73
4.2	ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม.....74
4.3	ขนาดคละแบบ Dense Graded ที่ใช้ในงานศึกษา.....76
4.4	ผลการวิเคราะห์หาค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Binder Content) สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละ Dense Graded.....77
4.5	ขนาดคละแบบ Gap Grade ที่ใช้ในงานศึกษา.....79
4.6	ผลการวิเคราะห์หาค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Binder Content) สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละ Gap Graded.....81
4.7	ผลการทดสอบ Draindown.....82
4.8	สัดส่วนโดยน้ำหนักและปริมาตรของมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded.....84
4.9	สัดส่วนโดยน้ำหนักและปริมาตรของมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded.....84
4.10	รายละเอียดด้านความถ่วงจำเพาะ น้ำหนักและปริมาตรมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded.....85
4.11	รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded เพื่อבודัดเป็นตัวอย่างทรงกระบอก.....86
4.12	รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ เพื่อבודัดเป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic Creep.....90
4.13	รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ เพื่อבודัดเป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic Creep.....91
4.14	ผลการทดสอบ Dynamic Creep ของขนาดคละแบบ Dense Graded.....95
4.15	ผลการทดสอบ Dynamic Creep ของขนาดคละแบบ Gap Graded.....95
4.16	สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ จากการทดสอบ Dynamic Creep ด้วยเครื่อง AMPT.....96

ตารางที่	หน้า
4.17 ผลการวิเคราะห์การยอมรับได้ของการทดสอบ Dynamic Creep สำหรับแอสฟัลต์ คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded.....	96
4.18 ผลการวิเคราะห์การยอมรับได้ของการทดสอบ Dynamic Creep สำหรับแอสฟัลต์ คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded.....	97
4.19 รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ เพื่อถอดเป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Wheel Tracking.....	102
4.20 รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ เพื่อถอดเป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Wheel Tracking.....	103
4.21 ผลการทดสอบ wheel tracking ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded.....	109
4.22 ผลการพิจารณาการยอมรับผลการทดสอบ wheel tracking จากค่า Proportional Rut Depth ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded.....	109
4.23 ผลการทดสอบ wheel tracking ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded.....	113
4.24 ผลการพิจารณาการยอมรับผลการทดสอบ wheel tracking จากค่า Proportional Rut Depth ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded.....	113

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ปริมาณสะสมของรอยน้ด 4 ล้อขึ้นไป ที่จัดทะเบียนต่อกรมการขนส่งทางบก ปี พ.ศ.2532 – 2554.....	1
1.2 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	5
2.1 ความเสียหายแบบร่องล้อ.....	6
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสตีเฟนของแอสฟัลต์คอนกรีตกับอุณหภูมิหรือระยะเวลา ที่แรงกระทำ.....	9
2.3 ผลการทดสอบ Creep Test ที่อุณหภูมิ 10°C และ 30°C.....	9
2.4 Master Curve ของแอสฟัลต์คอนกรีตจากข้อมูลผลการทดสอบ Creep Test.....	9
2.5 ผลจากปริมาณแอสฟัลต์ที่แตกต่างกันในแอสฟัลต์คอนกรีตต่อคุณสมบัติด้านความคืบ.....	10
2.6 ผลจากลักษณะของมวลรวมที่แตกต่างกันในแอสฟัลต์คอนกรีตต่อคุณสมบัติด้านความคืบ.....	10
2.7 การทดสอบ Unconfined Static Creep.....	12
2.8 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ Static Creep.....	12
2.9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ Repeated Load.....	13
2.10 แผนภาพแสดงผลการทดสอบ Repeated Load.....	14
2.11 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ Dynamic Modulus.....	15
2.12 เครื่องมือ Simple Performance Tester (SPT) สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง.....	17
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบ.....	19
2.14 เครื่องมือ Asphalt Pavement Analyzer (APA).....	20
2.15 ตัวอย่างภายหลังการทดสอบด้วยเครื่องมือ APA.....	20
2.16 เครื่องมือ Hamburg Wheel Tracking Device (HWT).....	21
2.17 (บน) เครื่องมือ French Rutting Tester (FRT) (ล่าง) เครื่องบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตแบบแผ่น (Slab Compactor).....	22
2.18 เครื่องมือทดสอบ Los Angeles Abrasion.....	24
2.19 ลักษณะของมวลรวม ก่อนและหลังการทดสอบ LA Abrasion.....	25
2.20 ลักษณะของมวลรวม ก่อนและหลังการทดสอบ Soundness.....	25
2.21 การทดสอบ Flat and Elongated.....	26
2.22 ลักษณะของมวลรวมที่จำแนกได้จากการทดสอบ Flat and Elongated.....	27
2.23 ชุดอุปกรณ์หาค่าน้ำหนักได้น้ำ สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่า Bulk Specific Gravity.....	28

ภาพที่	หน้า
2.24 เส้น 0.45 Power Maximum Density ของส่วนผสมมวลรวมที่มีขนาดของมวลรวมใหญ่ที่สุดขนาดต่างๆ.....	30
2.25 กราฟแสดงขนาดคละรูปแบบต่างๆ ของส่วนผสมมวลรวมที่มีขนาดของมวลรวมใหญ่ที่สุดขนาด 3/4 นิ้ว.....	31
2.26 กราฟแสดงบริเวณ Restricted Zone.....	33
2.27 โครงสร้างของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตประเภท SMA.....	34
2.28 ขนาดคละของ SMA เทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense-Graded.....	34
2.29 ความแตกต่างของโครงสร้างมวลรวม ระหว่าง SMA และแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense-Graded.....	35
2.30 การซึมผ่านของน้ำผ่านแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Open-Graded.....	36
2.31 ตัวอย่างจากการเจาะสำรวจโครงสร้างชั้นทางที่ชั้นบนสุดเป็น OGFC.....	36
2.32 กองยางรถบรรทุกเพื่อเตรียมผลิตยางบด.....	38
2.33 ขั้นตอนการย่อยยงให้เป็นชิ้นขนาด 0.5 – 1 นิ้ว.....	38
2.34 แผนภาพทำงานของการบดแบบ Ambient Grinding and Granulating.....	39
2.35 อุปกรณ์บดยางแบบ Ambient Grinding and Granulating.....	39
2.36 การบรรจุยงที่ผ่านการบดแล้ว.....	40
2.37 แผนภาพการทำงานของการบดแบบ Cryogenic Grinding.....	40
2.38 พื้นสนามเด็กเล่นที่ผลิตจากยางบด.....	41
2.39 ถนนสาย 40 ในรัฐออริโฮนา สหรัฐอเมริกา.....	43
2.40 องค์ประกอบพื้นฐานของการปรับปรุงแอสฟัลต์แบบ Wet process.....	44
2.41 องค์ประกอบของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์แบบ Continuous Blending.....	52
3.1 ผิดด้านข้างตัวอย่างที่ไม่เรียบจากการเจาะแกนกลางตัวอย่าง.....	62
3.2 LVDT ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากอุปกรณ์ยึดหลุด.....	63
3.3 อุปกรณ์ยึดจับ LVDT หลุด จากเนื้อวัสดุที่หลุดออกจากชั้นตัวอย่าง.....	63
3.4 ตัวอย่างที่ส่วนหัวไม่เรียบขณะทำการทดสอบ Dynamic Modulus.....	63
4.1 เส้นขนาดคละแบบ Dense Graded ที่ใช้ในงานศึกษา.....	76
4.2 (ซ้าย) เครื่องบดอัดอัตโนมัติแบบ Marshall (ขวา) ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Marshall Stability และ Flow.....	78
4.3 การทดสอบ Marshall Stability & Flow ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต (ซ้าย) ก่อนการทดสอบ (ขวา) หลังการทดสอบ.....	78
4.4 เส้นขนาดคละแบบ Gap Graded ที่ใช้ในงานศึกษา.....	80

ภาพที่	หน้า
4.5 ตัวอย่างหลังการทดสอบ Draindown ของงาน A, B, C และ D เรียงจากซ้ายไปขวาตามลำดับ.....	83
4.6 (ซ้าย) ตัวอย่างที่เติมยางบดขณะขั้นตอนการผสม (ขวา) ตัวอย่างที่เติมยางบดก่อนขั้นตอนการบดอัด.....	88
4.7 (ซ้าย) Gyrotory Compactor (ขวา) ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic Creep.....	90
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับรอบการทดสอบ Flow Number.....	92
4.9 รูปแบบการให้แรงกระทำและการวัดการยุบตัวของตัวอย่างต่อรอบการทดสอบด้วยเครื่อง AMPT.....	93
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรและอัตราเกิดความเครียดถาวรต่อรอบการทดสอบ.....	93
4.11 (ซ้าย) เครื่อง AMPT (ขวา) ตัวอย่างในเครื่อง AMPT ที่พร้อมทดสอบ Flow Number.....	94
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบการทดสอบกับค่า Permanent strain และ Strain Rate ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded แบบไม่ผสมยางบด ตัวอย่างที่ 1.....	94
4.13 ตัวอย่างที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense รูปแบบส่วนผสมที่ไม่มียางบด, ผสมยางบดขนาด #16 2% และผสมยางบดขนาดผ่าน #30 2% เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา (ซ้าย) ก่อนการทดสอบ (ขวา) หลังจากทดสอบ.....	95
4.14 ค่า Flow Number จากการทดสอบ Dynamic Modulus ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded.....	97
4.15 ค่า Flow Number จากการทดสอบ Dynamic Modulus ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded.....	98
4.16 การวิบัติของตัวอย่างที่ไม่ได้ระนาบจากการทดสอบ Dynamic Creep.....	99
4.17 การวิบัติจากความหนาแน่นที่ไม่สม่ำเสมอของตัวอย่าง.....	99
4.18 เครื่องบดอัดวัสดุแบบ Roller Compactor สำนักวิจัยและพัฒนาทางกรมทางหลวง.....	104
4.19 เครื่องทดสอบ Wheel Tracking สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง.....	104
4.20 ตัวอย่างแบบแผ่น หลังจากการทดสอบด้วยเครื่อง Wheel Tracking.....	106
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ร่องล้อและรอบการทดสอบ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded.....	107
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ร่องล้อและรอบการทดสอบ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Gap Graded.....	108
4.23 ความถี่ร่องล้อหลังการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded.....	110
4.24 ค่า Wheel Tracking Slope ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded.....	110

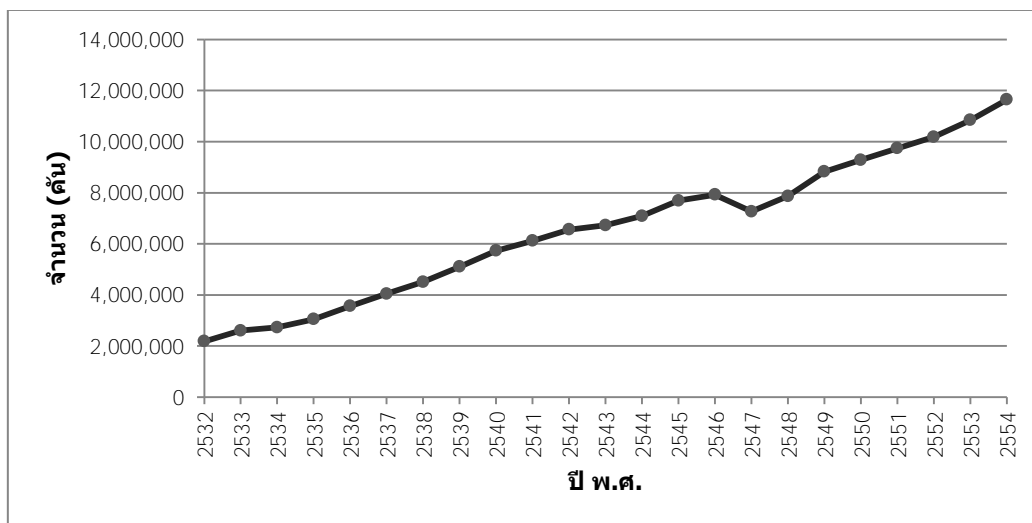
ภาพที่	หน้า
4.25 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามขนาดยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded.....	111
4.26 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามปริมาณยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded.....	112
4.27 ความถี่ร่องล้อหลังการทดสอบ ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded.....	114
4.28 ค่า Wheel Tracking Slope ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded.....	114
4.29 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามขนาดยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded.....	115
4.30 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามปริมาณยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded.....	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากอดีตจนถึงปัจจุบันยอดการจดทะเบียนรถยนต์ใหม่ (ยานพาหนะทุกชนิด ยกเว้นรถจักรยานยนต์ รถยนต์สามล้อรับจ้าง และรถเฉพาะกิจกรรม เช่น รถไถ เป็นต้น) ในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี หากพิจารณาปริมาณสะสมของรถยนต์ที่จดทะเบียนต่อกรมการขนส่งทางบก ข้อมูลเมื่อสิ้นปี พ.ศ.2554 พบว่าประเทศไทยมียอดรถยนต์จดทะเบียนสะสมโดยประมาณที่ 12 ล้านคัน[1] จากปริมาณรถยนต์ที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นตามมา คือ ยางรถยนต์ที่หมดสภาพจากการใช้งานของรถยนต์แต่ละคันจะกลายเป็นขยะปริมาณมหาศาลตามไปด้วย จึงต้องมีวิธีการกำจัดขยะเหล่านี้ได้อย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาต่างๆตามมา เช่น การกำจัดยางรถยนต์ด้วยกรรมวิธีที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม หรือการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น



ภาพที่ 1.1 ปริมาณสะสมของรถยนต์ 4 ล้อขึ้นไป ที่จดทะเบียนต่อกรมการขนส่งทางบก
ปี พ.ศ.2532 – 2554

(กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก,2555: ออนไลน์)

นอกจากปัญหาด้านขยะจากยางรถยนต์ที่หมดสภาพการใช้งานแล้ว อีกปัญหาหนึ่งจากปริมาณรถยนต์สะสมที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง คือ ปริมาณจราจรบนสายทางต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เกิดน้ำหนักระทำซ้ำกับผิวทางมากเกินไปกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบอายุการให้บริการของผิวทาง เร่งให้เกิดความเสียหายบนผิวทางมากขึ้นและผิวทางมีอายุการใช้งานน้อยลงกว่า

ที่ควรจะเป็น จากการศึกษาของ ธันวิน สวัสดิ์ศานต์ และคณะ[2] โดยดำเนินการสำรวจความเสียหายของผิวทางตามสายทางต่างๆ 273 แห่งทั่วประเทศ พบว่าความเสียหายบนผิวทางที่เกิดมากที่สุด 3 อันดับแรก คือ ร่องล้อ (Rutting) ร้อยละ 67 รอยแตกตามยาว (Longitudinal Crack) ร้อยละ 53 และรอยแตกเชื่อมต่อในแนวล้อ (Alligator Crack) ร้อยละ 40 จากผลการศึกษาข้างชี้ให้เห็นว่าปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผิวทางสำหรับถนนในประเทศไทย คือ การเสีรูปร่างของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างผิวทางซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดความเสียหายแบบร่องล้อ

จากการศึกษาของต่างประเทศตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พบว่าการนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาบดและผสมลงไปเป็นส่วนหนึ่งของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน ไม่ว่าจะเป็นการผสมลงไปเป็นส่วนหนึ่งของแอสฟัลต์หรือการผสมลงไปเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม โดยเรียกการปรับปรุงคุณภาพลักษณะนี้ว่า Crumb Rubber Modified Asphalt (CRMA) สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนได้ นับเป็นการดีที่ขยะซึ่งมาจากรถยนต์ที่สร้างความเสียหายให้กับถนนสามารถเพิ่มคุณสมบัติและประสิทธิภาพให้กับวัสดุผิวทางได้

แต่ผลการศึกษาจากต่างประเทศย่อมมีข้อจำกัดบางประการที่ไม่สามารถนำงานศึกษาดังกล่าวมาใช้งานสำหรับประเทศไทยได้ทันที เนื่องจากลักษณะเฉพาะบางประการที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นแล้วในประเทศไทยยังไม่มีผลการศึกษาที่แน่ชัดซึ่งเกี่ยวข้องเนื่องกับการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุชั้นผิวทางโดยการใช้เศษยางบดและรายละเอียดปลีกย่อยที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการนำเศษยางบดไปใช้งานในวัสดุผิวทาง เช่น ขนาดและปริมาณของเศษยางที่เหมาะสม หรือผลของการผสมเศษยางบดลงในแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ขนาดคละต่างๆกัน เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ผสมด้วยเศษยางบด เพื่อเพิ่มเติมหรือแทนที่ในส่วนผสมมวลรวมที่ขนาดคละต่างๆ และศึกษาคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรูปร่างของผิวทาง ภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่างๆที่สอดคล้องกับสภาพการนำมาใช้งานสำหรับประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยวัตถุประสงค์หลัก 3 ข้อ คือ

1. เพื่อศึกษาศักยภาพในการใช้เศษยางบด (Crumb Rubber) ผสมเป็นส่วนหนึ่งในมวลรวมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน
2. เพื่อศึกษาหาขั้นตอนที่เหมาะสมในการผสมเศษยางบดกับมวลรวมระหว่างการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน
3. เพื่อศึกษาผลของขนาดและปริมาณของเศษยางบดสำหรับขนาดคละ(Gradation) แต่ละชนิดของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน ที่มีต่อพฤติกรรมด้านการต้านทานการเสีรูปร่างของวัสดุผสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

จากที่กล่าวมาข้างต้น เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการปรับปรุงประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน โดยการผสมเศษยางบดเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม โดยมีขอบเขตของการวิจัยเพื่อให้เกิดความชัดเจนในการดำเนินการ ดังนี้

1. ขนาดคละของมวลรวม (gradation) สำหรับงานวิจัยนี้ ให้ความสนใจกับขนาดคละ 2 แบบ คือ ขนาดคละแบบแน่น (dense graded) และขนาดคละแบบช่องว่าง (gap graded)
2. มวลรวมประเภทหิน เลือกใช้หินปูน (limestone) ขนาดต่างๆที่ใช้ในการก่อสร้างถนน โดยทั่วไป ซึ่งสัดส่วนของมวลรวมแต่ละขนาดเป็นไปตามขนาดคละที่เลือกใช้
3. มวลรวมประเภทเศษยางบด เลือกใช้เศษยางบดที่แปรรูปด้วยการบดรูปแบบแห้งในอุณหภูมิปกติ (Ambient Grinding and Granulating) จากยางรถยนต์ที่หมดสภาพการใช้งานแล้ว โดยขนาดของยางบดที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ
 - กลุ่มที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และค้ำบนเบอร์ 16
 - กลุ่มที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำบนเบอร์ 30
 - กลุ่มที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30
4. แอสฟัลต์ที่ใช้ เลือกใช้แอสฟัลต์เกรด AC 60/70 สำหรับขนาดคละแบบ dense graded และ gap graded
5. รูปแบบการออกแบบส่วนผสมที่เลือกใช้ คือ การออกแบบส่วนผสมแบบ Marshall
6. การทดสอบหลัก ผลลัพธ์ของการทดสอบจะต้องสะท้อนถึงคุณสมบัติด้านการเกิดการเสีรูปร่าง หรือการเกิดร่องล้อบนแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ผ่านการบดอัดแล้ว คือ การทดสอบความคืบแบบพลวัต (Dynamic Creep) และการทดสอบการเกิดร่องล้อของวัสดุด้วย Wheel Tracking

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

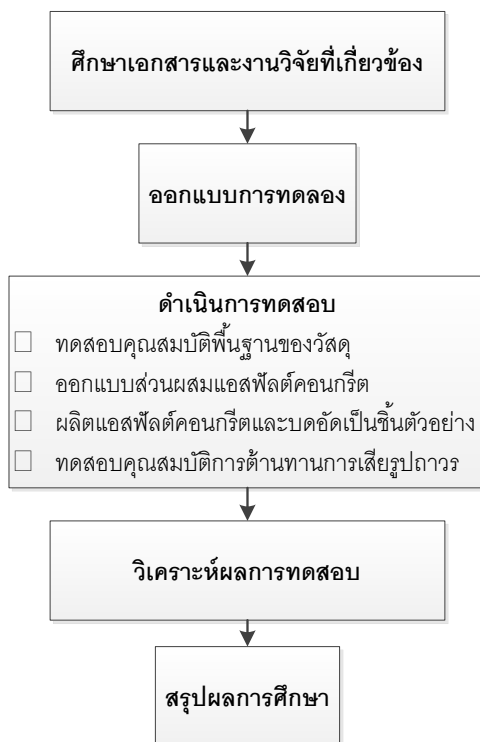
หลังจากงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ สิ่งที่จะคาดว่าจะได้รับจากการดำเนินงานวิจัยหัวข้อนี้มีดังนี้

1. ทราบถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป จากการที่มวลรวมมีเศษยางบดเป็นส่วนผสม
2. นำไปสู่ประโยชน์ในการเพิ่มอายุการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน
3. ได้วิธีการกำจัดขยะจากยางรถยนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากลดปริมาณการกำจัดยางรถยนต์โดยการเผาหรือฝัง ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม
4. เป็นการเพิ่มประโยชน์และมูลค่าให้กับเศษยางบด จากปัจจุบันมีการนำไปใช้งานประเภทอื่นๆ เช่น เชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนสูง โรยสนามหญ้าเทียม สนามเด็กเล่น เป็นต้น

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนด้วยเศษยางบด หรือ Crumb Rubber Modified Asphalt (CRM) สามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ แบ่งได้เป็น 2 วิธีการหลัก คือ การผสมเศษยางบดลงในแอสฟัลต์ เรียกกันโดยทั่วไปว่า Wet Process และการผสมหรือเพิ่มเศษยางบดเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวม เรียกว่า Dry Process ทั้งสองกรรมวิธีมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันไป แต่มีจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมให้กับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนสำหรับงานวิจัยนี้มุ่งไปที่การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีการแบบ Dry Process เนื่องจากจุดเด่นด้านความสะดวกในการประยุกต์ใช้กับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งไม่มีความแตกต่างจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนโดยทั่วไป แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเศษยางบดแบบ Dry Process สามารถดำเนินการผลิตด้วยเครื่องจักรชุดเดิมสำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบทั่วไปได้ทันที ซึ่งแตกต่างจากการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเศษยางบดแบบ Wet Process ที่ต้องเพิ่มเครื่องจักรหลายประเภทในกระบวนการผลิตซึ่งมีราคาสูง นอกจากนี้ยังส่งผลให้กระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

การดำเนินงานเริ่มจากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยต่างๆ ที่มีประเด็นเกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น ขั้นตอนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเศษยางบด ปัจจัยต่างๆที่จะส่งผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน อาทิ ขนาดและปริมาณของเศษยางบดที่อยู่ในส่วนผสม รวมไปถึงการทดสอบรูปแบบต่างๆ ที่แสดงถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรูรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต จากนั้นออกแบบการทดลองเพื่อให้ครอบคลุมทุกปัจจัยที่ต้องการศึกษา แล้วดำเนินการผลิตตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆที่ต้องการทราบ โดยเริ่มจากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุแต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนว่ามีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานหรือไม่ แล้วจึงออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานการก่อสร้างสายทาง หลังจากนั้นผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตตามส่วนผสมที่ออกแบบไว้และบดอัดเพื่อให้ได้ตัวอย่างรูปแบบต่างๆ ตามมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้ระบุ แล้วดำเนินการทดสอบคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรูถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต นำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปจากการผสมด้วยเศษยางบด จากนั้นสรุปผลการศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดแผนการดำเนินงานโดยประมาณ ซึ่งคาดว่าจะใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานทั้งสิ้น 8 เดือน โดยมีรายละเอียดดังแสดงโดยตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	ร้อยละของงานวิทยานิพนธ์								
	สัดส่วนงาน	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10%	5	5						
2. ออกแบบการทดลอง	10%		5	5					
3. ดำเนินการทดสอบ	50%			15	15	15	5		
4. วิเคราะห์ผลการทดสอบ	20%						10	10	
5. สรุปผลการศึกษา	10%							5	5
สัดส่วนงานรวมในแต่ละเดือน	100%	5	10	20	15	15	15	15	5
สัดส่วนงานรวมสะสม	100%	5	15	35	50	65	80	95	100

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พฤติกรรมด้านการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต

2.1.1 รูปแบบและสาเหตุของการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต

พฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นผิวทางของถนน เป็นสาเหตุหลักของความเสียหายรูปแบบยุบตัวตามแนวร่องล้อ หรือ Rutting โดยเป็นความเสียหายที่พบมากที่สุดของสายทางในประเทศไทย ผิวทางที่เกิดความเสียหายรูปแบบนี้จะมีลักษณะยุบตัวเป็นแอ่งยาวตามทิศทางการเคลื่อนที่ของรถและบางส่วนของวัสดุผิวทางจะถูกดันออกไปทางด้านข้าง บางกรณีอาจมีการปูดนูนของผิวทางเป็นขอบของร่องล้ออย่างชัดเจน โดยความเสียหายจะเกิดหลังจากผ่านการใช้งานภายใต้เงื่อนไขของระยะเวลา ปริมาณจราจร และน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะที่กระทำต่อโครงสร้างชั้นทาง โดยทั่วไป สามารถจำแนกรูปแบบการเกิด Rutting ได้ 2 รูปแบบ คือ

- Mix Rutting คือ การยุบตัวเป็นร่องล้อที่เกิดขึ้นบนวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตชั้นผิวทาง โดยที่ไม่เกิดความเสียหายขึ้นกับชั้นดินคั่นทางแต่อย่างใด
- Subgrade Rutting คือ การยุบตัวเป็นร่องล้อโดยชั้นดินคั่นทางเกิดการยุบตัวแล้วส่งผลให้ชั้นผิวทางยุบตัวเป็นร่องล้อตามไปด้วย

ปัญหาที่ตามมา จากการเกิดความเสียหายแบบร่องล้อมีหลายประการ เช่น สภาพการให้บริการของสายทางที่ลดลงทำให้เกิดความรู้สึกไม่สบายเมื่อขับขี่ นอกจากนั้นแล้วยังส่งผลถึงความปลอดภัย เนื่องจากหากมีน้ำขังอยู่ในร่องล้อและรถขับขี่ผ่านด้วยความเร็วสูง รถยนต์จะเกิดสภาพเหินน้ำ (Hydroplaning) ส่งผลให้ควบคุมรถได้ลำบาก หรือการเปลี่ยนช่องจราจรผ่านบริเวณที่เป็นขอบที่ปูดนูนของร่องล้อ ส่งผลให้ควบคุมรถได้ลำบากมากขึ้นเช่นเดียวกัน[3]



ภาพที่ 2.1 ความเสียหายแบบร่องล้อ
(Pavement Interactive,2012: Online)

ระดับของความรุนแรงของความเสียหายแบบร่องล้อ สามารถวัดได้โดยการพิจารณาที่ ความลึกของร่องล้อที่วัสดุยุบตัวลงไป ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง[4] แบ่งระดับความ รุนแรงของความเสียหายออกเป็น 3 ระดับ คือ

- ระดับต่ำ ร่องล้อมีความลึกเฉลี่ย ระหว่าง 6 ถึง 12 มิลลิเมตร
- ระดับกลาง ร่องล้อมีความลึกเฉลี่ย ระหว่าง 12 ถึง 25 มิลลิเมตร
- ระดับสูง ร่องล้อมีความลึกเฉลี่ย มากกว่า 25 มิลลิเมตรขึ้นไป

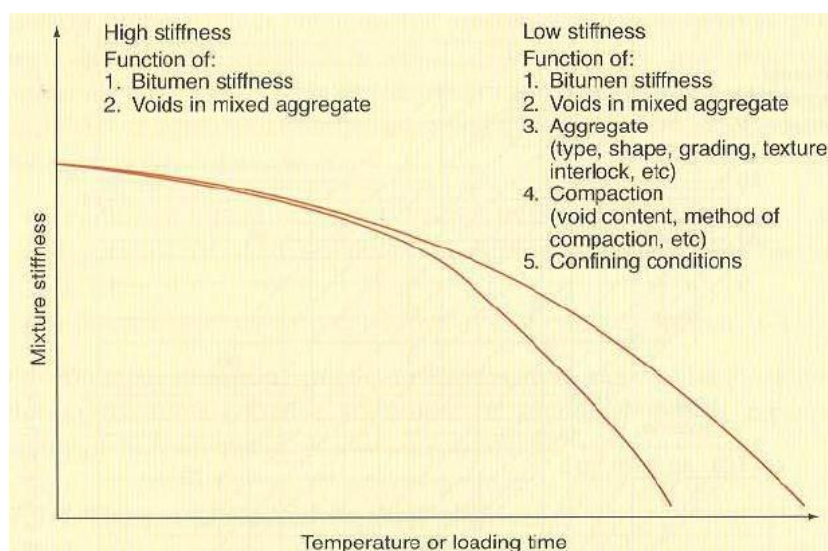
Roberts et al.[5] กล่าวไว้ว่า หากความลึกของร่องล้อยู่ที่ 0.5 นิ้ว (13 มิลลิเมตร) จะ ส่งผลให้ดัชนีระดับการให้บริการ (Present Serviceability Index: PSI) ลดลงถึง 0.35 หน่วย และเป็นความลึกในระดับที่เริ่มก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยในการขับขี่บนสายทางอีกด้วย

สาเหตุของการเกิดความเสียหายแบบร่องล้อมีหลายประการ เมื่อพิจารณาถึงลักษณะ ของความเสียหายแล้วพบว่าประเด็นที่ก่อให้เกิดความเสียหาย ไม่ว่าจะเป็นการเกิดร่องล้อแบบใด ก็ตาม คือ การที่วัสดุงานทางไม่สามารถต้านการยุบตัวในแนวตั้งร่วมกับการเคลื่อนตัวออกทาง ข้างของวัสดุ ซึ่งหมายรวมทั้งแอสฟัลต์คอนกรีตในชั้นผิวทางและดินคั่นทางเดิม หากพิจารณา สาเหตุแบบเฉพาะเจาะจงนั้นสามารถระบุเป็นปัญหาหลักได้ดังนี้

- การบดอัดวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตขณะก่อสร้างถนนน้อยเกินไป จนทำให้ชั้นผิวทางมี ความหนาแน่นน้อยกว่าปกติไม่เป็นไปตามค่าที่ออกแบบไว้ ทำให้วัสดุชั้นผิวทาง สามารถยุบตัวได้อีกเมื่อได้รับแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกซัๆเป็นระยะเวลาหนึ่ง
- ดินคั่นทางเดิมมีความแข็งแรงต่ำ ไม่สามารถรับแรงกระทำได้มากหรือดินคั่นทาง สูญเสียความแข็งแรงจากความชื้นที่เพิ่มมากขึ้น หากออกแบบโครงสร้างชั้นทางให้มี ความแข็งแรงน้อยเกินไปหรือไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพของดินคั่นทางก่อนก่อสร้างสาย ทาง เมื่อสายทางผ่านการใช้งานภายในแรงกระทำซ้ำเป็นระยะเวลานาน ดินคั่นทาง จะเกิดการเสียรูปยุบตัวตามแนวร่องล้อ ส่งผลให้ชั้นผิวทางเกิดการเสียรูปตามไปด้วย
- การออกแบบส่วนผสมที่ไม่เหมาะสมและการเลือกใช้วัสดุงานทางที่มีคุณลักษณะไม่ เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เช่น เลือกใช้แอสฟัลต์ที่มีความนิ่มเกินไป (Penetration สูงเกินไป) ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมมากเกินไป หรือการ เลือกใช้มวลรวมที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมนน้อยเกินไป เป็นต้น

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุงานทาง ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการเสีย รูปแบบถาวรอันเป็นสาเหตุของการเกิดความเสียหายแบบร่องล้อ Read and Whiteoak[6] ได้ ให้ข้อสรุปไว้ว่า การเสียรูปแบบถาวรจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตถูกกระทำภายใต้ เงื่อนไขต่างๆจนอยู่สถานะที่มีสติฟเนส (Stiffness) ต่ำ เช่น ถูกกระทำในสถานะอุณหภูมิสูงหรือ ถูกแรงกระทำเป็นระยะเวลานาน จากการศึกษาเมื่อแอสฟัลต์มีสติฟเนสต่ำ คือน้อยกว่า 0.5 MPa พฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีความซับซ้อนมากขึ้น โดยภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว สติฟเนสของแอสฟัลต์คอนกรีตจะไม่ได้ขึ้นกับสติฟเนสของแอสฟัลต์และช่องว่างในแอสฟัลต์

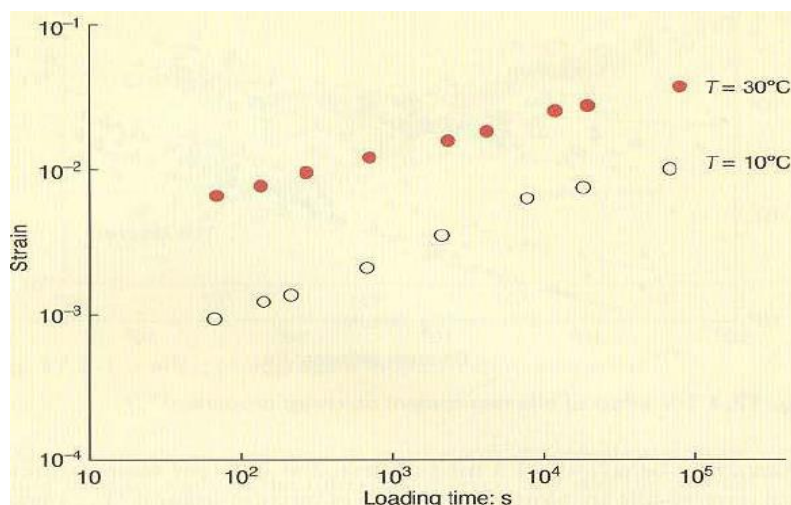
คอนกรีตเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของมวลรวม คือ ขนาดคละ รูปร่างของมวลรวม ลักษณะของพื้นผิวมวลรวม และการเกี่ยวประสานกันของมวลรวมด้วย นอกจากนั้นแล้วรูปแบบและระดับของการบดอัดก็ส่งผลต่อการเกิดการเสียรูปแบบถาวรเช่นเดียวกัน



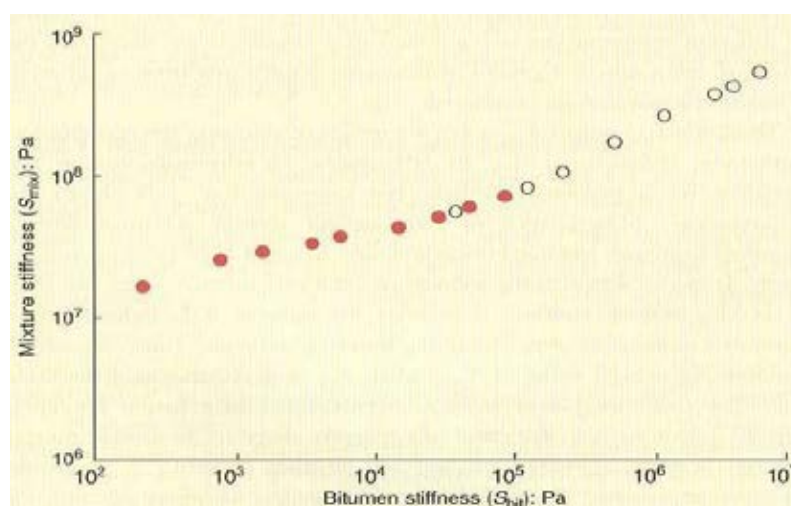
ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสของแอสฟัลต์คอนกรีตกับอุณหภูมิหรือระยะเวลาที่แรงกระทำ

(Read and Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, 5th Edition)

ผลจากการทดสอบความคืบ (Creep Test) (รายละเอียดในหัวข้อ 2.1.2) เป็นรูปแบบการทดสอบที่สะท้อนถึงพฤติกรรมของการเกิดการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ง่ายที่สุด จากผลการศึกษาที่ทำการทดสอบความคืบของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตใดๆ ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อวัสดุรับแรงกระทำเข้าเป็นเวลานานมากขึ้น ความเครียด (Strain) ของวัสดุจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาที่รับแรงกระทำเป็นเวลานานเท่ากัน ที่อุณหภูมิทดสอบที่สูงกว่าจะเกิดความเครียดบนวัสดุสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.3 และหากนำชุดข้อมูลดังกล่าวไปหาความสัมพันธ์ระหว่างสติฟเนสของแอสฟัลต์คอนกรีต (S_{mix}) และสติฟเนสของแอสฟัลต์ (S_{bit}) ความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องเส้นหนึ่งเรียกว่า Master Curve ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ทำให้สามารถคาดการณ์คุณลักษณะด้านการเสียรูปถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปได้โดยไม่ต้องทดสอบที่ทุกระดับอุณหภูมิที่ต้องการ นอกจากนั้นสามารถคาดการณ์ผลของการใช้แอสฟัลต์ในแต่ละเกรดหรือระดับของแรงกระทำที่แตกต่างกัน ที่ส่งผลต่อการเสียรูปถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตได้เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.3 ผลการทดสอบ Creep Test ที่อุณหภูมิ 10°C และ 30°C
(Read and Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, 5th Edition)

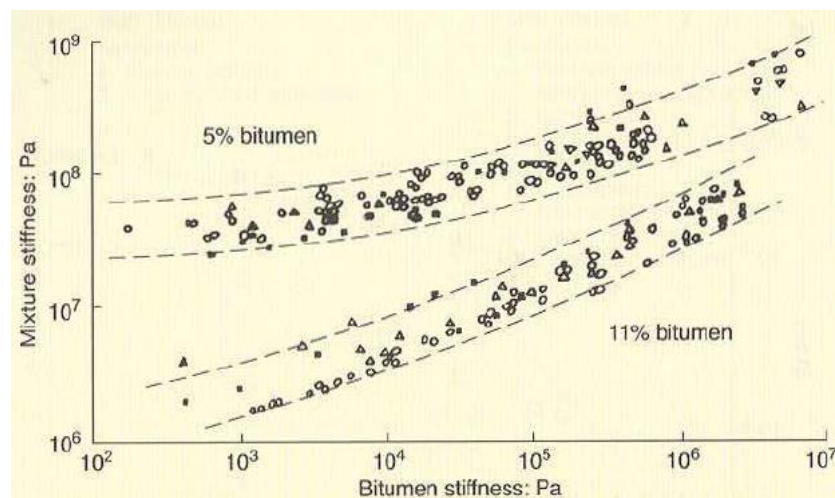


ภาพที่ 2.4 Master Curve ของแอสฟัลต์คอนกรีตจากข้อมูลผลการทดสอบ Creep Test
(Read and Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, 5th Edition)

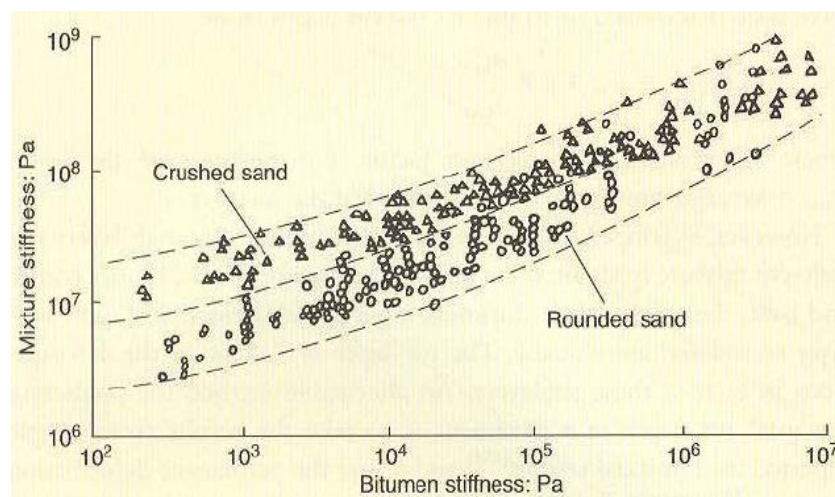
โดยแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง S_{mix} และ S_{bit} เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ประเมินความต้านทานการเสีรูปแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเป็นความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นและนำไปใช้ประเมินได้กับทุกเงื่อนไขการทดสอบที่ต้องการสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตใดๆก็ตาม ตัวอย่างดังภาพที่ 2.5 แสดงถึงลักษณะการเสีรูปของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละและมวลรวมแบบเดียวกัน โดยมีปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมที่แตกต่างกัน คือ 5% และ 11% ซึ่งจะเห็นได้ว่าหากใช้แอสฟัลต์ที่มีสตีเฟนสเท่ากัน ส่วนผสมที่มีปริมาณแอสฟัลต์มากกว่าจะมีค่าสตีเฟนสของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ต่ำกว่า แสดงถึงการที่ใช้แอสฟัลต์ประเภทเดียวกันหากใช้แอสฟัลต์ปริมาณมากกว่า ย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปต่ำกว่าตามไปด้วย หรือ

กล่าวได้นัยหนึ่ง คือ หากส่วนผสมใดให้ค่าสติฟเนสของแอสฟัลต์คอนกรีตที่สูงโดยที่ใช้แอสฟัลต์ที่มีค่าสติฟเนสต่ำ ย่อมมีคุณสมบัติต้านทานการเสีรูปร่างในระยะยาวที่ดีกว่า

ในลักษณะเดียวกัน หากพิจารณาผลของลักษณะของมวลรวมที่มีผลต่อพฤติกรรมการเสีรูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการทดสอบควบคุมขนาดคละ ปริมาณแอสฟัลต์รวมถึงเงื่อนไขอื่นๆเหมือนกัน แตกต่างที่ลักษณะของมวลรวมที่มีลักษณะเป็นเม็ดกลม (Rounded Sand) และเม็ดเหลี่ยม (Crushed Sand) จากผลการทดสอบดังภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่ามวลรวมที่มีลักษณะเม็ดกลมมีความต้านทานการเสีรูปร่างต่ำกว่าการใช้มวลรวมแบบที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม



ภาพที่ 2.5 ผลจากปริมาณแอสฟัลต์ที่ต่างกัน ในแอสฟัลต์คอนกรีตต่อคุณสมบัติต้านความคืบ (Read and Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, 5th Edition)



ภาพที่ 2.6 ผลจากลักษณะของมวลรวมที่ต่างกัน ในแอสฟัลต์คอนกรีตต่อคุณสมบัติต้านความคืบ

(Read and Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, 5th Edition)

2.1.2 การทดสอบที่เกี่ยวข้องเนื่องกับพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต

การทดสอบตามมาตรฐานการออกแบบผิวทางรูปแบบเก่า เช่น การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธี Marshall การทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตจะได้ผลลัพธ์ 2 ค่า คือ เสถียรภาพ (Stability) และการไหล (Flow) ซึ่งค่าทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการเสียรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตมากนัก อีกทั้งยังไม่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะหรือสาเหตุของความเสียหายรูปแบบต่างๆได้[7] จึงมีการพัฒนาการทดสอบรูปแบบต่างๆในห้องปฏิบัติการขึ้น โดยเงื่อนไขในการทดสอบจะจำลองลักษณะการกระทำที่เกิดขึ้นต่อวัสดุเมื่อวัสดุตั้งกล่าวอยู่ในสภาวะใช้งานจริงได้มากน้อยแตกต่างกันไปตามรูปแบบการทดสอบ ระหว่างการทดสอบจะมีการตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของปัจจัยด้านต่างๆที่เกิดขึ้นกับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น ความเค้น ความเครียด การเสียสภาพ ฯลฯ โดยปัจจัยด้านต่างๆที่ตรวจวัดย่อมมีความสัมพันธ์ในลักษณะใดลักษณะหนึ่งกับความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่วัสดุจากสภาวะการใช้งานจริง โดยรูปแบบความเสียหายแบบร่องล้อ หรือการเสียรูปแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต มีการทดสอบต่างๆที่เกี่ยวข้องและเป็นที่นิยมใช้ในการทดสอบอย่างแพร่หลายดังต่อไปนี้[8]

2.1.2.1 Static Creep Tests

การทดสอบความคืบแบบสถิต หรือ Static Creep Test เป็นการทดสอบโดยการให้แรงกระทำกับตัวอย่างด้วยแรงคงที่ค่าหนึ่ง เป็นระยะเวลาหนึ่งแล้วจึงปล่อยแรงกระทำต่อตัวอย่างหลังจากนั้นวัดการยุบตัวที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านทานการเกิดความเสียหายแบบร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต หากมีการยุบตัวมากแสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเกิดร่องล้อต่ำ โดยการทดสอบรูปแบบนี้เป็นที่นิยมในอดีตเนื่องจากความง่ายในการทดสอบ แต่ผลการทดสอบที่ได้ไม่มีความสัมพันธ์กับการเกิดร่องล้อบนผิวทางจากการใช้งานจริงมากนัก

การทดสอบความคืบแบบสถิต สามารถแบ่งได้ดังนี้

- Unconfined Static Creep Test

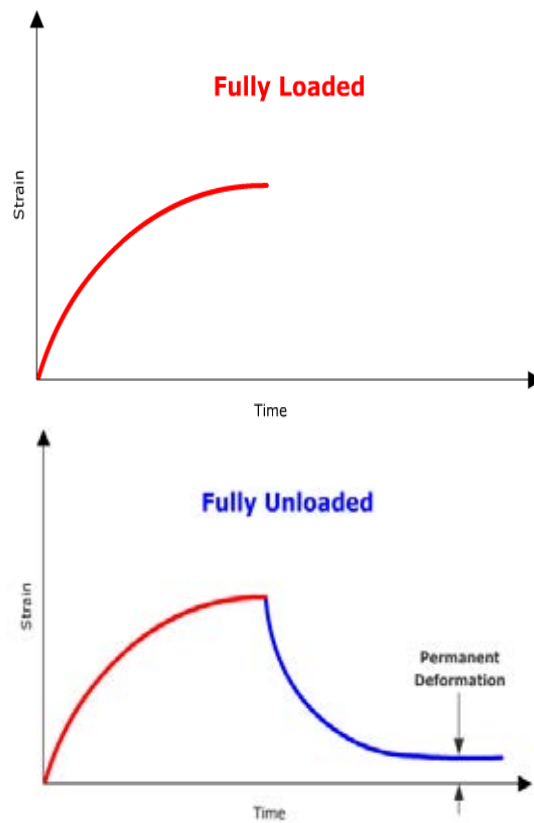
การทดสอบนี้เป็นที่นิยมเรียกว่า Simple Creep Test หรือ Uniaxial Creep Test เป็นรูปแบบการทดสอบที่นิยมมากที่สุดเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำและทดสอบได้ง่าย โดยการทดสอบจะให้แรง 100 kPa แก่ตัวอย่างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C หลังจากนั้นปล่อยแรงกระทำและวัดค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้น แต่จุดด้อยคือ ลักษณะการทดสอบไม่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงมากนัก

- Confined Static Creep Test

หรือเรียกอีกชื่อหนึ่ง คือ Triaxial Creep Test โดยรูปแบบการทดสอบใกล้เคียงกับการทดสอบแบบ Unconfined Static Creep แต่เพิ่มการให้แรงดันด้านข้างขนาด 138 kPa เพื่อจำลองสภาพให้ใกล้เคียงกับเงื่อนไขในสนามมากยิ่งขึ้น เนื่องจากวัสดุในสภาพจริงจะได้รับแรงกระทำด้านข้างจากแรงกระทำของเนื้อวัสดุที่อยู่รอบจุดสนใจ



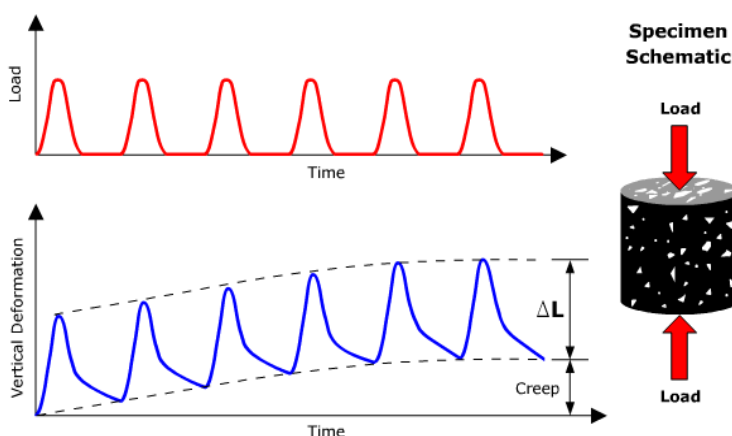
ภาพที่ 2.7 การทดสอบ Unconfined Static Creep
(Pavement Interactive,2012: Online)



ภาพที่ 2.8 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ Static Creep
(Pavement Interactive,2012: Online)

2.1.2.2 Repeated Load Tests

การทดสอบโดยให้แรงกระทำซ้ำ หรือ Repeated Load Test มีรูปแบบการทดสอบโดยการให้แรงกระทำในแนวตั้งกับตัวอย่างรูปทรงกระบอก โดยขนาดของแรงที่กระทำต่อตัวอย่างจะมีขนาดคงที่ด้วยความถี่ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาต่อรอบการทดสอบจะเท่ากัน แบ่งเป็นระยะเวลาที่ตัวอย่างได้รับแรงกระทำและระยะเวลาที่ปล่อยแรงกระทำ นับเป็น 1 รอบการทดสอบ ซึ่งแต่ละรอบของการทดสอบวัสดุจะเกิดการยุบตัวถาวรในแนวตั้งขึ้น และเกิดการขยายตัวในแนวราบ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยสามารถคำนวณค่า Resilient Modulus ของตัวอย่างได้จากการเสียรูปในแนวตั้งร่วมกับอัตราส่วนปึงซอง (Poisson Ratio) ที่สมมติขึ้น การเสียรูปถาวรสะสมที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับจำนวนรอบที่ทำการทดสอบซึ่งสามารถเชื่อมโยงกับการเกิดร่องล้อเมื่อมีปริมาณจราจรกระทำบนผิวทางจริงได้ โดยการทดสอบรูปแบบนี้ จะกำหนดแรงกระทำในแนวตั้งและอุณหภูมิในการทดสอบที่แตกต่างกันไปในแต่ละมาตรฐานการทดสอบ ขึ้นกับจุดประสงค์ของแต่ละมาตรฐานการทดสอบนั้นๆ



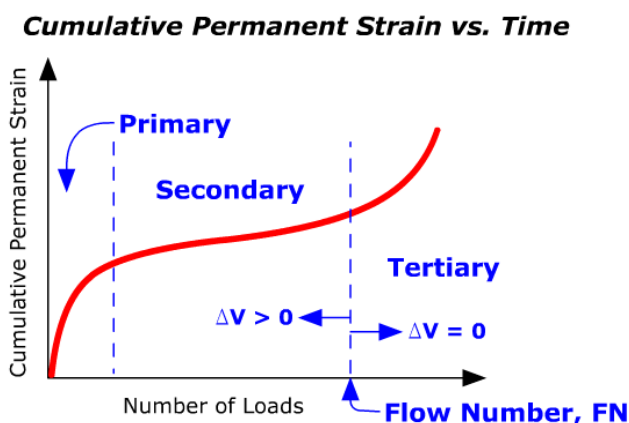
ภาพที่ 2.9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ Repeated Load (Pavement Interactive, 2012: Online)

โดยส่วนใหญ่ผลการทดสอบ Repeated Load จะแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสะสมในแนวตั้งของตัวอย่างกับจำนวนรอบการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 โดยค่าที่ใช้ในการอ้างอิงเปรียบเทียบระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตแต่ละแบบคือค่า Flow Number (FN) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนรอบที่แรงกระทำต่อตัวอย่างจนเริ่มเกิดสภาพการไหลช่วงที่สาม (Tertiary Flow) ขึ้น โดยสามารถอธิบายการเกิดสภาพการไหลทั้งสามช่วงได้ดังนี้

- การไหลช่วงที่หนึ่ง (Primary Flow) เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดสะสมต่อจำนวนรอบทดสอบ จะเป็นช่วงของการเริ่มต้นการทดสอบจนถึงจุดที่เส้นกราฟเปลี่ยนความโค้งครั้งแรก หากเปรียบเทียบกับสภาวะการใช้งานจริงของ

สายทาง จะแสดงถึงช่วงตั้งแต่เริ่มเปิดให้บริการสายทางแล้วผิวทางเกิดการทรุดตัวอย่างรวดเร็วจากการบดอัดวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตให้ไม่ถึงจุดที่มีความหนาแน่นสูงสุดขณะก่อสร้าง เมื่อวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตรับแรงกระทำจากปริมาณจราจรจะขยับและเคลื่อนตัวจนมีความแน่นที่มากขึ้นอย่างรวดเร็ว

- การไหลช่วงที่สอง (Secondary Flow) เมื่อพิจารณาจากกราฟ คือ ช่วงตั้งแต่จุดเปลี่ยนความโค้งที่หนึ่งจนถึงจุดเปลี่ยนความโค้งที่สอง ในสภาวะการใช้งานจริงของสายทาง วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตถูกบดอัดจนถึงจุดที่มีความหนาแน่นสูงสุดและเริ่มเกิดการเสีรูบอย่างถาวรอย่างช้าๆและต่อเนื่อง
- การไหลช่วงที่สาม (Tertiary Flow) คือ เมื่อพิจารณาจากกราฟ คือ ช่วงตั้งแต่จุดเปลี่ยนความโค้งครั้งที่สองจนกระทั่งเสร็จสิ้นการทดสอบ ในสภาวะการใช้งานจริงของสายทาง วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะถึงขีดจำกัดของการรักษาสภาพการคงรูปไว้ได้ และเกิดการเสีรูบอย่างขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถนนพังในที่สุด ซึ่งจุดเริ่มของการเกิดสภาพการไหลช่วงที่สาม คือค่า Flow Number



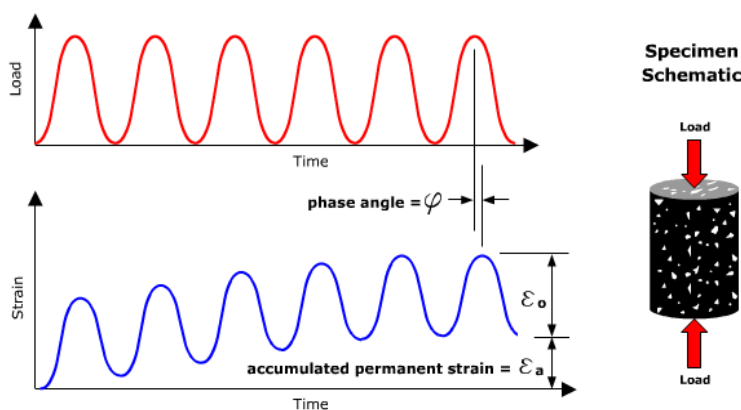
ภาพที่ 2.10 แผนภาพแสดงผลการทดสอบ Repeated Load
(Pavement Interactive,2012: Online)

การทดสอบภายใต้แรงกระทำซ้ำ สามารถแบ่งออกได้เป็น

- Unconfined Repeated Load Test
เป็นการทดสอบที่ง่าย เนื่องจากไม่ต้องให้แรงกระทำด้านข้างแก่ตัวอย่าง แต่มีจุดด้อยเช่นเดียวกับการทดสอบ Unconfined Static Creep คือ เงื่อนไขการทดสอบไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากนัก
- Confined Repeated Load Test
เป็นการทดสอบที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น โดยการให้แรงกระทำด้านข้างแก่ตัวอย่าง ในลักษณะเดียวกันกับ Confined Static Creep เพื่อจำลองเงื่อนไขการทดสอบให้ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

2.1.2.3 Dynamic Modulus Tests

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่า Dynamic Modulus โดยการให้แรงกระทำซ้ำคงที่ขนาดหนึ่งๆ และระยะเวลาในการให้แรงต่อรอบ(ความถี่) ที่คงที่ให้แก่ตัวอย่างในแนวตั้ง ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิแตกต่างกันและใช้ความถี่ในการให้แรงที่แตกต่างกัน 3 ค่า (ปกติจะใช้ค่าความถี่ที่ 1 4 และ 16 Hz) โดยลักษณะของแรงกระทำต่อตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นคลื่นต่อเนื่องแบบ Haversine (ลักษณะของคลื่นเป็นส่วนกลับของกราฟ Cosine ที่มีการขยับแกนขนาดของแรงไปเป็นขนาดครึ่งหนึ่งของแอมพลิจูดของคลื่น หากมองโดยภาพรวมแล้วคลื่นแบบ Haversine ที่ต่อเนื่องจะมีลักษณะเหมือนคลื่น sine ที่มีแอมพลิจูดต่ำสุดเท่ากับ 0) ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าต่างๆจากการทดสอบ เป็นไปดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ Dynamic Modulus (Pavement Interactive,2012: Online)

สิ่งที่แตกต่างระหว่างระหว่างการทดสอบ Dynamic Modulus กับการทดสอบแบบ Repeated Load คือ ลักษณะการให้แรงกระทำและความถี่ในการให้แรง โดยการทดสอบ Repeated Load จะให้แรงกระทำและปล่อยแรงกระทำด้วยขนาดของแรงกระทำคงที่และความถี่ของแรงกระทำคงที่ตลอดการทดสอบ ในขณะที่การทดสอบ Dynamic Modulus ลักษณะของแรงกระทำจะเป็นคลื่นที่มีแอมพลิจูดคงที่ในแต่ละความถี่การทดสอบและทำการทดสอบที่หลายความถี่ของการให้แรงกระทำ (ตามปกติ คือ 1 4 และ 16 Hz) เป็นเวลา 30 – 45 วินาทีต่อหนึ่งชุดการทดสอบ (1 ความถี่) ซึ่งความยากของการทดสอบ Dynamic Modulus คือ ระบบการวัดการเสียรูปของตัวอย่างจะต้องมีความไวและแม่นยำกว่าการทดสอบ Repeated Load

โดยนิยามของการทดสอบ Dynamic Modulus คือการหาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงกระทำแบบคลื่นอย่างต่อเนื่อง สำหรับวัสดุที่มีลักษณะเป็น Linear Viscoelastic (อัตราส่วนความเค้น – ความเครียดคงที่

ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่กระทำ) ความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียดจะอธิบายได้โดยจำนวนเชิงซ้อน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Complex Modulus (E^*) ดังสมการต่อไปนี้

$$E^* = |E^*| \cos\varphi + i|E^*| \sin\varphi$$

โดยที่ E^* = Complex Modulus

$|E^*|$ = Dynamic Modulus คือ ขนาดของเวกเตอร์ E^*

φ = Phase angle Shift คือ องศาที่เหลื่อมกันของคลื่น ϵ_0 ที่ตามหลังคลื่นของ σ_0 ที่ตำแหน่งเดียวกันของคลื่น ดังแสดงในภาพที่ 2.11

สำหรับวัสดุ Pure Elastic จะมีค่า $\varphi = 0^\circ$ และสำหรับวัสดุ Pure Viscous จะมีค่า $\varphi = 90^\circ$ ซึ่งทำให้ค่า complex modulus มีค่าเท่ากับ Dynamic Modulus

i = ส่วนจินตภาพ

สำหรับค่า Dynamic Modulus หรือขนาดของเวกเตอร์ของ Complex Modulus ($|E^*|$) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$$

โดยที่ $|E^*|$ = Dynamic Modulus

σ_0 = ค่าแอมพลิจูดของความเค้นสูงสุด

(แรงสูงสุดในชุดการทดสอบนั้นๆ ที่กระทำต่อตัวอย่างต่อพื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง)

ϵ_0 = ค่าแอมพลิจูดของความเครียดการคืบตัวในแนวแกนสูงสุด สามารถวัดได้โดยตรงจากการติดตั้ง Strain Gauges หรือคำนวณได้จากค่าที่วัดโดยใช้อุปกรณ์ Linear Variable Displacement Transducers (LVDTs) โดยคำนวณได้จากสูตร $\frac{\Delta L}{L}$

L = ระยะความยาวของ gauge ที่ใช้วัดการเสียรูปของตัวอย่าง

ΔL = การเปลี่ยนแปลงความสูงของตัวอย่าง จากการคืบรูปบางส่วนของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงกระทำเป็นลักษณะคลื่น

การทดสอบ Dynamic Modulus มีความได้เปรียบในด้านที่เป็นการทดสอบที่สามารถวัดค่า Phase Angle Shift ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นความต่างของยอดคลื่นความเค้นกับยอดคลื่นความเครียดการคืนตัวที่รอบการทดสอบเดียวกัน นอกจากนี้ค่า Complex Modulus ยังเป็นค่าที่แสดงถึงคุณลักษณะของวัสดุ 2 ประการ คือ Elastic Modulus เป็นค่าที่บ่งชี้ความแข็งแรงของวัสดุ และ Viscous Modulus ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงคุณสมบัติด้านความหนืดของวัสดุ

การทดสอบภายใต้แรงกระทำซ้ำ สามารถแบ่งออกได้เป็น

- Unconfined Dynamic Modulus Test

เป็นการทดสอบโดยการให้แรงกระทำในแนวตั้งแบบ Haversine แก่วัสดุที่บดอัดเป็นทรงกระบอกในแนวตั้ง โดยมีข้อแนะนำให้บดอัดตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร และสูง 200 มิลลิเมตร หรือมีความสูงที่น้อยกว่านี้หากสามารถทำได้ ซึ่งจุดด้อยของการทดสอบรูปแบบนี้ คือ ไม่สามารถหาค่า Phase Angle Shift ได้

- Confined Dynamic Modulus Test

หลักการของการทดสอบรูปแบบนี้ใกล้เคียงกับการทดสอบแบบ Unconfined Dynamic โดยเพิ่มการให้แรงกระทำด้านข้างโดยรอบตัวอย่างทดสอบ เพื่อจำลองสภาพเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงในสนามให้แก่ตัวอย่าง ซึ่งการทดสอบรูปแบบนี้สามารถหาค่า Phase Angle Shift ได้

สำหรับการทดสอบรูปแบบนี้ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คือ Superpave Simple Performance Test (SPT) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Asphalt Mixture Performance Test (AMPT) ดังแสดงในภาพที่ 2.12

นอกจากการทดสอบ Dynamic Modulus แล้ว เครื่อง AMPT ยังสามารถทดสอบ Flow Number (หรือการทดสอบ Repeated Load) ได้อีกด้วย[9]



ภาพที่ 2.12 เครื่องมือ Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)
สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง

2.1.2.4 Empirical Tests

การทดสอบเชิงประสบการณ์ หรือ Empirical Test เป็นการทดสอบตามมาตรฐานการออกแบบผิวทางในสมัยก่อน โดยเป็นการทดสอบในเชิงเปรียบเทียบเท่านั้น ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หรือวิจัยต่อได้มากนัก ตัวอย่างของการทดสอบเชิงประสบการณ์ คือการทดสอบ Stability และ Flow ตามมาตรฐานการออกแบบผิวทางแบบ Marshall โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใดที่มีค่า Stability สูงและมีค่า Flow ต่ำ ย่อมมีความแข็งแรงและมีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปแบบถาวรได้ดีกว่าส่วนผสมที่มีค่า Stability ต่ำและ Flow สูง และหากผลการทดสอบ Stability และ Flow ผ่านเกณฑ์ที่ตั้งไว้สำหรับระดับจราจรใดๆ จะสามารถนำส่วนผสมดังกล่าวไปใช้งานก่อสร้างเป็นผิวทางจริงได้ แต่ไม่สามารถรับรองได้ว่าจะไม่เกิดความเสียหายเมื่อนำไปใช้งานจริง เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวเงื่อนไขต่างๆที่เกิดขึ้นบนวัสดุไม่สอดคล้องกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงบนถนนมากนัก

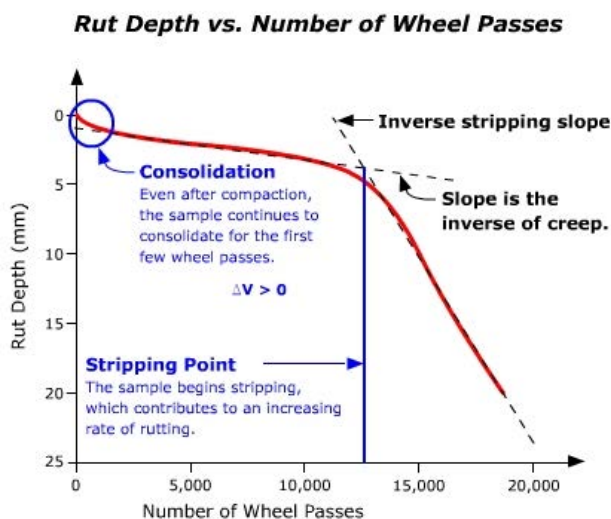
2.1.2.5 Simulative Tests

การทดสอบรูปแบบต่างๆข้างต้น เป็นการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าค่าหนึ่งที่เป็นคุณสมบัติของวัสดุและสามารถนำไปชี้วัดถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปแบบถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้ และมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมเกิดการเสีรูปจากการใช้งานจริงมากขึ้นแต่แตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตามรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างนั้นยังไม่ได้เกิดจากการจำลองสภาพที่วัสดุถูกกระทำจริงในสนาม คือ การที่วัสดุถูกน้ำหนักรกระทำจากล้อเคลื่อนที่ไปตามทิศทางจราจรบนผิวทาง จึงมีแนวทางในการทดสอบเพื่อจำลองสภาพที่ก่อให้เกิดความเสียหายแบบร่องล้อบนผิวทางที่ใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด จึงเป็นต้นกำเนิดของการพัฒนาเครื่องมือทดสอบประเภท Wheel Tracking ขึ้น ซึ่งต้นกำเนิดของเครื่องมือทดสอบประเภทนี้ คือ French Rutting Tester (FRT)[10] ดังแสดงในภาพที่ 2.17

ลักษณะการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องมือประเภทนี้ คือการบดอัดตัวอย่างด้วยกรรมวิธีต่างๆ เพื่อจำลองสภาพการก่อสร้างจริงและให้เป็นไปตามลักษณะที่เหมาะสมต่อการทดสอบ เช่น การบดอัดด้วย Gyrotory Compactor เพื่อบดอัดวัสดุให้เป็นตัวอย่างทดสอบประเภททรงกระบอก หรือการบดอัดด้วย Slab Compactor เพื่อให้ได้ตัวอย่างลักษณะเป็นแผ่นพื้น เป็นต้น

หลักจากนั้น ทำการทดสอบโดยการให้ล้อทดสอบรูปแบบต่างๆตามชนิดของเครื่องทดสอบกระทำแรงกดค่าหนึ่งๆในแนวตั้งและเคลื่อนที่ไปกลับบนผิวหน้าของตัวอย่างตามจำนวนรอบทดสอบที่กำหนด หรือได้ความลึกของร่องล้อตามที่ต้องการเป็นการสิ้นสุดการทดสอบ โดยระหว่างการทดสอบเครื่องทดสอบบางประเภทสามารถจำลองเงื่อนไขการทดสอบให้สอดคล้องกับสภาพจริงในสนาม เช่น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เป็นต้น

ลักษณะของวัสดุเมื่อได้รับการทดสอบ จะเกิดร่องล้อขึ้นบนผิวหน้าของตัวอย่าง ซึ่งจะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบการทดสอบที่เพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 2.13 ดังนี้



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและจำนวนรอบการทดสอบ
(Pavement Interactive, 2012: Online)

เมื่อเริ่มต้นการทดสอบวัสดุจะเกิดสภาพการยุบตัวภายหลังการบดอัด (Post compaction consolidation) โดยสมมติว่าในช่วง 1000 รอบการทดสอบแรกวัสดุยังสามารถยุบตัวต่อได้หลังจากการบดอัด ซึ่งหมายถึงการบดอัดที่ยังไม่ถึงจุดความหนาแน่นสูงสุดของวัสดุ ซึ่งปกติของการก่อสร้างถนนที่จะบดอัดให้ความหนาแน่นของวัสดุต่ำกว่าค่าความหนาแน่นสูงสุดเล็กน้อย

หลังจากสภาพการยุบตัวหลังการบดอัดเสร็จสิ้น วัสดุจะยุบตัวเป็นร่องล้อโดยมีความลึกเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนรอบการทดสอบ โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความลึกต่อจำนวนรอบ (ความชันของเส้นกราฟ) ที่ค่อนข้างคงที่ จนกระทั่งวัสดุเสียสภาพการต้านทานการเสีรูปวัสดุจะเกิดการยุบตัวจนเกิดเป็นแนวร่องอย่างชัดเจนและความลึกของร่องล้อที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจำนวนรอบการทดสอบที่เป็นจุดที่เส้นกราฟมีการเปลี่ยนความโค้ง จะนำไปเป็นค่าเปรียบเทียบกับสภาพความต้านทานการเสีรูปถาวรของวัสดุ หากจุดนี้เกิดขึ้นเมื่อรอบการทดสอบต่ำๆแสดงถึงส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตดังกล่าวมีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปแบบถาวรที่ต่ำกว่าส่วนผสมที่ให้ผลของรอบการทดสอบที่จุดเปลี่ยนความโค้งที่สูงกว่า

ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องมือประเภท Wheel Tracking ขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดสอบหลากหลายลักษณะ ตามความต้องการของผู้พัฒนา แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 3 ประเภทหลัก คือ

- Asphalt Pavement Analyzer (APA)

เครื่องมือชนิดนี้เริ่มมีการพัฒนาขึ้นในช่วงปี ค.ศ.1980 โดยพัฒนามาจากเครื่องมือ Georgia Loaded Wheel Tester โดยลักษณะของล้อทดสอบเป็นล้ออลูมิเนียมที่ต่อกับชุดปรับแรงดัน เพื่อปรับแรงที่กระทำต่อตัวอย่างแบบทรงกระบอกและแบบคาน โดยทั่วไปจะทำสิ้นสุดการทดสอบที่ 8,000 รอบการทดสอบ โดยให้แรงกระทำต่อผิวหน้าตัวอย่างที่ 100 ปอนด์



ภาพที่ 2.14 เครื่องมือ Asphalt Pavement Analyzer (APA)
(Pavement Interactive,2012: Online)



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างภายหลังการทดสอบด้วยเครื่องมือ APA
(Pavement Interactive,2012: Online)

- Hamburg Wheel Tracking Device(HWTD)

เครื่องมือทดสอบประเภทนี้มีการพัฒนาในประเทศเยอรมัน โดยล้อทดสอบเป็นล้อเหล็กให้แรงกระทำบนตัวอย่างที่เป็นลักษณะแผ่นพื้นความหนา 4 เซนติเมตร โดยปกติ การทดสอบจะใช้ล้อเหล็กที่มีความกว้างของหน้าสัมผัส 47 มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้ให้แรงกระทำ 158 ปอนด์ และขณะทำการทดสอบตัวอย่างจะต้องจมมอยู่ใต้น้ำ จะสิ้นสุดการทดสอบเมื่อจำนวนรอบการทดสอบถึง 20,000 รอบ หรือ เกิดร่องล้อที่มีความลึก 20 มิลลิเมตร

จุดเด่นของเครื่องมือประเภทนี้ นอกจากจะประเมินความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วยังสามารถประเมินความสามารถในการต้านทานความเสียหายจากความชื้นบนผิวทางได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.16 เครื่องมือ Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD)
(Pavement Interactive,2012: Online)

- French Rutting Tester (FRT)

เครื่องมือชนิดนี้ ถูกพัฒนาที่ประเทศฝรั่งเศส จึงเรียกเครื่องมือชนิดนี้อีกชื่อหนึ่งว่า The Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) โดยล้อทดสอบเป็นล้อที่สามารถปรับความดันลมยางได้ การทดสอบจะกระทำบนตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นพื้นที่มีความหนาตั้งแต่ 20 - 100 มิลลิเมตร โดยทั่วไปจะทำการทดสอบที่ระยะการทดสอบ 30,000 รอบ โดยตัวอย่างได้รับแรงกระทำ 1124 ปอนด์ ความดันลมยางของล้อทดสอบอยู่ที่ 87 psi

จุดเด่นของเครื่องมือประเภทนี้ คือ ล้อทดสอบที่ให้แรงกระทำต่อตัวอย่างเป็นล้อยาง ซึ่งสามารถจำลองสภาพการที่วัสดุถูกกระทำในสนามได้ใกล้เคียงกว่าล้อทดสอบที่เป็นโลหะ



ภาพที่ 2.17 (บน) เครื่องมือ French Rutting Tester (FRT)
(ล่าง) เครื่องบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตแบบแผ่น (Slab Compactor)
(Pavement Interactive,2012: Online)

2.2 มวลรวมและขนาดคละ (Aggregate and Gradation)

มวลรวม หรือ Aggregate โดยนิยามหมายถึงวัสดุจำพวกหินหรือแร่ เช่น กรวด ทราย หรือ หินคลุก โดยนำไปใช้ผสมรวมกับวัสดุเชื่อมประสาน (เช่น ซีเมนต์ หรือ แอสฟัลต์) เพื่อให้ได้วัสดุผสม ประเภทใหม่สำหรับใช้ในกิจกรรมการก่อสร้าง อาทิ แอสฟัลต์คอนกรีต หรือซีเมนต์คอนกรีต เป็นต้น [11]

สำหรับวัสดุงานทาง มวลรวมที่นำมาใช้งานโดยทั่วไป มักจะเป็นมวลรวมประเภทหิน ธรรมชาติที่มีอยู่ในท้องถิ่นที่จะทำการก่อสร้างถนน ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- หินอัคนี คือ หินที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวาหรือแมกมา ตัวอย่างของหินประเภทนี้ เช่น หินแกรนิต หินดินดาน
- หินชั้นหรือหินตะกอน คือ หินที่เกิดจากการทับถมกันของตะกอนและเศษซาก อินทรีย์วัตถุต่างๆ ภายใต้สภาพที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น หินปูน หินทราย
- หินแปร คือ หินที่เกิดจากการแปรสภาพของหินอัคนีหรือหินตะกอน ภายใต้สภาพ อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น หินอ่อนแปรสภาพจากหินปูน หรือ หินชนวนแปรสภาพจากหินดินดาน เป็นต้น

ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการผลิตมวลรวม คือ การทำเหมืองหินโดยการระเบิดหินจาก แหล่งหินธรรมชาติให้ได้ขนาดเพียงพอที่จะนำเข้าสู่เครื่องมีย่อยหินประเภทต่างๆได้ แล้วจึงทำการ ย่อยหินให้ได้ขนาดและรูปร่างต่างๆตามความเหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานตามสัดส่วนในขนาดคละของ มวลรวมต่อไป

นอกจากมวลรวมที่มาจากหินธรรมชาติแล้ว ในปัจจุบันยังมีการนำวัสดุประเภทอื่นๆ มา ประยุกต์ใช้เป็นมวลรวมในวัสดุงานทาง เช่น มวลรวมน้ำหนักเบาที่ผลิตจากดินเหนียวแปรรูป ตะกรัน เหล็กจากอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก หรือเศษยางบดจากกระบวนการรีไซเคิลยางรถยนต์ เป็นต้น โดยเป้าหมายหลักของการเพิ่มเติมวัสดุประเภทนี้ลงในมวลรวมของวัสดุงานทาง คือ การเพิ่ม ประสิทธิภาพให้แก่วัสดุผสม เช่น เพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความเสียดทานให้แก่ผิวทาง เป็นต้น[12]

2.2.1 คุณสมบัติของมวลรวม สำหรับการใช้งานกับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

มวลรวมที่เหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน ควรมี คุณสมบัติด้านต่างๆที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเพื่อให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมีประสิทธิภาพ ในการใช้งานสูงสุด โดยคุณสมบัติของมวลรวมที่ศาสตร์ด้านวิศวกรรมงานทางให้ความสนใจ คุณสมบัติเชิงแร่ คุณสมบัติเชิงเคมี และคุณสมบัติเชิงกายภาพ อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติด้าน กายภาพเป็นสิ่งที่ผู้ทำงานด้านนี้ให้ความสนใจมากที่สุด เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่สามารถ ตรวจสอบได้ง่ายอีกทั้งยังส่งผลต่อประสิทธิภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมากที่สุด[11]

สำหรับคุณสมบัติเชิงกายภาพที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของมวลรวม ซึ่งให้ความสำคัญกันโดยทั่วไป ประกอบไปด้วย

- คุณสมบัติด้านขนาดคละและขนาดของมวลรวม (Gradation and size)

เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญและส่งผลถึงประสิทธิภาพโดยรวมในการใช้งานวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมากที่สุด โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อ 2.2.2 ต่อไป

- คุณสมบัติด้านความความเหนียวและต้านทานการขัดสี (Toughness and Abrasion Resistance)

มวลรวมที่ดีและมีความเหมาะสมในการใช้งานด้านวิศวกรรมงานทางควรต้องมีความทนทานต่อการขัดสีและการแตกของมวลรวมโดยเฉพาะอย่างยิ่งมวลรวมหยาบ เนื่องจากสภาพการใช้งานจริงมวลรวมจะถูกแรงกระทำและขัดสีตั้งแต่ช่วงของการขนส่งมายังโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตจนกระทั่งรับแรงกระทำจากปริมาณจราจรซึ่งมวลรวมจะรับภาระในการถ่ายเทและกระจายแรงลงสู่โครงสร้างทางชั้นล่าง หากมวลรวมไม่มีความแข็งแรงเพียงพอมวลรวมจะแตกหักทำให้เสียรูปร่างและขนาดคละเปลี่ยนแปลงได้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางในระยะยาวและปัญหาด้านความเสียดทานของผิวทางที่ลดลงจากการที่มวลรวมถูกขัดสีจนผิวลื่น (Polish Aggregate)[13]

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติด้านความเหนียวและความต้านทานการขัดสีของมวลรวมที่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การทดสอบ Los Angeles Abrasion โดยเป็นการพิจารณาสัดส่วนของมวลรวม (พิจารณาขนาดที่ขนาดที่ค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 12 หรือใหญ่กว่า) ที่คงเหลือจากการทดสอบโดยการขัดสีและให้แรงกระทำจากลูกเหล็กและมวลรวมด้วยกันเองภายในเครื่องมือทดสอบ โดยค่าที่ยอมรับได้จะแตกต่างกันไปตามมาตรฐานการทดสอบของแต่ละหน่วยงาน[14]



ภาพที่ 2.18 เครื่องมือทดสอบ Los Angeles Abrasion
(Pavement Interactive,2012: Online)



ภาพที่ 2.19 ลักษณะของมวลรวม ก่อนและหลังการทดสอบ LA Abrasion
(Pavement Interactive,2012: Online)

- คุณสมบัติด้านความทนทานและการคงสภาพจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Durability and soundness)

คุณสมบัติด้านนี้แสดงถึงความคงทนของมวลรวมต่อสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องด้วยการใช้งานจริงในสนามนั้นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตต้องเผชิญต่อสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นเวลาหลายปีตลอดอายุการใช้งาน หากมวลรวมไม่มีความทนทานต่อสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดการแตกหักเสียหาย โครงสร้างทางสูญเสียความแข็งแรงจนเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างชั้นทางได้

การทดสอบคุณสมบัติด้านนี้เรียกว่าการทดสอบ soundness โดยการนำมวลรวมแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตหรือแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ผลึกเกลือซึมเข้าไปยังช่องว่างภายในเนื้อมวลรวมแล้วทำมวลรวมให้แห้งและแช่ในสารละลายอีกครั้ง กระทำซ้ำเป็นจำนวนรอบตามมาตรฐานกำหนด ผลึกเกลือจะขยายตัวจนทำให้มวลรวมแตกหักได้ แล้วพิจารณาหาขนาดของมวลรวมที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งมวลรวมที่ดีต้องมีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนักหรือไม่เสียหายจากการทดสอบมากเกินไป[15]



ภาพที่ 2.20 ลักษณะของมวลรวม ก่อนและหลังการทดสอบ Soundness
(Pavement Interactive,2012: Online)

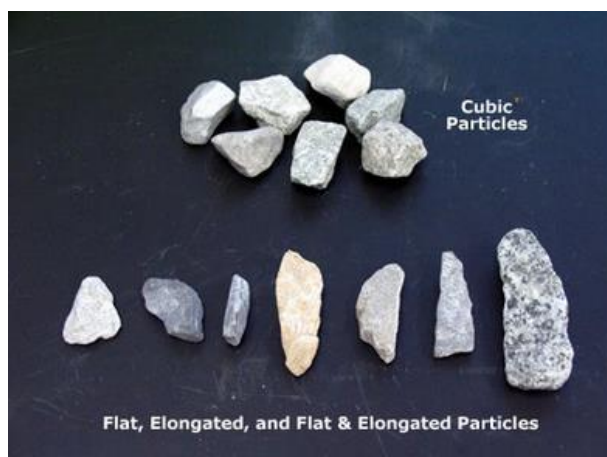
- คุณสมบัติด้านรูปร่างและพื้นผิวของมวลรวม (Particle shape and surface texture)

ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของมวลรวม มีความสำคัญยิ่งต่อเสถียรภาพในการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต เนื่องจากรูปร่างของมวลรวมที่แตกต่างกันไปจะส่งผลต่อคุณสมบัติหลายประการของวัสดุผสมที่แตกต่างกัน เช่น ระดับของการบดอัดที่กระทำได้ ความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างของวัสดุผสม เป็นต้น โดยลักษณะของมวลรวมที่เหมาะสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงสามารถรับกำลังได้ดี ควรต้องมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมสูงและไม่ยาวหรือแบนจนเกินไป เพื่อให้เกิดการขัดเกี่ยวกันระหว่างมวลรวมได้ดีและสามารถบดอัดได้ง่ายและแน่นมากขึ้น อีกทั้งมวลรวมที่มีรูปร่างแบนและยาวมีความเสี่ยงต่อการแตกหักได้สูงกว่ามวลรวมที่มีลักษณะอื่น หากมวลรวมในส่วนผสมมีปริมาณการแตกหักมากจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุผสมลดน้อยลง นอกจากนั้นควรมีพื้นผิวที่หยาบเพื่อให้แอสฟัลต์ยึดเกาะได้ดีมากยิ่งขึ้น หากแอสฟัลต์ไม่สามารถเคลือบพื้นผิวของมวลรวมได้ทั่วถึง จะส่งผลต่อความทนทานและอายุการใช้งานของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้[16]

สำหรับการทดสอบคุณลักษณะด้านนี้ เรียกว่าการทดสอบ Flat and Elongated หลักการ คือ การวัดอัตราส่วนของมิติด้านกว้างและยาวของมวลรวมโดยการใช้อุปกรณ์เฉพาะ เรียกว่า Caliper ในการวัด นิยามกล่าวว่ามวลรวมที่มีลักษณะแบนและยาว จะมีอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างที่มากกว่า 2:1 โดยการทดสอบจะทำการสุ่มมวลรวมจากสัดส่วนผสมมวลรวมที่จะใช้งาน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์สัดส่วนของมวลรวมที่มีลักษณะแบนและยาวต่อส่วนผสมมวลรวมทั้งหมดโดยพิจารณาเป็นร้อยละโดยมวลหรือร้อยละโดยจำนวน ซึ่งสัดส่วนผสมของมวลรวมที่เหมาะสมควรมีสัดส่วนมวลรวมที่แบนและยาวสูงสุดไม่เกิน 10%[17]



ภาพที่ 2.21 การทดสอบ Flat and Elongated
(Pavement Interactive,2012: Online)



ภาพที่ 2.22 ลักษณะของมวลรวมที่จำแนกได้จากการทดสอบ Flat and Elongated (Pavement Interactive,2012: Online)

- คุณสมบัติด้านความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ความถ่วงจำเพาะ เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของมวลรวมที่สำคัญในแง่ของการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตรของวัสดุทั้งมวลรวมและแอสฟัลต์ในการออกแบบเพื่อให้ได้จำนวนของสัดส่วนผสมต่างๆที่ถูกต้อง รวมไปถึงเป็นส่วนหนึ่งของค่าที่ใช้ในการคำนวณหาช่องว่างอากาศในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอีกด้วย[18]

สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม เนื่องจากเนื้อวัสดุของมวลรวมมีช่องว่างอีกทั้งของมวลรวมมีเหลี่ยมมุม เมื่ออยู่รวมกันเป็นปริมาณมาก จะมีช่องว่างอากาศระหว่างของมวลรวม ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน คือ Bulk Specific Gravity โดยเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ของน้ำหนักมวลรวมในสถานะต่างๆ คือ สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry: SSD) สถานะแห้งสนิท (Oven Dry) จากการวัดน้ำหนักมวลรวมในอากาศ และสถานะเปียก (Wet) จากการวัดน้ำหนักมวลรวมในน้ำ ผลลัพธ์จากการคำนวณจะได้ค่า Bulk Specific Gravity และอัตราการดูดซึ่ม (%Absorption) ของมวลรวม ซึ่งใช้ในการคำนวณหาปริมาณแอสฟัลต์ที่ต้องใช้ทั้งหมดโดยรวมปริมาณที่ถูกมวลรวมดูดซึ่มแล้ว[19]



ภาพที่ 2.23 ชุดอุปกรณ์วัดน้ำหนักสำหรับการทดสอบหาค่า Bulk Specific Gravity
(Pavement Interactive,2012: Online)

- คุณสมบัติด้านความสะอาดและความปลอดภัยต่อการนำมาใช้ (Cleanliness and deleterious materials)

มวลรวมที่เหมาะสมต่อการใช้งานในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตควรมีคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ควรมีความสะอาดในระดับหนึ่ง ไม่มีฝุ่นบนมวลรวมมากเกินไป เพื่อให้แอสฟัลต์สามารถยึดเกาะกับมวลรวมได้ดีมากยิ่งขึ้น นอกจากนั้นแล้วต้องไม่ปนเปื้อนด้วยอินทรีย์วัตถุต่างๆ สารประกอบดินเหนียว ซึ่งสารจำพวกดังกล่าวจะเร่งให้เกิดความเสียหายแก่มวลรวม ทำให้โครงสร้างชั้นทางสูญเสียความแข็งแรงไวยิ่งขึ้น[20]

นอกจากประเด็นข้างต้นแล้ว อีกประเด็นหนึ่งที่มีความสำคัญ คือ มวลรวมที่นำมาใช้ต้องไปปนเปื้อนด้วยสารพิษอันตรายต่างๆ ในปริมาณที่สูงเกินไป เช่น ปรอท ตะกั่ว เนื่องจากสุ่มเสี่ยงต่อการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมรอบข้างสถานที่ก่อสร้างถนนสายทางนั้นๆ

- คุณสมบัติด้านความชื้นในมวลรวม (Moisture Content)

จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น เนื้อของมวลรวมนั้นมีช่องว่างมวลรวมจึงสามารถดูดซึมน้ำได้ ทำให้มีความชื้นอยู่ภายในมวลรวม หากไม่พิจารณาถึงปัจจัยด้านความชื้นในมวลรวม จะส่งผลให้การคำนวณปริมาณของมวลรวมที่นำไปใช้งานไม่แม่นยำเท่าที่ควร เนื่องจากน้ำหนักที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีน้ำหนักของน้ำรวมอยู่ด้วย แต่อย่างไรก็ตามมักจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตมากนัก เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตจำเป็นต้องให้ความร้อนแก่หินมากกว่า 100°C เพื่อให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกับแอสฟัลต์ได้ง่ายขึ้น ความชื้นในมวลรวมจึงไม่หลงเหลืออยู่หรือหลงเหลืออยู่ในปริมาณที่น้อยมาก[21]

2.2.2 ขนาดคละของมวลรวมที่ใช้ในแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

ขนาดคละของมวลรวม โดยนิยามแล้วหมายถึงรูปแบบการกระจายตัวของมวลรวมขนาดต่างๆ คิดเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับส่วนผสมมวลรวมทั้งหมด โดยพิจารณาจากปริมาณ (โดยน้ำหนักหรือโดยปริมาตร ซึ่งมีความสัมพันธ์กันโดยค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ) ที่ค้างอยู่บนตะแกรงทดสอบมาตรฐานขนาดต่างๆ ตามการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ขนาดคละ ซึ่งขนาดคละเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งที่จะบ่งชี้ถึงคุณสมบัติด้านของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ เช่น เสถียรภาพของวัสดุ ความสามารถในการซึมผ่านชั้นวัสดุ กำลังของวัสดุ เป็นต้น[22]

ขนาดของมวลรวมสำหรับขนาดคละทุกประเภทมีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต แม้ว่าจะเป็นขนาดคละประเภทเดียวกันก็จะส่งผลถึงคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่แตกต่างกัน โดยสามารถพิจารณาเปรียบเทียบได้ที่ขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุด (Maximum Size) หรือขนาดเรียกของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุด (Nominal maximum size) โดยนิยาม เป็นดังนี้

ขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุด หมายถึงมวลรวมที่มีขนาดเท่ากับขนาดของตะแกรงมาตรฐานที่เล็กที่สุดที่ส่วนผสมมวลรวมทั้งหมดสามารถร่อนผ่านได้ หรือขนาดของตะแกรงที่ใหญ่กว่าขนาดเรียกของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุด 1 ระดับ

ขนาดเรียกของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุด หมายถึงขนาดที่เท่ากับขนาดของตะแกรงมาตรฐานซึ่งสัดส่วนผสมมวลรวมค้างอยู่บนตะแกรงนั้น แต่ต้องไม่เกิน 10% ของส่วนผสมมวลรวมทั้งหมด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ขนาดของตะแกรงมาตรฐานที่ใหญ่กว่า 1 ระดับ ของขนาดของตะแกรงระดับแรกที่มีมวลรวมค้างอยู่บนตะแกรงมากกว่า 10%

หากส่วนผสมมวลรวมที่มีขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดเล็กเกินไปจะส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตไม่มีเสถียรภาพในการทำงาน หรือวัสดุจะเกิดการแยกตัว (Segregation) หรือมีความสามารถในการไหล (Workability) ที่ต่ำ ทำให้ดำเนินการก่อสร้างได้ยากยิ่งขึ้น ดังนั้นแล้วในทุกมาตรฐานหรือข้อกำหนดการก่อสร้าง ควรต้องระบุขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดหรือขนาดเรียกของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดไว้เพื่อการอ้างอิงเสมอ

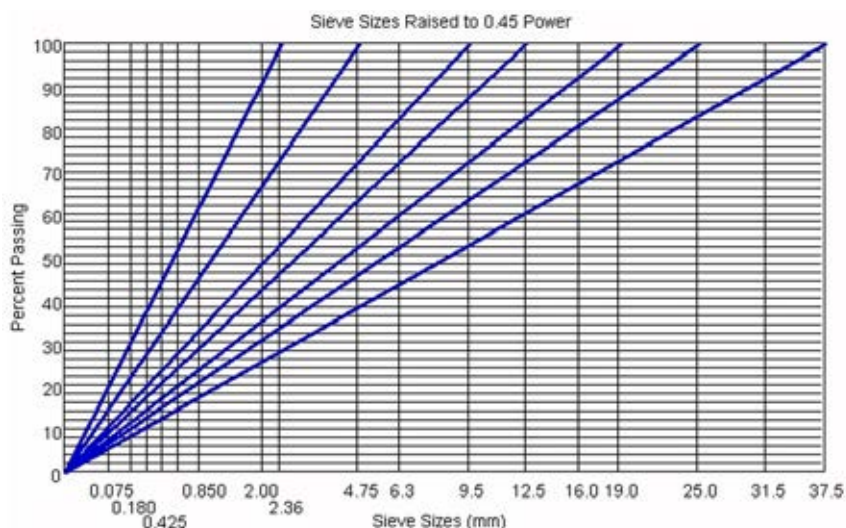
การวิเคราะห์ขนาดคละของมวลรวมนั้น สามารถแสดงได้โดยง่ายโดยเส้นกราฟที่เรียกว่า Gradation Curve โดยนำข้อมูลจากการทดสอบ Gradation Test หรือเรียกอีกอย่างว่า Sieve Analysis ซึ่งมีหลักการทดสอบ คือ การหาสัดส่วนของมวลรวมในส่วนผสมมวลรวมทั้งหมดที่ค้างอยู่บนตะแกรงทดสอบขนาดต่างๆ ที่จัดไว้เป็นชุดโดยเรียงลำดับจากขนาดช่องตะแกรงที่ใหญ่ลงไปหาขนาดเล็ก แล้วนำผลการคำนวณสัดส่วนโดยน้ำหนักหรือปริมาตรของมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงขนาดต่างๆต่อมวลรวมทั้งหมดแสดงในรูปของตารางหรือกราฟต่อไป ซึ่งการแสดงผลแบบกราฟจะง่ายต่อการเข้าใจมากกว่า โดยกราฟที่นิยมใช้มากที่สุด คือ กราฟความหนาแน่นสูงสุดยกกำลัง 0.45 (0.45 Power Maximum Density)

กราฟ 0.45 Power Maximum Density มีที่มาจากแนวความคิดที่ว่าขนาดคละที่ดีที่สุด คือ ขนาดคละที่มีความหนาแน่นมากที่สุด โดยมวลรวมที่มีขนาดเล็กสามารถแทรกตัวอยู่ในช่องว่างของมวลรวมขนาดใหญ่จนเหลือช่องว่างอากาศระหว่างมวลรวมน้อยที่สุด มีการสัมผัสระหว่างมวลรวมมากที่สุด แต่ในขณะที่เดียวกันการที่ไม่มีช่องว่างอากาศเหลืออยู่เลยกลับมีผลเสียต่อแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น ไม่มีเนื้อที่สำหรับแอสฟัลต์ขยายตัวจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น ดังนั้นแล้ว จึงมีการพัฒนาสมการเพื่อพิจารณาหาขนาดคละที่ดีที่สุด โดยสมการที่เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด คือ สมการของ Fuller and Thompson ที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

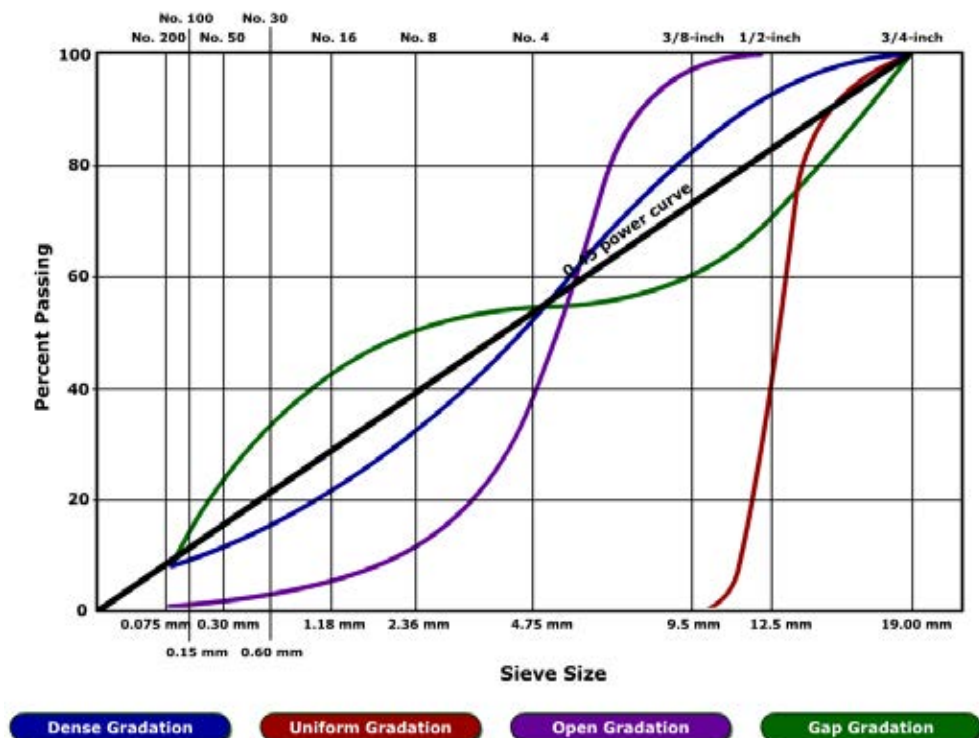
โดยที่	P	=	ร้อยละของมวลรวมที่ผ่านตะแกรงขนาดที่สนใจ
	d	=	ขนาดของมวลรวมที่สนใจ
	D	=	ขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดในส่วนผสมมวลรวม
	n	=	ตัวแปรปรับแก้ความโค้งของกราฟ

Fuller and Thompson ได้แนะนำค่า n ที่เหมาะสมไว้ที่ 0.5 แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงปี 1960 FHWA ได้แนะนำกราฟแสดงขนาดคละของมวลรวมเพื่อพิจารณาขนาดคละที่เหมาะสม โดยกำหนดให้มีเส้นความหนาแน่นสูงสุดตามสมการของ Fuller and Thompson แต่ใช้ค่า n ที่ 0.45 เป็นเกณฑ์ หากเส้นของขนาดคละเข้าใกล้เส้น 0.45 Power Maximum Density มากเท่าใด หมายถึงส่วนผสมมวลรวมดังกล่าวมีขนาดคละที่ทำให้มีความหนาแน่นของส่วนผสมมวลรวมมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งความชันของเส้น 0.45 Power Maximum Density จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของมวลรวมสูงสุด ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 เส้น 0.45 Power Maximum Density ของส่วนผสมมวลรวมที่มีขนาดของมวลรวมใหญ่ที่สุดขนาดต่างๆ (Pavement Interactive, 2012: Online)

ประเภทของขนาดคละ โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามลักษณะของเส้นกราฟของขนาดคละดังนี้[23]



ภาพที่ 2.25 กราฟแสดงขนาดคละรูปแบบต่างๆ ของส่วนผสมมวลรวมที่มีขนาดของมวลรวมใหญ่สุดขนาด 3/4 นิ้ว (Pavement Interactive,2012: Online)

- Dense หรือ well Graded
แสดงดังเส้นสีน้ำเงินในภาพที่ 2.25 โดยเส้นจะเข้าใกล้เส้น 0.45 Power Maximum Density มากที่สุด โดยทั่วไปแล้วขนาดคละรูปแบบนี้เป็นขนาดคละที่เหมาะสมและนิยมนำไปใช้งานโครงสร้างถนนชั้นต่างๆ สำหรับทุกเงื่อนไขปริมาณจราจรมากที่สุด เนื่องจากให้ความหนาแน่นของมวลรวมมากที่สุด หากนำไปก่อสร้างเป็นชั้นผิวทางจะเป็นชั้นผิวทางที่มีความตึบแน่นสูงและมีความแข็งแรงสูง[24]
- Gap Graded
แสดงดังเส้นสีเขียวในภาพที่ 2.25 ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนผสมมวลรวมที่มีขนาดคละลักษณะนี้จะมีสัดส่วนของมวลรวมขนาดกลางอยู่น้อยมาก (สังเกตได้จากเส้นกราฟในช่วงดังกล่าวอยู่ในลักษณะค่อนข้างเป็นแนวนอน) เพื่อให้มีช่องว่างอากาศมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามส่วนผสมที่มีลักษณะขนาดคละแบบดังกล่าวจะมีโอกาสแยกตัวขณะก่อสร้างได้

- Open Graded

แสดงดั่งเส้นสีม่วงในภาพที่ 2.25 จากกราฟจะเห็นได้ว่า เส้นกราฟมีลักษณะค่อนข้างชันในช่วงมวลรวมขนาดกลางและราบเข้าใกล้ศูนย์ในช่วงมวลรวมขนาดเล็ก ขนาดคละลักษณะนี้จะมีสัดส่วนมวลรวมขนาดเล็กอยู่น้อยมากส่งผลให้ส่วนผสมมวลรวมมีช่องว่างมากขึ้นเนื่องจากมีขนาดเล็กไม่เพียงพอที่จะเติมเต็มช่องว่างระหว่างมวลรวมที่มีขนาดใหญ่

- Uniformly Graded

แสดงดั่งเส้นสีแดงในภาพที่ 2.25 โดยเส้นกราฟจะแสดงอยู่ในช่วงของขนาดมวลรวมไม่กว้างมากนักหรือกล่าวได้ว่ามวลรวมทั้งหมดมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมาก

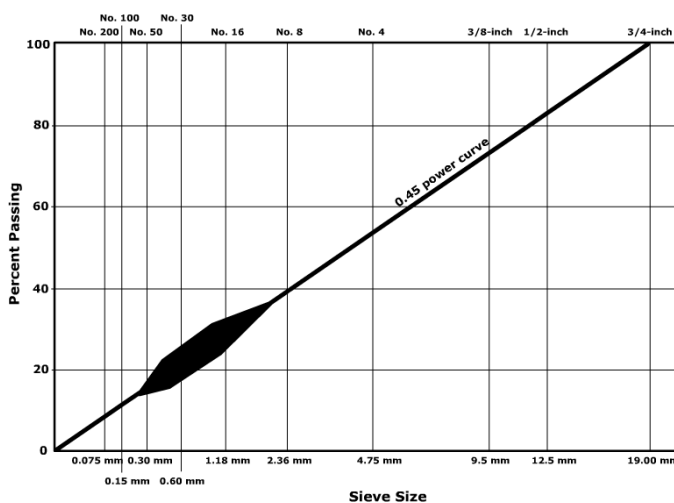
สำหรับโครงสร้างชั้นทางที่เป็นชั้นผิวทาง รูปแบบของขนาดคละที่มีการนำมาใช้งานในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีอยู่ 3 รูปแบบที่เป็นที่นิยมใช้งานคือ[25]

- Dense Graded Mixes

เป็นส่วนผสมที่มีช่องว่างของส่วนผสมอยู่น้อย จึงมีความทึบน้ำสูง ซึ่งสามารถแยกได้เป็นสองรูปแบบย่อย คือ ขนาดคละแบบหยาบและขนาดคละแบบละเอียด โดยวัสดุที่นำมาผสมเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบดังกล่าว คือ มวลรวมที่มีขนาดคละแบบ Dense แอสฟัลต์ซึ่งใช้ได้ทั้งแบบธรรมดาหรือปรับปรุงคุณภาพ โดยจุดเด่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละรูปแบบนี้ คือ เหมาะกับทุกเงื่อนไขการใช้งาน ทั้งเป็นโครงสร้างชั้นทาง ปรับระดับผิวทาง ปะซ่อม หรือปูทับเพื่อเพิ่มความเสียดทาน และใช้ได้กับทุกเงื่อนไขระดับจราจร

ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบนี้ คือ อาจสูญเสียต่อความไม่ปลอดภัยในการใช้งานเมื่อผิวทางเปียกชื้น หากกระบระบายน้ำไม่ดีเพียงพอ น้ำจะขังก่อให้เกิดอันตรายได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำที่ขังอยู่ในผิวทางที่มีความเสียหายแบบร่องลอนอกจากรันแล้วยังมีปัญหาในเรื่องของความเสียหายของผิวทางต่างๆเกิดขึ้นทั้งจากการใช้งานหรือการออกแบบส่วนผสมที่ไม่ดีพอ เช่น การออกแบบให้ส่วนผสมมีช่องว่างอากาศน้อยเกินไป เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและแอสฟัลต์ขยายตัวทำให้ไม่มีช่องว่างเพียงพอจนเกิดการเยิ้มของแอสฟัลต์ (Bleeding) และปัญหาการเกิดร่องล้อ ซึ่งเป็นรูปแบบความเสียหายที่พบได้มากที่สุด เนื่องมาจากการที่มวลรวมไม่ได้สัมผัสและมีการขัดเกี่ยวกันมากเพียงพอจึงทำให้เกิดการไหลและเสียรูปได้

จากการศึกษาที่ผ่านมา ได้มีการออกแบบโครงสร้างของมวลรวมรูปแบบต่างๆเพื่อลดการเกิดความเสียหายแบบร่องล้อ เช่น การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธี Superpave ได้กำหนดให้มี Restricted Zone หรือบริเวณที่เส้นแสดงขนาดคละผ่าน ดังแสดงในภาพที่ 2.26 คือบริเวณที่เป็นกระเปาะสีดำ

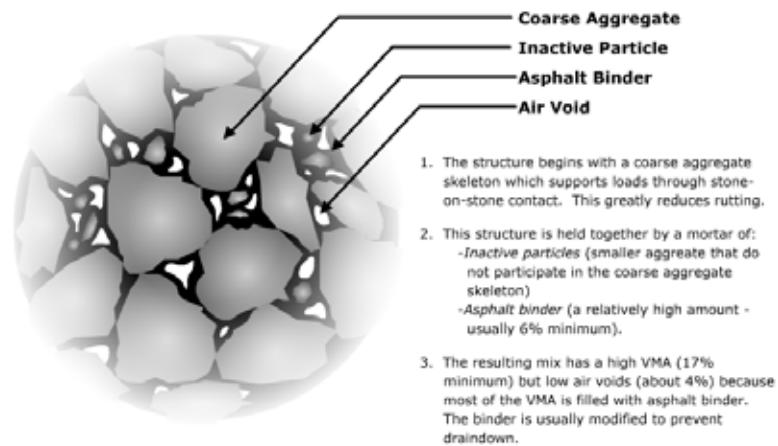


ภาพที่ 2.26 กราฟแสดงบริเวณ Restricted Zone
(Pavement Interactive,2012: Online)

จากผลการศึกษาของ Bensa Nukunya et al.[26] พบว่าส่วนผสมมวลรวมที่มีขนาด
 คละแบบ Dense Graded ที่มีเส้นแสดงขนาดคละผ่านไต้ Restricted Zone จะมึ
 ความสามารถในการต้านทานการเกิดควมเสี่ยหายแบบร้งล้ไต้ไต้กว่าส่วนผสมมวลรวมที่
 มีเส้นแสดงขนาดคละผ่านด้านบนหรือผ่านทับ Restricted Zone

- Gap Graded Mixes

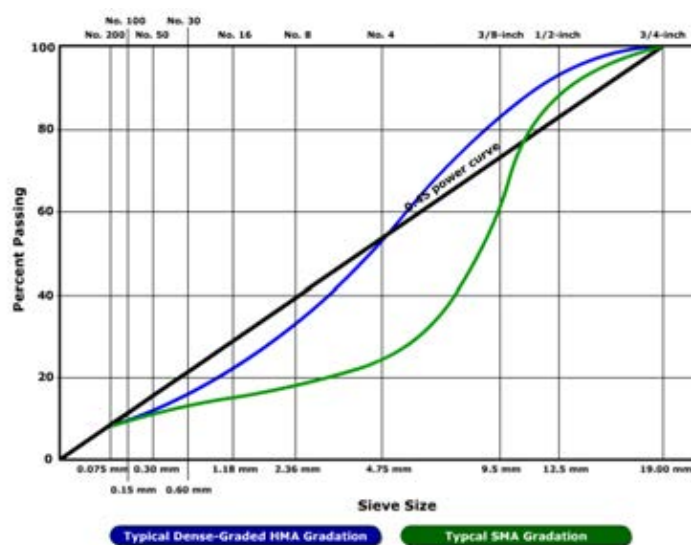
หรือเรียกได้อีกรูปแบบหนึ่งว่า Stone Matrix Asphalt หรือ Stone Mastic Asphalt (SMA) พัฒนาขึ้นแถบยุโรปในช่วงปี 1960 โดยมีเป้าหมายหลักในการเพิ่มความทนทาน และลดควมเสี่ยหายแบบร้งล้ไต้ไต้ไต้ขึ้นมากบนผิวทางที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded[27] หลักการของ SMA คือ การลดสั้ส่วนของมวลรวมขนาดกลางลง เพื่อให้มวลรวมขนาดใหญ่ถ้ายทอดแรงระหว่างกันไต้ไต้โดยตรง หรือกล่าวไต้ไต้ว่ามวลรวมที่มีขนาดคละรูปแบบนี้จะอยู่ในลักษณะ Stone-on-Stone เพื่อลดการเสี่ยรูปของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากการรับแรงกระทำจากปริมาณจราจรบนสายทาง ร่วมกับการเพิ่มสั้ส่วนของมวลรวมขนาดเล็กให้มากกว่าขนาดคละแบบ Gap Graded โดยมวลรวมขนาดเล็กดังกล่าวจะรวมตัวกับแอสฟัลต์เรียกว่า Mastic โดย Mastic ดังกล่าวจะเพิ่ม Stiffness ให้กับวัสดุเชื่อมประสานให้สูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยทั่วไป ซึ่งเป็นการเพิ่มการต้านทานการเสี่ยรูปของวัสดุผสมอีกทางหนึ่ง



ภาพที่ 2.27 โครงสร้างของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตประเภท SMA
 (Pavement Interactive,2012: Online)

โดยข้อนแนะนำสำหรับคุณสมบัติของ SMA คือ มีค่า Void in Mineral Aggregate (VMA) อย่างน้อย 17% เนื่องจากใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่เป็นส่วนมาก แต่มีช่องว่างอากาศในส่วนผสมประมาณ 4% เพื่อให้มีช่องว่างเพียงพอต่อการขยายตัวของแอสฟัลต์และชะลออัตราการเกิด Aging[28]

สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมของ SMA คือ มวลรวมที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded ซึ่งมักจะเป็นมวลรวมหยาบ ทรายและผงฝุ่น โดยต้องเป็นมวลรวมที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ เนื่องจากต้องรับการถ่ายทอดแรงโดยตรง และแอสฟัลต์ที่ใช้เป็นแอสฟัลต์ประเภทธรรมดาหรือแอสฟัลต์แบบปรับปรุงคุณภาพก็ได้ เพื่อลดการเกิดการไหลของ Mastic หรือ Mix Draindown



ภาพที่ 2.28 ขนาดคละของ SMA เทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense Graded
 (Pavement Interactive,2012: Online)

จากคุณลักษณะต่างๆดังที่กล่าวมาส่งผลให้สัดส่วนผสมของ SMA มีปริมาณแอสฟัลต์อยู่ในสัดส่วนผสมอยู่มาก (โดยทั่วไปอยู่ที่ 6% หรือมากกว่าขึ้นกับลักษณะของขนาดคละ) จึงมีโอกาที่แอสฟัลต์ซึ่งผสมกับมวลรวมขนาดเล็กเกิดการไหลและแยกตัวลงสู่ด้านล่าง ทั้งขณะขนส่งจากโรงงานหรือระหว่างการปูผิวทางขณะก่อสร้าง เรียกว่า Mix Draindown เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว SMA จึงนิยมใช้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเติมสารผสมเพิ่มจำพวกโพลีเมอร์หรือเซลูโลสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างส่วนผสมต่างๆได้ดียิ่งขึ้น

จากการศึกษาของ Glen Keith Allen พบว่าในบางกรณียังพบความเสียหายแบบเบ้มเนื่องจากช่องอากาศคงเหลือน้อยเกินไปหรือใช้ปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมมากเกินไปหรือการแตกหักของมวลรวมหยาบเนื่องจากการใช้มวลรวมที่มีความแข็งแรงน้อยเกินไปอีกด้วย[29]

นอกจากคุณสมบัติด้านความทนทานแล้ว SMA ยังมีความที่บ้น้ำสูง จึงเหมาะแก่การใช้งานร่วมกับผิวทางแบบระบายน้ำเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างทาง อีกทั้ง SMA ยังสามารถลดเสียงที่เกิดจากยางรถยนต์สัมผัสกับผิวทางได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.29 ความแตกต่างของโครงสร้างมวลรวม ระหว่าง SMA และแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense Graded (Pavement Interactive,2012: Online)

- Open Graded Mixes

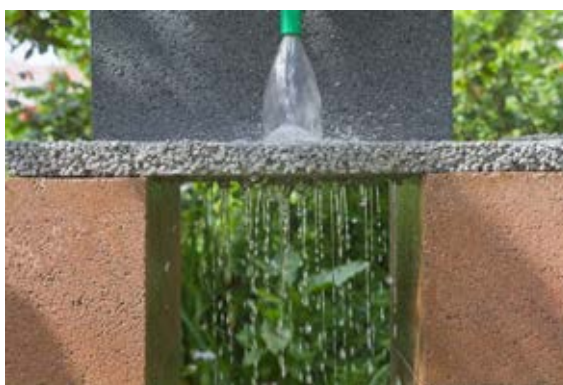
ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Open Graded มีจุดเด่นในเรื่องของการพัฒนาให้เป็นชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตที่น้ำสามารถผ่านได้หรือเป็นชั้นผิวทางระบายน้ำ (Porous Asphalt) โดยมีรูปแบบการใช้งาน 2 รูปแบบหลัก คือ[30]

- Open Graded friction course (OGFC) โดยทั่วไปจะมีช่องว่างอากาศอยู่ที่ 15% และไม่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่มีคุณสมบัติที่สูงมากและจะใช้ก่อสร้างเป็นโครงสร้างทางชั้นผิวทางชั้นบนสุดเท่านั้น โดยถัดจากชั้น OGFC ต้องมีวัสดุ

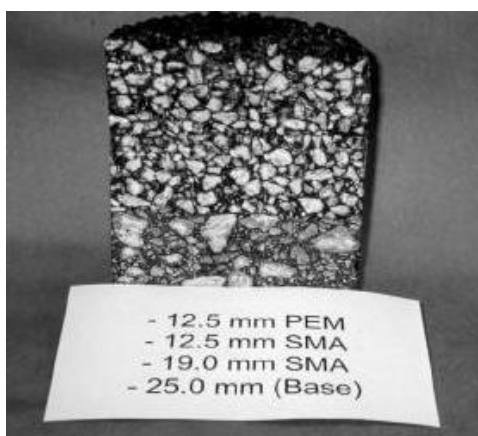
แอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense Graded หรือ SMA รองอยู่อีกชั้นหนึ่ง ประโยชน์ของผิวทางที่มีขนาดคละรูปแบบนี้ คือ ลดการขังตัวของน้ำบนผิวทาง และทำให้ผิวทางมีความเรียบมากขึ้นกว่าการใช้ขนาดคละแบบ Dense Graded นอกจากนั้นแล้วยังสามารถลดเสียงที่เกิดจากยางรถยนต์เคลื่อนผ่านได้มากถึง 50%

- Asphalt treated permeable bases (ATPB) มีความแข็งแรงน้อยกว่าส่วนผสมแบบ OGFC โดยใช้เป็นชั้นระบายน้ำของชั้นผิวทางแบบ Dense Graded หรือ SMA ด้วยลักษณะของ ATPB ที่มีความแข็งแรงน้อย จึงต้องมีชั้นผิวทางที่แข็งแรงกว่าอยู่ด้านบนเสมอ

โดยวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Open Graded นี้ คือ มวลรวมจำพวกหินคลุกขนาดค่อนข้างใหญ่ และมวลรวมขนาดเล็กจำพวกทรายในสัดส่วนที่เล็กน้อย สำหรับแอสฟัลต์ที่นำมาใช้งานเป็นวัสดุเชื่อมประสานนั้น จะเป็นแอสฟัลต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วเพื่อประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่ดีขึ้น



ภาพที่ 2.30 การซึมผ่านของน้ำผ่านแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Open Graded (Wikipedia, 2012: Online)



ภาพที่ 2.31 ตัวอย่างจากการเจาะสำรวจโครงสร้างชั้นทางที่ชั้นบนสุดเป็น OGFC (Wikipedia, 2012: Online)

โดยทั่วไปแล้ว OGFC มีราคาต่อหน่วยน้ำหนักที่แพงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense Graded แต่ความหนาแน่นที่น้อยกว่า เมื่อนำไปก่อสร้างผิวทางที่ความหนาแน่นชั้นทางเท่ากันจะก่อสร้างได้พื้นที่ที่มากกว่า แต่ปัญหาที่สำคัญสำหรับชั้นทางที่มีลักษณะเช่นนี้คือ ช่องว่างมักอุดตันจากฝุ่นและคราบเขม่าต่างๆ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของชั้นทางแบบ Open Graded ลดลง[31] จากการศึกษาของ Herrington et al.[32] พบว่าด้วยความที่ขนาดคละแบบ Open Graded มีช่องว่างอากาศมาก ในบางกรณีทำให้แอสฟัลต์เสื่อมสภาพ (Aging) ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างมวลรวมลดลง ผิวทางเกิดการหลุดร่อน ความทนทานในการใช้งานลดต่ำลง

2.3 ยางบด (Crumb Rubber)

ยางบด หรือ Crumb Rubber เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลยางรถยนต์ทั้งหมดสภาพในการใช้งาน เพื่อนำเศษยางบดดังกล่าวไปแปรรูปหรือใช้ประโยชน์ด้านอื่นต่อไป โดยยางรถยนต์ที่สามารถนำมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลได้สามารถใช้ได้ทั้งยางรถยนต์ขนาดปกติและยางรถบรรทุกซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ถึงแม้ว่ายางทั้งสองชนิดจะมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณเหล็กเสริมและผ้าใบที่มากน้อยต่างกันหรือสัดส่วนของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อยางก็ตาม แต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก

2.3.1 กระบวนการผลิตยางบด

กระบวนการในการผลิตยางบด เริ่มจากการคัดเลือกวัตถุดิบซึ่งโดยมากเป็นยางรถยนต์หรือยางรถบรรทุกที่ผ่านการใช้งานแล้ว หลังจากนั้นทำการตัดยางเพื่อแยกส่วนของหน้ายางและแก้มยางออกจากกัน แล้วจึงย่อยให้เป็นชิ้นเศษยางให้เป็นลักษณะชิ้นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.5 – 1 นิ้ว โดยประมาณ แล้วจึงป้อนเข้าสู่เครื่องบดต่อไป โดยกรรมวิธีการบด สามารถจำแนกออกได้ 3 รูปแบบหลัก ดังนี้[33]



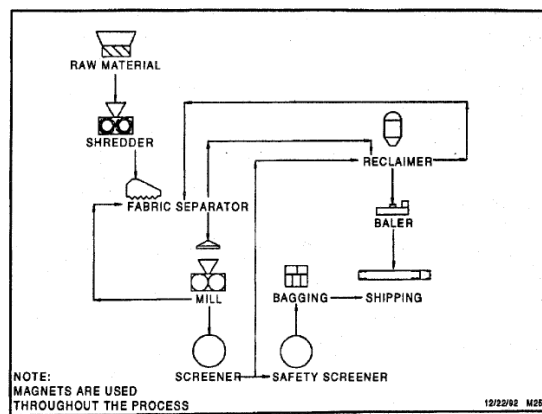
ภาพที่ 2.32 กองยางรถบรรทุกเพื่อเตรียมผลิตยางบด



ภาพที่ 2.33 ขั้นตอนการย่อยยางให้เป็นชิ้นขนาด 0.5 – 1 นิ้ว

- Ambient Grinding and Granulating

รูปแบบการบดแบบนี้ เป็นรูปแบบที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากดำเนินงานในสภาพอุณหภูมิห้อง หลักการคือการป้อนวัตถุดิบชิ้นยางในขั้นตอนแรกที่เตรียมให้มีขนาดเหมาะสมพอที่เครื่องจะทำงานได้เข้าสู่เครื่อง ที่ตัวเครื่องจะมีไม้ที่จะฉีกยางและย่อยให้มีขนาดตามต้องการ ระหว่างที่ไม่ฉีกยางอยู่นั้น ผ้าใบและเหล็กเสริมในเนื้อยางจะถูกแยกออกมาด้วย หลังจากนั้นเครื่องจะกรองแยกเม็ดยาง ผ่าใบ และใยเหล็กเสริมออกจากกัน ยางเม็ดที่ได้จะนำไปบรรจุเพื่อเตรียมนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยลักษณะของยางเม็ดที่ผ่านการบดด้วยวิธีการนี้จะมีพื้นผิวที่ขรุขระและในบางกรณีอาจมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ ขนาดที่สามารถบดได้อยู่ที่ 1/4 นิ้วถึงขนาดค้ำงบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 40 แผนภาพการทำงานของกรบดลักษณะนี้ แสดงดังรูป 2.34



ภาพที่ 2.34 แผนภาพทำงานของการบดแบบ Ambient Grinding and Granulating (FHWA, 1995)



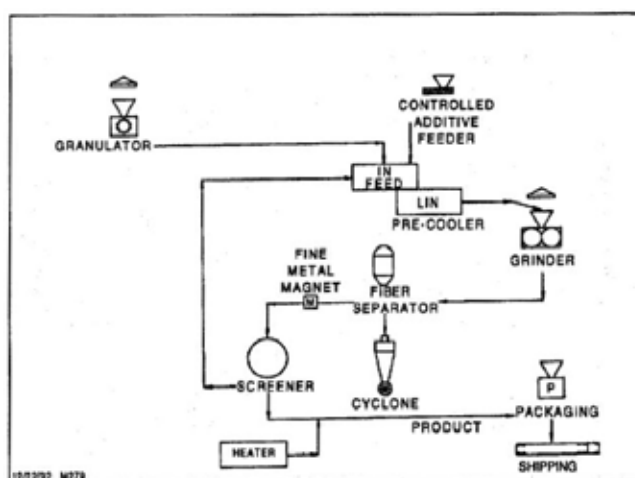
ภาพที่ 2.35 อุปกรณ์บดแบบ Ambient Grinding and Granulating



ภาพที่ 2.36 การบรรจุยางที่ผ่านการบดแล้ว

- Cryogenic Grinding

การบดยางรูปแบบนี้มีกรรมวิธีที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น หลักการคือการทำให้อินทรีย์ยางที่เตรียมไว้เย็นจัดด้วยไนโตรเจนเหลว ส่งผลให้เนื้อยางมีความแข็งเปราะ แล้วจึงป้อนเข้าสู่เครื่องบดซึ่งชุดบดมีลักษณะคล้ายค้อนที่ทำหน้าที่ทุบให้ให้ยางที่เย็นจัดแตกหักได้ง่ายสำหรับใยเหล็กเสริมนั้นจะใช้แม่เหล็กในการแยกออกจากเนื้อยางที่แตกละเอียดแล้วลักษณะของยางที่ผ่านการบดด้วยวิธีนี้สามารถบดยางได้ละเอียดมากกว่าวิธี Ambient Grinding and Granulating โดยสามารถทำขนาดของยางบดได้ตั้งแต่ 1/4 นิ้วถึงขนาดค้ำงบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 และลักษณะพื้นผิวของเม็ดยางบดที่ได้จะมีความเป็นเหลี่ยมมุมสูงและเรียบ พื้นที่ผิวของเม็ดยางจะมีน้อยกว่าเม็ดยางจากวิธีการ Ambient Grinding and Granulating โดยแผนภาพขั้นตอนดำเนินการของการบดรูปแบบนี้ แสดงดังภาพที่ 2.37



ภาพที่ 2.37 แผนภาพการทำงานของกรบดแบบ Cryogenic Grinding (FHWA, 1995)

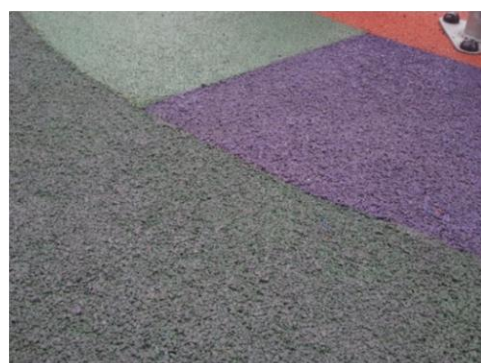
- Wet/Stone Grinding

การบดอย่างลักษณะนี้เป็นการนำเม็ดยางขนาดใหญ่จากที่เป็นผลผลิตจากการบดในสองรูปแบบแรกไปละลายในสารละลายแล้วนำไปบดอีกครั้งด้วยโมหินคล้ายการบดแป้งจนละเอียดมากขึ้นแล้วทำให้แห้งด้วยกรรมวิธีเฉพาะ ลักษณะของเม็ดยางที่ได้จากการบดแบบนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดยางจากการบดด้วยวิธี Ambient Grinding and Granulating แต่มีความละเอียดสูงกว่ามาก โดยรูปแบบการบดนี้สามารถบดให้เม็ดยางมีขนาดตั้งแต่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 40 ถึงค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ได้

2.3.2 ลักษณะการแปรรูปยางบดเพื่อการใช้งาน

ยางบดขนาดต่างๆ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้งานและกรรมวิธีในการผลิต โดยส่วนใหญ่แล้วผลผลิตที่ได้จากการแปรรูปยางบด มีดังต่อไปนี้[34]

- วัตถุดิบตั้งต้นของการผลิตยางรถยนต์ใหม่ โดยสามารถลดปริมาณยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่เป็นวัตถุดิบหลักลงได้บางส่วน หรือเป็นวัตถุดิบสำหรับการหล่อเพิ่มดอกยางให้กับยางรถยนต์ที่ดอกยางสึก
- เชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยยางบดเป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนสูง แต่ต้องกำจัดเขม่าจากการเผาอย่างเหมาะสมด้วย
- ผสมเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์พลาสติก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น
- วัตถุดิบสำหรับการผลิตพื้นที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น ลู่วิ่ง กระเบื้องยาง หรือพื้นสนามเด็กเล่น เป็นต้น



ภาพที่ 2.38 พื้นสนามเด็กเล่นที่ผลิตจากยางบด

- เป็นสารเติมแต่งสำหรับแอสฟัลต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านต่างๆให้แก่แอสฟัลต์ เช่น ความยืดหยุ่น ความสามารถในการยึดเกาะที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น โดยรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.4 วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด (Crumb Rubber Modified Asphalt)

การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบด หรือ Crumb Rubber Modified Asphalt (CRM) เป็นรูปแบบหนึ่งของการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องด้วยคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านปรับปรุงแล้วดีขึ้นหลากหลายประการ เช่น เพิ่ม Stiffness เมื่อมีอุณหภูมิใช้งานสูง เพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่วัสดุเมื่อมีอุณหภูมิใช้งานปานกลาง ลดการเกิดการแตกร้าวจากความล้า (Fatigue Cracking) และลดการเปลี่ยนแปลงของ Stiffness ที่อุณหภูมิใช้งานต่ำ ลดปัญหาการแตกร้าวจากอุณหภูมิ (Thermal Cracking) ได้[35]

2.4.1 ประวัติการพัฒนาวสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด

พัฒนาการของ CRM นั้นเริ่มต้นอย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรมในช่วงยุค ค.ศ.1980 จากความต้องการในการจัดการยางรถยนต์ที่หมดสภาพการใช้งาน กลายเป็นขยะจำนวนมาก ซึ่งการจัดการขยะในช่วงเวลานั้น คือ การเผาทำลาย ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดการขยะที่ยังมีคุณภาพไม่ดีพอ ก่อให้เกิดมลพิษมาก นอกจากนั้นแล้วยังเป็นแหล่งกำเนิดของสัตว์ เช่น ยุง ที่เป็นพาหะของโรคต่างๆอีกด้วย

ในช่วงปลายของยุค ค.ศ.1980 จึงได้เริ่มมีการทดลองเติมยางรถยนต์บดลงในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเป้าหมายเริ่มแรกเพื่อเป็นการจัดการขยะอีกรูปแบบหนึ่ง ลดปัญหาด้านมลพิษ หลังจากการใช้งานไปในเวลาหนึ่งจึงเริ่มมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของถนนที่ก่อสร้างด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตที่มียางบดเป็นส่วนผสม พบว่ามีคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมหลายประการที่ดีเพิ่มขึ้น จึงมีการพัฒนารูปแบบและขั้นตอนการผลิตต่างๆขึ้น จนได้เป็นรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบดจนถึงปัจจุบัน เนื่องด้วยองค์ประกอบเชิงเคมีของยางรถยนต์ที่มีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตคือ ยางธรรมชาติ ที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น ยางสังเคราะห์ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ และ carbon black ที่ช่วยเพิ่มความคงทนให้แก่แอสฟัลต์[36]

อย่างไรก็ตามการเติมยางบดเพื่อเป็นสารผสมเพิ่มในการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตส่งผลให้การก่อสร้างถนนด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบนี้มีราคาที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบทั่วไป อีกทั้งรายละเอียดของขั้นตอนการผลิตที่ยุ่งยากมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ดีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ถนนที่สร้างจากแอสฟัลต์แบบ CRM มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าและมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่น้อยกว่า จึงมีความคุ้มค่ามากเพียงพอในการนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ CRM มาใช้งานจริง[37] ตัวอย่างดังภาพที่ 2.39 เป็นถนนระหว่างเมืองสาย 40 ในรัฐออริโซนา สหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นถนนผิวทางคอนกรีตที่ผ่านการบูรณะด้วยวิธีการปูทับด้วยผิวใหม่ (overlay) เป็นเวลา 8 ปีผ่านไป ด้านซ้ายเป็นช่วงที่ overlay ความหนา 4 นิ้วด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไป ซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีความเสียหายบนผิวทางที่ overlay อย่าง

ชัดเจนมากกว่ารูปด้านขวา ที่เป็นการ overlay ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ CRM ซึ่งมีความหนา 2 นิ้ว



ภาพที่ 2.39 ถนนสาย 40 ในรัฐออริกอน สหรัฐอเมริกา
(Douglas D. Carlson, 1999)

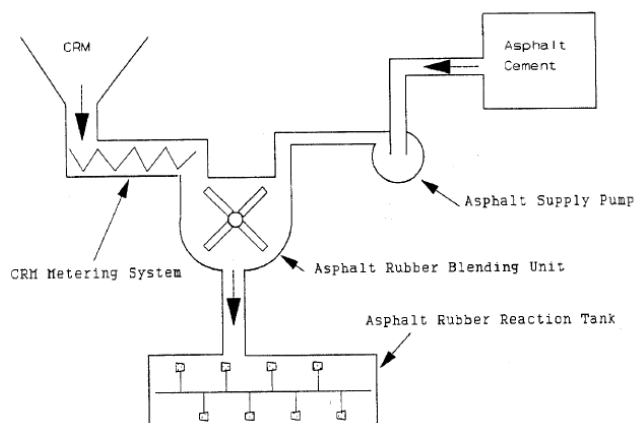
2.4.2 รูปแบบการปรับปรุงคุณภาพวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบด

จากพัฒนาการของ CRM มาอย่างยาวนานตั้งแต่ยุค ค.ศ. 1980 ส่งผลให้มีการพัฒนา รูปแบบการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบดหลากหลายกรรมวิธี หาก แบ่งตามหลักการแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรรมวิธีหลัก คือ[38]

- Wet Process

หลักการคือ การนำยางบดขนาดเล็กผสมลงในแอสฟัลต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ วัสดุเชื่อมประสานให้สามารถใช้งานได้ดียิ่งขึ้น ปรับปรุงคุณสมบัติเชิงเคมีของแอสฟัลต์บาง ประการให้ดีขึ้น โดยทั่วไปใช้ขนาดที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 หรือละเอียดกว่า ในสัดส่วน 18 - 26% โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ และทำการผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 191 - 218°C เป็นเวลา 1 -2 ชั่วโมง

อุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพรูปแบบนี้ คือ อุปกรณ์ผสมแอสฟัลต์กับยางบด ลักษณะเป็นชุดผสมด้วยใบพัดให้ยางบดกระจายอยู่ใน แอสฟัลต์ได้อย่างทั่วถึง หลังจากนั้นส่งแอสฟัลต์ที่ผสมยางบดแล้วเข้าสู่ชุดอุปกรณ์เร่ง ปฏิกริยา มีลักษณะเป็นถังเก็บที่สามารถให้ความร้อนได้โดยมีชุดกวนขนาดเล็กอีกชุดหนึ่ง เพื่อให้เม็ดยางไม่เกิดการแยกตัวขณะที่ทำการเร่งปฏิกริยา หรือในบางกรณีจะรวมชุดผสม และชุดเร่งปฏิกริยาเข้าด้วยกัน คือสามารถให้ความร้อน ผสมและกวนวัสดุได้ภายในห้อง ผสมเดียวกัน และชุดอุปกรณ์ขนถ่ายแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงแล้วเพื่อนำไปใช้งานในรูปแบบ ต่างๆต่อไป โดยรายละเอียดเป็นดังภาพที่ 2.40



ภาพที่ 2.40 องค์ประกอบพื้นฐานของการปรับปรุงแอสฟัลต์แบบ Wet process (FHWA, 1992)

- Dry Process

หลักการคือ การเติมยางบดลงไปในส่วนผสมของมวลรวม เพื่อแทนที่มวลรวมบางขนาดหรือทำหน้าที่เป็นสารผสมเพิ่มโดยการผสมยางบดเข้าในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยตรงในระหว่างกระบวนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยไม่ผ่านการผสมเข้ากับแอสฟัลต์ก่อนนำมาใช้งาน โดยการปรับปรุงคุณภาพรูปแบบนี้ใช้ได้กับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนเท่านั้น

จุดเด่นของการปรับปรุงคุณภาพแบบ Dry Process คือ ความง่ายในการนำไปใช้งาน เนื่องจากเป็นการเติมยางบดเข้าไประหว่างกระบวนการผลิตแอสฟัลต์แบบทั่วไป โดยไม่ต้องปรับปรุงระบบการผลิตแต่อย่างใด เปรียบเสมือนยางบดเป็นมวลรวมชนิดหนึ่ง สามารถใช้งานได้กับกระบวนการผลิตทั้งแบบ Batch และ Drum โดยมีรูปแบบการนำยางบดเข้าสู่กระบวนการผลิตเช่นเดียวกับการนำมวลรวมประเภทหินเข้าสู่ระบบการผลิต

สำหรับยางบดที่เหมาะสมกับการนำมาใช้กับรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพแบบนี้ควรเป็นยางบดขนาดเม็ดค่อนข้างใหญ่ โดยมีขนาดเม็ดยางที่ใหญ่ที่สุดไม่เกิน 1/16 ถึง 1/8 นิ้ว และมีสัดส่วนในการใช้งานไม่เกิน 3 – 5% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด ซึ่งทำให้ยางบดที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้วยรูปแบบ Dry Process มีปริมาณมากกว่าการปรับปรุงคุณภาพแบบ Wet Process 2 – 4 เท่า[35]

2.4.3 การใช้งานวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด

จากคุณสมบัติทางวิศวกรรมหลากหลายประการของการปรับปรุงวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบด ไม่ว่าจะเป็นการปรับปรุงที่ตัวแอสฟัลต์หรือการปรับปรุงที่ส่วนผสมมวลรวมก็ตาม ส่งผลให้มีการพัฒนาต่อยออดนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลายรูปแบบ โดยรูปแบบการนำไปใช้งานที่เป็นที่นิยมโดยทั่วไป มีดังนี้[38]

- Crack and Joint Sealants

แอสฟัลต์ที่ผ่านปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด โดยผ่านกรรมวิธีแบบ Wet Process สามารถนำมาใช้งานเป็นวัสดุอุดประสานรอยแตกและรอยต่อบนผิวทางได้เป็นอย่างดี เนื่องจากคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ดีขึ้นจากการปรับปรุงเหมาะสมกับการใช้งานเป็นวัสดุอุดประสานเป็นอย่างดี อาทิ แอสฟัลต์จะมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงสภาพเนื่องจากอุณหภูมิ และต้านทานการเกิด aging ได้ดีขึ้น นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาของยางบดภายใต้เงื่อนไขกรรมวิธีปรับปรุงแบบ Wet Process ส่งผลให้ยางบดจับตัวกันเป็นห่วงโซ่โพลีเมอร์ภายในเนื้อแอสฟัลต์ ซึ่งจะเพิ่มความหนืด (Viscosity) ที่อุณหภูมิสูงให้แก่แอสฟัลต์เมื่อเทียบกับแอสฟัลต์แบบทั่วไป โดยที่ความหนืดในช่วงอุณหภูมิต่ำจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และ carbon black ในเนื้อยางบดมีคุณสมบัติในการชะลอการเกิด aging ได้ นอกจากนี้แล้วโดยภาพรวมพบว่าวัสดุมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะที่สูงมากยิ่งขึ้นด้วย จึงสามารถเชื่อมประสานวัสดุผิวทางที่เกิดรอยแตกและหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ลดลงจนเกิดแรงดึงที่สูงมากได้ดีขึ้นกว่าวัสดุอุดประสานที่เป็นแอสฟัลต์แบบทั่วไปอย่างชัดเจน

ขอแนะนำสำหรับการนำแอสฟัลต์แบบปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบดไปใช้งานเป็นวัสดุอุดประสานรอยแตก เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุด คือ การให้ความร้อนแก่วัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 175°C เป็นเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง เพื่อให้วัสดุมีความเหลวเพียงพอที่จะทำงานได้อย่างสะดวก และให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างยางบดกับแอสฟัลต์ได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้แล้วการเตรียมพื้นผิวที่จะทำการอุดประสานก็มีความสำคัญต่อคุณภาพการซ่อมบำรุงเช่นกัน โดยควรแต่งรูปร่างของรอยแตก ร้าวหรือรอยต่อให้เป็นร่องที่มีอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกอยู่ที่ 1:1 จะดีที่สุด และไม่ควรมีอัตราส่วนเกิน 2:1 และพื้นผิวควรสะอาดและแห้ง นอกจากนี้แล้วขณะที่ทำการซ่อมบำรุง พื้นผิวทางควรมีอุณหภูมิอย่างน้อย 5°C เพื่อประสิทธิภาพในการเชื่อมประสานที่ดีอีกด้วย

- Surface Treatments

หลักการของการคืนสภาพให้กับผิวทางด้วยการใช้แอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพแบบ CRM ด้วยวิธี Wet Process รูปแบบนี้ คือการปูทับผิวทางด้วยมวลรวมและฉีดยึดแอสฟัลต์ดังกล่าวลงบนมวลรวมที่ปูไว้ให้เคลือบกันดี แล้วจึงบดอัดให้แน่นและมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งเรียกรูปแบบการคืนสภาพผิวทางนี้ว่า Stress Absorbing Membrane (SAM)

แอสฟัลต์ที่นำมาใช้ในการคืนสภาพผิวทางแบบ SAM นั้น จะใช้แอสฟัลต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วมาทำละลายด้วยสารละลายจำพวกน้ำมันก๊าด (Kerosene) ให้เจือจางมากพอที่จะฉีดพ่นได้ โดยทั่วไปแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพจะมีปริมาณยางบดอยู่ที่ 20 – 30% โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ แต่หลังจากละลายให้เจือจางแล้วจะเหลือปริมาณยางบดอยู่ที่ 5 – 7% โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์

สำหรับมวลรวมที่เหมาะสมในการปูลงบนผิวทาง ควรมีขนาดละเอียดและรูปร่างที่เหมาะสม โดยขนาดละเอียดที่ใช้ควรเป็น Uniform Graded ที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานขนาด 3/8 ถึง 1/4 นิ้ว และมีความสะอาดเพียงพอ เนื่องจากก่อนการนำมวลรวมไปปูลงบนผิวทางนั้นต้องทำการเคลือบมวลรวมด้วยแอสฟัลต์แบบทั่วไปก่อน (Hot Precoated) ในสัดส่วน 0.3 – 0.5 % ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างมวลรวมกับแอสฟัลต์แบบ CRM

ในการคืนสภาพผิวทางเนื้อที่ 1 ตารางเมตร จะใช้ปริมาณของแอสฟัลต์แบบ CRM ที่เจือจางแล้วประมาณ 2.7 ลิตร และแอสฟัลต์แบบปกติสำหรับการ Precoated ประมาณ 19 กิโลกรัม ซึ่งความยากของการทำงานอยู่ที่ความหนืดของแอสฟัลต์แบบ CRM ที่ถึงแม้ว่าจะเจือจางแล้วก็ตาม แต่ยังคงมีความหนืดมากกว่าแอสฟัลต์แบบปกติที่เจือจางแล้ว จึงจำเป็นต้องปรับปรุงระบบการฉีดพ่นแอสฟัลต์ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่าปกติ

จุดเด่นของการคืนสภาพผิวด้วยรูปแบบ SAM คือการชูดเด่นด้านคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมที่ดีขึ้นของแอสฟัลต์แบบ CRM ส่งผลให้ชั้น SAM มีความทนทานต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมากขึ้น มีความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพยึดเกาะที่สูง ลดอัตราการเกิด aging นอกจากนั้นแล้ว SAM สามารถต้านทานและชะลอการเกิดการแตกร้าวแบบสะท้อน (Reflective Cracking) จากความเสียหายแบบแตกร้าวเดิมที่เกิดขึ้นบนผิวทางเดิมได้ดีกว่าการคืนสภาพผิวทางด้วยวิธีการอื่นๆ

- Composite Design

หลักการของรูปแบบการประยุกต์ใช้งานรูปแบบนี้ มีความคล้ายคลึงกับการคืนสภาพผิวด้วยรูปแบบ SAM มาก หลักการก่อสร้างคล้ายกันและประโยชน์ที่ได้รับคล้ายคลึงกัน ซึ่งมาจากคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เพียงแต่รูปแบบนี้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของแอสฟัลต์แบบ CRM ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นชั้นผิวใหม่ แต่ทำหน้าที่เป็นชั้นที่ขึ้นระหว่างผิวทางเดิมกับผิวทางใหม่ที่ก่อสร้างด้วยวิธีการ Overlay จึงเรียกชั้นวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์แบบ CRM นี้ว่า Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI) โดยทั่วไป SAMI แบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ SAMI แบบ 2 ชั้น (Two-layer SAMI) และ SAMI แบบ 3 ชั้น (Three-layer SAMI)

SAMI แบบ 2 ชั้น คือ การก่อสร้างวัสดุชั้น SAMI ทับลงบนผิวทางเดิมโดยตรงและ overlay ด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนแบบทั่วไปที่ความหนาอยู่ในช่วง 1 – 3 นิ้ว ซึ่งรูปแบบ SAMI 2 ชั้นจะเหมาะสำหรับผิวทางเดิมที่สภาพผิวทางมีความสม่ำเสมอและค่อนข้างเรียบ ไม่เกิดความเสียหายหนักบนผิวทาง หาก overlay บนผิวทางคอนกรีตที่มีรอยต่อ สภาพของรอยต่อต้องไม่มีความเสียหายมากนัก

สำหรับ SAMI แบบ 3 ชั้น เริ่มการก่อสร้างโดยการปรับระดับของผิวทางเดิมด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนแบบทั่วไป เพื่อให้ผิวทางเรียบเพียงพอต่อการก่อสร้าง SAMI

หลังจากนั้นก่อสร้างชั้น SAMI ทับลงบนผิวทางที่ปรับระดับแล้ว และ Overlay ด้วยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน ความหนาอยู่ในช่วง 1 – 3 นิ้วอีกชั้น โดยรูปแบบการก่อสร้างนี้เหมาะสำหรับผิวทางที่มีสภาพไม่ค่อยเรียบและไม่สม่ำเสมอเท่าที่ควร อีกทั้งเกิดความเสียหายบนผิวทางหรือรอยต่อมาก หากสภาพผิวทางเงื่อนไขดังกล่าวใช้การซ่อมบำรุงแบบ SAMI 2 ชั้น ความเสียหายบนผิวทางจะส่งผลให้ชั้น SAMI เกิดความเสียหาย มีความไม่ต่อเนื่องในชั้น SAMI เกิดหน่วยแรงขนาดใหญ่กระทำต่อชั้น SAMI บริเวณที่ไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของชั้น SAMI ไม่ดีเท่าที่ควร

- Hot Mix Asphalt

การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนด้วยยางบด เป็นรูปแบบการประยุกต์ใช้ยางบดที่เป็นที่แพร่หลายมากที่สุด และสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลายมากที่สุด ใช้ได้กับทุกรูปแบบขนาดคละ อาทิ Dense Graded Gap Graded และ Open Graded นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทั้งกระบวนการ Wet และ Dry process โดยมีเทคนิคการทำงานที่หลากหลาย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- McDonald Technology

หลักการของการนำยางบดมาประยุกต์ใช้งานสำหรับเทคนิคนี้ คือ การปรับปรุงคุณภาพที่วัสดุแอสฟัลต์ด้วยยางบดตามกรรมวิธี Wet Process ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับมวลรวมที่มีขนาดคละทุกรูปแบบได้ โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีการใดก็ตาม คือ ควรคำนึงถึงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงแล้วซึ่งเปลี่ยนแปลงไป อาทิ อุณหภูมิการผสมและอุณหภูมิการบดอัดที่ต้องเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากความหนืดของแอสฟัลต์ที่สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการที่แอสฟัลต์มีความหนืดเพิ่มมากขึ้น คือ ความหนาของแอสฟัลต์ที่เคลือบมวลรวมจะเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งแอสฟัลต์มีความยืดหยุ่นที่สูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้วสามารถรับแรงกระทำที่สูงมากขึ้น เนื่องจากแรงบางส่วนถูกดูดซับด้วยแอสฟัลต์ และมีการเสีรูปร่างของวัสดุลดลงมากกว่าการใช้แอสฟัลต์คอนกรีตแบบปกติเป็นวัสดุเชื่อมประสาน เนื่องจากแอสฟัลต์มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนั้นแล้ว การบดอัดตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ควรปล่อยให้วัสดุเย็นตัวลงก่อนที่จะนำตัวอย่างออกจากแม่แบบ หรือนำออกจากแม่แบบแต่ให้แรงกระทำ (Confinement) แก่ตัวอย่างจนกว่าวัสดุจะเย็นตัว เพื่อลดปัญหาการบวมตัว (swell) ของตัวอย่าง ซึ่งอาจส่งผลให้ขนาดของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงจนไม่สามารถทดสอบได้ หรือค่าที่ทดสอบได้ไม่ตรงกับค่าที่ออกแบบไว้ เนื่องจากตัวอย่างมีความหนาแน่นลดลงจากการที่ปริมาตรตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น

โดยทั่วไป สัดส่วนปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับขนาดคละใดๆจะเพิ่มขึ้นตาม สัดส่วนของยางบดในวัสดุแอสฟัลต์ที่นำมาใช้งานกับมวลรวมขนาดคละนั้นๆ เช่น จาก การทดสอบได้สัดส่วนแอสฟัลต์(แบบปกติ) ที่เหมาะสมอยู่ที่ 5% ของน้ำหนักส่วนผสม ทั้งหมด หากเปลี่ยนไปใช้แอสฟัลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด 20% ของน้ำหนัก แอสฟัลต์ สัดส่วนของแอสฟัลต์แบบ CRM ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 6% (5×1.20) ของ น้ำหนักส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด เป็นต้น

สำหรับการก่อสร้างสายทางโดยการใช้ออสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์แบบ CRM นั้นใกล้เคียงกับการก่อสร้างด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตแบบปกติ แต่มีข้อแตกต่างใน กระบวนการก่อสร้างที่สำคัญ 5 ประการ คือ

1. การผสมยางบดเข้ากับแอสฟัลต์เป็นกระบวนการที่แยกออกจากกระบวนการ ผลิต เนื่องจากต้องมีการควบคุมคุณภาพในกระบวนการผสมและเร่งปฏิกิริยา ให้ดีเพียงพอ
2. อุณหภูมิสำหรับขั้นตอนต่างๆในการก่อสร้าง คือ อุณหภูมิผสม อุณหภูมิขณะปู ลงบนสายทาง และอุณหภูมิต่ออัด จะสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบปกติ โดย สามารถพิจารณาอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนได้จาก Temperature-Viscosity Chart ของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ CRM นั้นๆ
3. เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้งาน เช่น ล้อเหล็กของรถบดอัด กระบะสำหรับ บรรจุแอสฟัลต์คอนกรีต ไม่ควรทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่ทำมาจาก สารประกอบปิโตรเลียม เนื่องจากแอสฟัลต์แบบ CRM จะทำปฏิกิริยากับ สารประกอบปิโตรเลียม จะเกิดสภาพที่เหนียวติดกับพื้นผิวของอุปกรณ์ ควรทำ ความสะอาดด้วยสารชะล้างประเภทอื่น
4. ไม่ควรใช้รถบดล้อยางในการบดอัด เนื่องจากความเหนียวของแอสฟัลต์แบบ CRM ทำให้มีโอกาสที่วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะเกาะติดกับล้อยางสูง
5. ไม่ควรเปิดการใช้งานสายทางเร็วเกินไป เนื่องจากมีโอกาสที่วัสดุแอสฟัลต์ คอนกรีตจะเกาะติดกับยางของรถยนต์ได้ หากมีความจำเป็น สามารถลดการ เกาะติดของแอสฟัลต์คอนกรีตกับยางรถยนต์ได้ ด้วยการโรยทรายลงบนพื้นผิว ที่บดอัดเสร็จแล้วทันที ในสัดส่วน 1 ถึง 1.5 กิโลกรัมต่อพื้นที่ผิวทาง 1 ตาราง เมตร (แต่การแก้ปัญหาในรูปแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้กับผิวทางที่มีขนาดคละเป็น Open Graded)

อย่างไรก็ดีการติดตามตรวจสอบหลังจากการเปิดใช้งานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะจะมีประโยชน์ในการปรับปรุงกระบวนการก่อสร้างในครั้งต่อไป เช่น อุณหภูมิใน กระบวนการทำงานแต่ละขั้นตอนที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้แอสฟัลต์ที่เคลือบมวลรวมมี ความหนาแน่นมากเกินไป จนเกิดการเยิ้มของยางบนพื้นผิวถนนได้ ซึ่งกระบวนการพัฒนา

ปรับปรุงรายละเอียดในกระบวนการก่อสร้างให้เหมาะสมต้องติดตาม บันทึก และปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

สำหรับจุดเด่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์แบบ CRM คล้ายคลึงกับทุกรูปแบบที่ผ่านมา ที่มีการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์โดยกระบวนการ Wet Process คือ คุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของแอสฟัลต์ที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของแอสฟัลต์คอนกรีตสูงขึ้นไปด้วย คือ มีความทนทานในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น มีความยืดหยุ่นสูง ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพเนื่องจากอุณหภูมิได้ดี เป็นต้น

○ PlusRide Technology

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบดรูปแบบนี้ พัฒนาให้ใช้กับมวลรวมที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded โดยใช้กระบวนการ Dry Process ในการเติมยางบดเข้าสู่ส่วนผสม ซึ่งรายละเอียดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านการบดอัดแล้ว คือ มีช่องว่างอากาศในวัสดุอยู่ที่ 2 – 4% เส้นกราฟของขนาดคละมีลักษณะแคบ แต่มีมวลรวมที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 มากพอสมควร ซึ่งตามคำแนะนำแล้วได้มีการกำหนดขนาดคละที่เหมาะสมไว้ให้ 3 รูปแบบ ตามขนาดมวลรวมสูงสุดในขนาดคละนั้นๆ

สำหรับยางบดที่นำมาใช้งาน ควรมีช่วงของขนาดเม็ดยางอยู่ที่ค้ำงบนตะแกรงขนาด 1/4 นิ้ว ถึงขนาดที่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 โดยสัดส่วนที่ผสมลงในส่วนผสมมวลรวมนั้นจะใสไม่เกิน 3% ของน้ำหนักแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาในอดีตพบว่าหากใส่ยางบดในสัดส่วน 2.5 – 4% ยังให้ประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตในระดับที่น่าพอใจอยู่ ขณะที่แอสฟัลต์ที่ใช้งานกับการปรับปรุงคุณภาพรูปแบบนี้เป็นประเภทเดียวกับที่ใช้งานในแอสฟัลต์คอนกรีตทั่วไป ซึ่งปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 7.5 – 9%

รูปแบบการเติมยางบดเข้าไปในส่วนผสมมวลรวมในขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมนั้น ใช้การเติมยางบดเข้าสู่มวลรวมที่ได้ให้ความร้อนไว้จนมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิผสม คลุกเคล้าผสมให้ยางบดและหินเข้ากันดี แล้วจึงเติมแอสฟัลต์ในสัดส่วนที่เหมาะสม คลุกเคล้าอีกครั้งและบ่มส่วนผสมทั้งหมดในเตาอบที่ 160°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนทำการบดอัด และหลังจากการบดอัดแล้วต้องทิ้งให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเย็นตัวภายในแม่แบบโดยควบคุมไม่ให้เกิดการบวมตัวมากเกินไป เพราะจะทำให้ค่าช่องว่างอากาศที่วัดได้จากตัวอย่างนั้นผิดพลาดได้

รูปแบบการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนแบบ PlusRide ออกแบบมาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded ซึ่งยางบดที่ผสมเพิ่มลงไปมีทั้งส่วนที่เป็นเม็ดยางขนาดใหญ่ จนถึงเม็ดยางที่ละเอียดมากจนมีลักษณะเป็นผง โดยเม็ดยางขนาดใหญ่ทำหน้าที่เหมือนมวลรวมที่เป็นยาง เพิ่มคุณสมบัติ

ด้านความยืดหยุ่นให้กับส่วนผสมมวลรวม ในขณะที่ยางเม็ดละเอียด ที่มีขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 ลงไปนั้น จะทำหน้าที่ปรับปรุงแอสฟัลต์โดยเกิดปฏิกิริยาบางส่วนขณะอยู่ในช่วงของการผสมส่วนผสมมวลรวมทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกัน

อย่างไรก็ตามในการก่อสร้างจริงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงบางขั้นตอนของการก่อสร้างเพื่อความสะดวกในการดำเนินงาน เช่น แยกกระบวนการป้อนยางบดเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยตรง เพื่อการควบคุมปริมาณของยางบดในส่วนผสมได้ง่ายขึ้น แต่หากไม่ได้ติดตั้งระบบแยกไว้ก็ไม่ใช่ว่าจะเห็นใหญ่ที่ยากต่อการจัดการแต่อย่างใด นอกจากนั้นแล้ว การควบคุมอุณหภูมิก็เป็นอีกจุดหนึ่งที่สำคัญเช่นกัน โดยอุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีตหลังจากผสมแล้วควรรักษาไว้ที่ระดับ 150 - 175°C จนกว่าจะนำไปใช้งานต่อไป

สำหรับกระบวนการบดอัดจะมีลักษณะใกล้เคียงกับ McDonald Technology คือ หลังจากปิวแล้วต้องรีบทำการบดอัดด้วยรถบดล้อเหล็กเท่านั้น และต้องบดอัดให้ถึงระดับความหนาแน่นที่ต้องการก่อนที่วัสดุส่วนที่เป็นยางจะเย็นและแข็งตัวจนบดอัดไม่ได้ ตามข้อแนะนำคือ ต้องบดอัดให้ได้ตามความต้องการก่อนที่อุณหภูมิวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะลดลงต่ำกว่า 60°C

ประสิทธิภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงคุณภาพมีหลายประการ อาทิ ขนาดคละแบบ Gap Graded จะส่งผลให้พื้นผิวมีความหยาบ เพิ่มค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทาง และการที่มีมวลรวมที่เป็นเม็ดหินขนาดใหญ่ในขนาดคละส่งผลให้มวลรวมสัมผัสกันโดยตรง เพิ่มประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเกิดความเสียหายแบบร่อนล้อ

เมื่อพิจารณาส่วนที่เป็นยางบดในส่วนผสม เม็ดยางขนาดเล็กจะทำหน้าที่ปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ให้ดีขึ้นบางส่วน (เนื่องจากไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้เต็มที่เหมือนรูปแบบ Wet Process) ขณะที่เม็ดยางบดขนาดใหญ่ทำหน้าที่เสมือนมวลรวมประเภทหินขนาดหนึ่ง ทำหน้าที่เพิ่มความฝืดของผิวทางได้บางส่วน นอกจากนั้นเม็ดยางบดยังมีส่วนช่วยในการชะลอการเกิดความเสียหายแบบแตกร้าบนผิวทาง เนื่องจากสามารถดูดซับแรงกระทำต่อมวลรวมได้ซึ่งช่วยลดการขยายตัวของรอยแตกร้า

○ Generic Dry Technology

เป็นการนำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ผสมร้อนแบบ PlusRide มาพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยเป็นกระบวนการเติมยางบดแบบ Dry Process โดยมีข้อแตกต่างในจุดที่สามารถปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตได้ทั้งรูปแบบขนาดคละแบบ Dense Graded และ Gap Graded ซึ่งต่างจากเทคนิค PlusRide ที่ใช้ได้กับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded เท่านั้น

หลักการโดยทั่วไปไม่มีความแตกต่างจากเทคนิค PlusRide มากนัก โดยมีจุดแตกต่างที่เทคนิค PlusRide เน้นไปที่การแทนที่มวลรวมประเภทหินด้วยเม็ดยางบดขนาดใหญ่เป็นหลัก ขณะที่เทคนิค Generic Dry เน้นที่การเพิ่มสัดส่วนของเม็ดยางขนาดเล็ก โดยใช้เม็ดยางที่มีขนาดเล็กกว่าและใช้ในสัดส่วนที่มากกว่า ส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตได้รับการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเม็ดยางที่มีขนาดเล็กสามารถทำปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ได้ดีกว่า อีกทั้งผสมลงไปในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มากกว่าเทคนิค PlusRide จึงมีโอกาสมันจะทำปฏิกิริยาและได้ผลการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์ที่ดีกว่าด้วย

เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Generic Dry ประสบความสำเร็จในการทดลองก่อสร้างในแปลงทดสอบที่รัฐนิวยอร์กและรัฐฟลอริดาในช่วงปี ค.ศ. 1990 โดยรายละเอียดของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ คือ มวลรวมที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded ที่มี maximum aggregate size ขนาด 25 มิลลิเมตร และมี nominal aggregate size อยู่ที่ขนาด 12.5 มิลลิเมตร ส่วนยางบดที่ใส่ลงในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตใส่ลงในสัดส่วนที่ 1 – 3% ของน้ำหนักส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด โดย nominal aggregate size ของยางบดมีขนาดค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 10 และแอสฟัลต์ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานจะมีสัดส่วนอยู่ที่ 7.2% ของน้ำหนักส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด (สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีสัดส่วนยางบด 3%) ขณะที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบปกติมีปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 6%

○ Chunk Rubber Asphalt Concrete

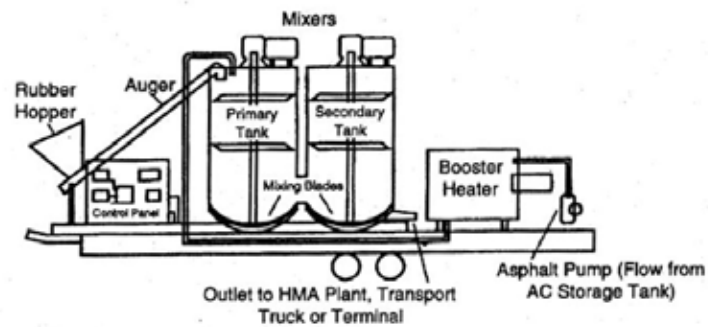
การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเทคนิคนี้มีต้นกำเนิดมาจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิค PlusRide เช่นเดียวกัน โดยมีเป้าหมายเพื่อผลิตผิวทางที่สามารถลดการเกาะตัวของหินบนผิวทางได้

หลักการของเทคนิคนี้ คือ การปรับปรุงขนาดละเอียดของมวลรวมแบบ Gap Graded จากข้อแนะนำของเทคนิค PlusRide ให้มีลักษณะขนาดละเอียดเป็นแบบ Dense Graded โดยที่ยังคงมี nominal aggregate size เท่ากับขนาดละเอียดแบบ Gap Graded ขณะที่ขนาดละเอียดของยางบดปรับให้มีช่วงที่แคบลง แต่ maximum crumb rubber size มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยขนาดที่แนะนำจะอยู่ระหว่าง 1/2 นิ้ว ถึง ขนาดค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 ในขณะที่รายละเอียดอื่นๆ เช่นอุณหภูมิการทำงาน การบดอัดไม่แตกต่างจากเทคนิค PlusRide แต่อย่างใด

○ Continuous Blending Asphalt Rubber

เทคนิคการปรับปรุงรูปแบบนี้ เป็นการพัฒนาต่อเนื่องมาจากเทคนิค McDonald Wet Process ซึ่งต้องใช้เวลาในการผสมและรอให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างยางบดและ

แอสฟัลต์อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงพร้อมที่จะนำแอสฟัลต์ดังกล่าวไปใช้งาน โดยระยะเวลาที่กระบวนการทำปฏิกิริยาจะเสร็จสมบูรณ์แตกต่างกันไปตามปัจจัยต่างๆ ซึ่งหนึ่งในปัจจัยดังกล่าวคือขนาดของยางบด ซึ่งเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพนี้ใช้ขนาดของยางบดที่มีลักษณะเม็ดยางละเอียดมาก ในขนาดที่ค้ำงบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 80 ร่วมกับการพัฒนากระบวนการผสมและเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้อยู่ในชุดอุปกรณ์เดียวกัน เพื่อลดความซับซ้อนของชุดอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพแบบ Wet Process



ภาพที่ 2.41 องค์ประกอบของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์แบบ Continuous Blending (FHWA, 1993)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผสมยางบดในแอสฟัลต์คอนกรีตในรูปแบบ Dry Process

จากเนื้อหาต่างๆที่เกี่ยวข้องเนื่องที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบดนั้นได้รับการพัฒนามาเป็นระยะเวลากว่า 30 ปีและใช้งานแพร่หลายในระดับหนึ่ง และมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ออกมาอย่างต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่มักจะเป็นไปในแนวทางของการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเคมีของวัสดุแอสฟัลต์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการที่ทำปฏิกิริยากับยางบด ที่จะส่งผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างไร ซึ่งกล่าวได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่เน้นไปที่ผลการศึกษาจากกระบวนการ Wet Process ซึ่งแตกต่างจากสิ่งที่น่าสนใจ คือ การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยกระบวนการ Dry Process คือการปรับปรุงโดยมุ่งให้ยางบดทำหน้าที่เป็นมวลรวม หรือเป็น Rubber Aggregate ซึ่งผลพลอยได้ของกระบวนการ Dry Process คือเป็นการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์เชื่อมประสานไปในตัว เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dry Process เมื่อยางบดบางส่วนจะละลายและทำปฏิกิริยากับแอสฟัลต์ซึ่งให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกับการปรับปรุงแอสฟัลต์ด้วยวิธีการ Wet Process เพียงแต่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์

จากงานศึกษาในอดีต เกี่ยวกับด้าน Rubber Aggregate ได้มีผู้พัฒนาไปใช้กับงานด้านวัสดุคอนกรีต เช่น Eshmaiel Ganjian[39] ได้ทำการผสมยางบดขนาดต่างๆลงในวัสดุคอนกรีต โดยแบ่งออกเป็นเม็ดยางขนาดใหญ่ที่เติมเข้าไปจะทำหน้าที่ทดแทนมวลรวมหยาบ โดยเตรียมยางบดให้มีขนาดใกล้เคียงกับมวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีต และใส่ลงไปในส่วน 5% 7.5% และ 10% ของน้ำหนักมวลรวมหยาบและเม็ดยางขนาดเล็กที่เติมเข้าไปจะแทนที่ซีเมนต์ โดยเติมลงไปในส่วน 5% 7.5% และ 10% ของน้ำหนักซีเมนต์ หลังจากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆของคอนกรีต เช่น กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึงทางอ้อม Elastic Modulus กำลังรับแรงดึงและกำลังรับแรงอัด พบว่าการเติมยางบดลงไปเพื่อแทนที่มวลรวมหยาบหรือซีเมนต์นั้นไม่ได้ส่งผลให้คุณสมบัติต่างๆที่ทำการทดสอบดีขึ้นกว่าส่วนผสมคอนกรีตรูปแบบทั่วไป (ไม่เติมยางบด) แต่อย่างไรก็ตาม หากเติมลงไปในส่วนที่มากขึ้น คุณสมบัติด้านต่างๆยิ่งด้อยลง แต่ถ้าเติมลงไปในส่วนที่ไม่มากเกินไปนัก คือไม่เกิน 5% ผลการทดสอบคุณสมบัติต่างๆก็ไม่ได้แตกต่างจากส่วนผสมคอนกรีตรูปแบบทั่วไปมากนัก อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

Mark S. Buncher[40] ได้ทำการศึกษาถึงความแตกต่างของกรรมวิธีปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบด ระหว่างกรรมวิธี Wet Process และกรรมวิธี Dry Process แต่เป็นการสนใจกรรมวิธีแบบ Dry Process ที่ใช้ขนาดของเม็ดยางที่เล็กมาก โดยมุ่งเน้นไปในด้านของการให้ยางเม็ดขนาดเล็กทำปฏิกิริยาและไปปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์เป็นหลัก

โดยรูปแบบการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงด้วยวิธีการ Wet Process ด้วยเม็ดยางขนาดต่างๆ ที่มีขนาดเรียกที่ใหญ่ที่สุด ตั้งแต่ผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 40 50 และ 120 โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของแอสฟัลต์ ระหว่างแอสฟัลต์ที่ทำปฏิกิริยากับยางบดโดยสมบูรณ์ (ตัวแทนของ Wet Process) คือผสมยางบดลงในสัดส่วน 15% โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ และปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาที่ 177°C จนกว่า

แอสฟัลต์จะมีค่า Viscosity สูงสุดและคงที่ เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์ที่ทำปฏิกิริยาบางส่วน (ตัวแทนของ Dry Process) คือ แตกต่างกับแอสฟัลต์ในรูปแบบแรกที่เพียงแค่ผสมให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 177°C เท่านั้น

นำแอสฟัลต์ที่ผสมกับยางบดขนาดต่างๆ ทั้งสองกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ไปทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ตามมาตรฐานของ SUPERPAVE โดยทั้งหมดจะนำค่ามาเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์แบบปกติที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (ซึ่งแอสฟัลต์ทั้งหมดที่ใช้ คือ AC10) ผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติต่างๆของแอสฟัลต์ตามมาตรฐานของ SUPERPAVE สำหรับแอสฟัลต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ไม่ว่าจะทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ (Wet Process) หรือทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ (Dry Process) มีคุณสมบัติที่ดีกว่าแอสฟัลต์แบบปกติอย่างชัดเจน เพียงแต่การปรับปรุงแอสฟัลต์แบบแบบ Wet Process ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าแอสฟัลต์ที่ปรับปรุงแบบ Dry Process ขณะที่ขนาดของเม็ดยางขนาดต่างๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแต่อย่างใด

สำหรับการทดสอบช่วงที่สอง เป็นการทดสอบคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้มวลรวมประเภทหินปูน ขนาดละเอียดแบบ Gap Graded โดยเปลี่ยนแปลงปัจจัย คือ แอสฟัลต์ที่นำมาใช้เป็นวัสดุประสาน ที่มีรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพเหมือนกับการทดสอบส่วนที่ 1 คือ แอสฟัลต์ที่ทำปฏิกิริยาสมบูรณ์กับยางบด เป็นตัวแทนของ Wet Process และแอสฟัลต์ที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์กับยางบด เป็นตัวแทนของ Dry Process ซึ่งการทดสอบนี้จะใช้แอสฟัลต์ทั้งสิ้น 5 แบบ คือ ผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 แบบ Wet และ Dry ผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 80 แบบ Wet และ Dry โดยทั้งหมดผสมยางบดลงในสัดส่วน 15% ของน้ำหนักแอสฟัลต์ และแอสฟัลต์แบบปกติสำหรับเปรียบเทียบค่า

เตรียมตัวอย่างโดยการผสมมวลรวมเข้ากับแอสฟัลต์แบบต่างๆ ตามปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งไม่เท่ากันในแต่ละรูปแบบของแอสฟัลต์ แล้วนำเข้าเตาอบที่ 152°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อจำลองสภาพขณะก่อสร้าง แล้วจึงทำการบดอัดเพื่อนำไปทดสอบ

ผลที่ได้จากการทดสอบ Indirect Tension Dynamic Creep และ Resilient Modulus ไม่มีความแตกต่างระหว่างกรรมวิธี Wet Process และ Dry Process แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยแอสฟัลต์แบบปกติ พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตแบบปกติจะมีค่ากำลังรับแรงดึงและ Resilient Modulus ที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญ

Weidong Cao[41] ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงด้วยกรรมวิธีแบบ Dry Process โดยทดสอบกับมวลรวมประเภทหินปูนชนิดปกติที่ใช้งานตามโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเลือกใช้ขนาดละเอียดแบบ Gap Graded ผสมรวมกับแอสฟัลต์เชื่อมประสาน ซึ่งเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตแบบปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลิเมอร์ (PMA) แบบ SBS และยางบดที่ใช้ เป็นยางบดที่แปรรูปจากยางรถยนต์มีขนาดอยู่ในช่วง 1 - 3 มิลลิเมตร หลังจากนั้นออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีการ Marshall ด้วยการบดอัดด้านละ 75 ครั้ง เพื่อหาสัดส่วนของแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับขนาดละเอียดของมวลรวมที่ผสมยางบดเป็นสัดส่วน 1% 2% และ 3% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด

ส่วนผสมที่ไม่ได้มีการเติมยางบด เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบค่า ที่ให้ช่องว่างอากาศในวัสดุที่บดอัดแล้วอยู่ที่ 4%

เมื่อได้ส่วนผสมที่ดีที่สุดแล้ว ทำการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ โดยแบ่งการทดสอบ ออกเป็น 2 การทดสอบ คือ การทดสอบคุณสมบัติด้านทานการเสียรูปถาวร หรือ Rutting ซึ่งทดสอบ โดยอุปกรณ์ Wheel Tracking ที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยแรงกด 0.7 MPa ที่ 42 รอบต่อนาที และการ ทดสอบหาค่า Failure Stiffness Modulus (FSM) ตามมาตรฐานของประเทศจีน ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอก ถึงความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ โดยหากค่านี้มีค่าน้อยแสดงถึงมี ความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวได้มาก โดยเงื่อนไขในการทดสอบ คือ ทดสอบที่อุณหภูมิ -10°C ด้วยอัตราการยุบตัวของตัวอย่าง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

จากผลการทดสอบ เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) พบว่าสัดส่วน ของยางที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ผลการทดสอบมีความเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ หรือกล่าวได้ว่า ปริมาณยางบดที่เติมลงไปในส่วนผสมส่งผลต่อประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจริง และ สามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการต้านทานการเสียรูปถาวรของวัสดุจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีสัดส่วนของ ยางบดเพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบส่วนผสมที่ไม่มียางบด มีค่าอยู่ที่ 2356 รอบต่อมิลลิเมตร เทียบกับ ส่วนผสมที่มียางบด 3% จะได้ค่าการทดสอบที่ 4456 รอบต่อมิลลิเมตร และความสามารถในการ ต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำที่ดีขึ้น เมื่อสัดส่วนของยางบดเพิ่มมากขึ้น

F. Hernandez – Olivares et al.[42] ได้ทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ คอนกรีตด้วยยางบดตามกรรมวิธี Dry Process โดยการศึกษาคุณสมบัติและวิเคราะห์หา องค์ประกอบต่างๆในการทำงานที่เหมาะสมที่สุด เมื่อได้ผลลัพธ์ คือ ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ดี ที่สุดซึ่งผลิตขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่างๆที่เหมาะสมที่สุดตามการทดสอบ จะนำส่วนผสมดังกล่าวไปทำการ ผลิตจริงที่โรงงานผลิตและนำไปทดสอบบู่ผิวทางเพื่อใช้งานจริง (Test Track) และประเมิน ประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้เงื่อนไขสภาวะการใช้งานจริงต่อไป

สำหรับวัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของแอสฟัลต์คอนกรีต ประกอบไปด้วยแอสฟัลต์แบบ AC 60/70 แบบปกติที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ผสมร่วมกับมวลรวมประเภทหิน ซึ่งเป็นหิน คลุกที่มีขนาดละเอียดแบบ Semi Dense Graded และยางบดซึ่งแปรรูปจากยางรถยนต์ โดยเม็ดยางบด มีขนาดเรียกใช้งาน (nominal size) อยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตรและขนาดเม็ดยางที่ใหญ่ที่สุด คือ 1 มิลลิเมตร

การทดสอบ แบ่งออกเป็น 5 ระยะ เริ่มจากการออกแบบส่วนผสมด้วยวิธี Marshall สำหรับ แต่ละสัดส่วนผสม คือ ไม่เติมยางบด และเติมยางบด 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด โดยควบคุมปริมาณแอสฟัลต์ไว้ที่ 5% โดยน้ำหนักของมวลรวม แล้วทดสอบหาค่า %Air void และ Stability ของแต่ละส่วนผสมที่มีสัดส่วนยางบดต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ส่วนผสมที่มียางบดผสมอยู่ 1% เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการศึกษาอื่นๆต่อไป

หลังจากนั้น ระยะที่สอง จะนำผลที่ได้จากระยะแรกมาปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการผสมและบดอัดตัวอย่าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ โดยทั้งหมดกระทำที่อุณหภูมิผสม 150°C คือ

1. แอสฟัลต์คอนกรีตแบบปกติ ที่ไม่ได้ผสมยางบดโดยทำการผสมและบดอัดแบบปกติ
2. แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด 1% โดยคลุกเคล้ากับหินร้อน เติมแอสฟัลต์และคลุกเคล้าจนเข้ากันดีและบดอัดทันที
3. แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด 1% โดยคลุกเคล้ายางบดกับหินร้อน แล้วนำไปบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงเติมแอสฟัลต์ คลุกเคล้าให้เข้ากันและบดอัดทันที
4. แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด 1% โดยผสมหิน ยางบด และแอสฟัลต์เข้าด้วยกัน แล้วนำส่วนผสมทั้งหมดเข้าบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาบดอัด
5. แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด 1% โดยผสมยางบดเข้ากับหินร้อนและแอสฟัลต์ คลุกเคล้าให้เข้ากัน บ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาคลุกเคล้าใหม่อีกครั้ง ก่อนนำไปบดอัด

จากนั้นพิจารณาที่ความหนาแน่นของวัสดุที่บดอัดแล้วเสร็จ พบว่ารูปแบบที่ 5 ให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้วมากที่สุด

ระยะที่สาม คือ การนำรูปแบบการผสมที่ดีที่สุดจากระยะที่สอง มาทดสอบคุณสมบัติคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมต่างๆ เช่น กำลังรับแรงอัด wheel tracking test โดยเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนผสมที่ไม่ได้ผสมยางบด ส่วนผสมที่มียางบดซึ่งใช้เวลาบ่ม 1.5 ชั่วโมง และส่วนผสมที่มียางบดซึ่งใช้เวลาบ่ม 2 ชั่วโมง จากผลการทดสอบ พบว่าส่วนผสมที่มียางบดโดยได้รับการบ่ม 2 ชั่วโมงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ระยะที่สี่ คือ การนำรูปแบบการผสมในขั้นตอนที่สอง คือ รูปแบบที่ 5 ที่ใช้เวลาในการบ่ม 2 ชั่วโมงตามผลการทดสอบระยะที่สามไปปรับใช้ให้เข้ากับโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต แล้วทำการก่อสร้างจริงบนแปลงทดสอบความยาว 2.5 กิโลเมตร โดยปูเป็นผิวทางสลับกั้นระหว่างสัดส่วนผสมแบบปกติและสัดส่วนผสมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบด โดยปูสลับกั้นช่วง ช่วงละ 500 เมตร

สำหรับระยะที่ห้า เป็นการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุเมื่อผ่านการใช้งานเป็นวัสดุผิวทางจริง ซึ่งพบว่าถึงแม้การก่อสร้างถนนด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตแบบปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบดจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการก่อสร้างแบบทั่วไป แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ดีขึ้นและอายุการใช้งานของผิวทางที่ยาวนานขึ้น ย่อมมีความคุ้มค่าที่จะนำไปใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรมได้

F. Moreno et al.[43] ได้ดำเนินการศึกษาถึงสัดส่วนของจำนวนยางบดที่เหมาะสมและระยะเวลาในการย่อยสลายยางบด (ช่วงเวลาที่ยางบดเริ่มสัมผัสกับแอสฟัลต์) สำหรับการปรับปรุงคุณภาพวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยการผสมยางบดแบบกรรมวิธี Dry Process ซึ่งวัสดุที่นำมาเป็นส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต คือ มวลรวมประเภทหิน เป็นหินปูนที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded โดยมีขนาดของมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่ 12 มิลลิเมตร และไม่มีหินขนาด 2 -4 มิลลิเมตรอยู่ในส่วนผสมมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ แอสฟัลต์ที่ใช้กับส่วนผสมที่ไม่มียางบดจะเป็นแอสฟัลต์ประเภทปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลิเมอร์ (PMA) และส่วนผสมที่มียางบดเป็น

องค์ประกอบจะใช้แอสฟัลต์แบบปกติ เกรด AC 50/70 โดยจุดมุ่งหมายของการใช้แอสฟัลต์คนละประเภท เนื่องจากต้องการให้ผลการทดสอบที่ชัดเจนมากขึ้นว่า ยางบดสามารถปรับปรุงให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณสมบัติที่ดีกว่าหรือใกล้เคียงกับส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์แบบ PMA ซึ่งมีราคาสูงกว่าสำหรับยางบดที่ใช้ เป็นยางบดจากยางรถยนต์โดยที่มีขนาดของเม็ดยางที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่ 0.6 มิลลิเมตร

สำหรับการออกแบบการทดลอง แบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยด้านสัดส่วนยางบดที่ใส่ ตั้งแต่ 0.5%, 1% และ 1.5% ของน้ำหนักส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด รวมกับส่วนผสมที่ไม่มียางบดเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบ และปัจจัยด้านระยะเวลาการย่อยสลาย คือ เวลาที่ยางบดเริ่มสัมผัสและทำปฏิกิริยากับแอสฟัลต์จนกระทั่งเริ่มการบดอัด โดยเวลาในส่วนนี้ พิจารณาที่ 45, 90 และ 120 นาที โดยในแต่ละรูปแบบของปัจจัยที่ศึกษา จะใช้สัดส่วนของแอสฟัลต์ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต 3 ระดับ คือ 4%, 4.5% และ 5% ของน้ำหนักส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด

เงื่อนไขในการผสม คือ อบหินที่อุณหภูมิ 180°C สำหรับส่วนผสมที่จะผสมยางบด และที่ 170°C สำหรับส่วนผสมแบบปกติ คลุกเคล้าให้มวลรวมหินแต่ละขนาดเข้ากันดี แล้วจึงเติมยางบดคลุกเคล้าให้เข้ากันอีกครั้ง แล้วจึงเติมแอสฟัลต์ลงไปผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันอีกครั้ง และปล่อยให้ยู่ในช่วงเวลาย่อยสลาย โดยในขั้นตอนปล่อยให้เกิดการย่อยสลายจะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 160 -165°C หลังจากนั้นบดอัดด้วยค้อน Marshall แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบหาค่าตัวแปรต่างๆ ตามหลักการของ Marshall เช่น Flow Stability Density และสัดส่วนของแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด

จากผลการทดสอบ สามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาในการย่อยสลายยางบดหรือทำปฏิกิริยา ไม่ส่งผลต่อสัดส่วนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสัดส่วนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละรูปแบบของระดับปัจจัย ทั้งหมด 10 รูปแบบนั้นจะมีสัดส่วนแอสฟัลต์อยู่ที่ 4.5 - 5 % นอกจากนั้นแล้วคุณสมบัติของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น ความหนาแน่น ช่องว่างอากาศก็ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ได้ส่งผลต่อระดับของการบดอัดต่อวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่กระทำได้อะไรอย่างใด

ด้านสัดส่วนของยางบดที่ผสมลงในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีผลต่อความแน่นของการบดอัดที่ทำได้และช่องว่างอากาศที่คงเหลืออยู่ หากสัดส่วนของยางบดสูงมากขึ้นความแน่นจะน้อยลงและช่องว่างอากาศจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากคุณสมบัติด้านการคืนตัวของวัสดุประเภทยาง ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความยากในการบดอัดวัสดุที่หน้างานก่อสร้างจริงด้วย

หลังจากนั้น F. Moreno et al.[44] ได้ทำการศึกษาต่อเนื่องถึงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งปรับปรุงคุณภาพด้วยยางบดที่เปลี่ยนแปลงไปจากสัดส่วนของยางบดที่ผสมและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกันไป ซึ่งรูปแบบการออกแบบส่วนผสมและปัจจัยต่างๆที่คำนึงถึงในการศึกษาเป็นรูปแบบเดียวกันกับงานศึกษาก่อนหน้านี้

การทดสอบที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ได้แก่ คุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรูปถาวร และคุณสมบัติด้านการอ่อนไหวต่อความชื้น (Moisture Sensitivity)

การทดสอบคุณสมบัติความอ่อนไหวต่อความชื้นจะบดอัดตัวอย่างจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งสิ้น 10 รูปแบบ ตามงานศึกษาก่อนหน้า ซึ่งแต่ละรูปแบบจะใช้ตัวอย่าง 6 ชั้น บดอัดแบบ Marshall จำนวน 50 ครั้งต่อด้าน ตัวอย่างชุดแรก จำนวน 3 ชั้น เก็บที่สภาพอุณหภูมิห้องปกติ เป็นตัวแทนของสภาวะแห้ง และตัวอย่างชุดหลัง จำนวน 3 ชั้น เป็นตัวแทนของสภาวะเปียก คือ บ่มตัวอย่างในน้ำอุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยในช่วง 30 นาทีแรกจะดูดอากาศออกจากช่องว่างอากาศในวัสดุด้วยเครื่องสูบลูญากาศ (Vacuum Pump)

หลังจากนั้น นำตัวอย่างมาทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Test) โดยก่อนการทดสอบจะปรับสภาพตัวอย่างที่อุณหภูมิ 15°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำค่าเฉลี่ยของเงื่อนไขก่อนบ่มแบบแห้งและแบบเปียกมาคำนวณหาค่า %ITSR โดยการนำค่าจากการทดสอบของการบ่มแบบเปียกหารด้วยค่าการทดสอบจากเงื่อนไขการบ่มแบบแห้ง ซึ่งตามมาตรฐานของประเทศสเปนส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความทนทานต่อความชื้นสูง จะมีค่า %ITSR มากกว่า 90%

สำหรับการทดสอบความต้านทานการเสีรูปถาวร ใช้การทดสอบด้วย Wheel Tracking โดยการบดอัดตัวอย่างเป็นแผ่นพื้นความหนา 6 เซนติเมตรที่ความหนาแน่น 98% จากค่าที่การบดอัดแบบ Marshall ทำได้ หลังจากการบดอัดแผ่นพื้นได้สองวันนำแผ่นพื้นไปทดสอบด้วยเครื่อง Wheel Tracking ที่อุณหภูมิ 60°C ที่แรงกระทำ 700 N จำนวนทั้งสิ้น 10,000 รอบการทดสอบ เครื่องมือจะบันทึกค่าการยุบตัวของแผ่นพื้นในทุกรอบการทดสอบ นำผลการทดสอบในช่วง 5,000 รอบสุดท้ายมาคำนวณหาค่า Wheel Tracking Slope ในหน่วย มิลลิเมตร/1000 รอบการทดสอบ ตามมาตรฐานของประเทศสเปน วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปที่ต่ำ จะมีค่า Wheel Tracking Slope ไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร/1000 รอบการทดสอบ

จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่าปัจจัยด้านสัดส่วนของยางบดและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของวัสดุอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านการความอ่อนไหวต่อความชื้น จากการศึกษาท่อนหน้า ที่กล่าวว่าสัดส่วนของยางบดที่ 1.5% จะส่งผลให้มีช่องว่างอากาศในเนื้อแอสฟัลต์คอนกรีตสูง และมีความหนาแน่นที่ลดลงเนื่องมาจากการคืนตัวของเม็ดยาง ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลต่อค่าจากการทดสอบ Indirect Tensile Test อย่างชัดเจน กล่าวคือ หากความหนาแน่นของวัสดุต่ำ จะส่งผลให้กำลังรับแรงดึงทางอ้อมต่ำลงไปด้วย เมื่อพิจารณาในส่วนระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาพบว่าผลการทดสอบไม่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก แต่หากเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มียางบด (ไม่มีระยะเวลาทำปฏิกิริยา) ส่วนผสมที่มียางบดจะให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า ดังนั้นจากข้อสรุปของผู้วิจัยได้แนะนำว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มียางบดในสัดส่วน 1% และมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที จะให้ผลการทดสอบด้านคุณสมบัติด้านความอ่อนไหวต่อความชื้นดีที่สุด

เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรूपแบบถาวร พบว่าการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตช่วยเพิ่มความต้านทานในการเสีรूपถาวรได้จริง และหากมีสัดส่วนของยางบดในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น การเสีรूपแบบถาวรจะเกิดขึ้นน้อยลง โดยสัดส่วนของยางบดที่ 1.5% จะมีค่าการเสีรूपของวัสดุต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนของยางบด 0.5% – 1% พบว่าคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรूपถาวรไม่ได้แตกต่างจากส่วนผสมที่ใช้แอสฟัลต์แบบปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลีเมอร์แล้ว นั้นหมายถึงไม่จำเป็นต้องใส่โพลีเมอร์แอสฟัลต์แต่ใช้การปรับปรุงคุณภาพส่วนผสมด้วยยางบดจะได้ผลลัพธ์ซึ่งไม่แตกต่างกันแต่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่า และข้อสังเกตอีกประการ คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานการเสีรूपถาวรอย่างมีนัยสำคัญ

จากข้อสรุปจากผลการทดสอบทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขในการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบดที่ดีที่สุด คือ ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และสัดส่วนของยางบดที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.5% - 1% โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป็นงานศึกษาที่มุ่งเน้นเพื่อศึกษาผลของขนาดและปริมาณของเศษยางบดในส่วนผสมมวลรวมที่มีผลต่อคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน โดยงานวิจัยนี้ให้ความสนใจที่กระบวนการดำเนินการที่เป็นรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพแบบ Dry Process เนื่องจากจุดเด่นด้านความสะดวกในการนำไปเทคนิคไปประยุกต์ใช้กับการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย สามารถนำยางบดเข้าสู่กระบวนการผลิตได้ด้วยรูปแบบเดียวกับการนำมวลรวมเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยไม่ต้องปรับปรุงรายละเอียดที่ขั้นตอนการดำเนินการของโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตมากนัก

งานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน เพื่อความชัดเจนและง่ายต่อการดำเนินงาน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 กำหนดปัญหาและออกแบบการทดสอบ

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องพบว่ามึรูปแบบการดำเนินงานปรับปรุงคุณภาพวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบดที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาหลากหลายเทคนิคซึ่งมีรายละเอียดปลีกย่อยแตกต่างกันไป แต่ไม่ได้มีการกล่าวถึงกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธี Dry Process มากนัก งานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงผลของขนาดและปริมาณยางบดที่ผสมลงในสัดส่วนผสมมวลรวมที่ส่งผลให้พฤติกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมไปอย่างไร โดยพฤติกรรมที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ หรือ ตัวแปรตาม คือ

- **ความแข็งแรง :** บ่งบอกได้ด้วยค่า Modulus เช่น Resilient Modulus, Dynamic Modulus, Elastic Modulus สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า Dynamic Modulus (E^*) เนื่องจากเป็นค่าที่สะท้อนถึงความแข็งแรงที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิและการตอบสนองต่อแรงกระทำแบบพลวัตที่ความถี่ (เวลา) ต่างๆได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีแอสฟัลต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งแอสฟัลต์เป็นวัสดุประเภท Viscoelastic ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่ได้รับแรงกระทำ โดยการทดสอบ Dynamic Modulus จะทดสอบด้วยเครื่องมือ Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) ตามมาตรฐาน AASHTO TP79-09[45] โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่า Modulus สำหรับแต่ละรูปแบบการทดสอบที่มีอุณหภูมิและความถี่ของแรงกระทำที่แตกต่างกัน แล้วนำค่าดังกล่าวมาคำนวณเพื่อสร้างเป็น Master Curve สำหรับวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีรูปแบบส่วนผสมต่างๆด้วยหลักการของ Time – Temperature Superposition

- **ความสามารถในการต้านทานการเสีรูปลถวร :** พิจรณาดได้โดยการทดสอบควมคืบ (Creep Test) ซึ่งมหลกหลยรบบการทดสอบ สำหรบในงนวจยนี้เลอกใช้ Dynamic Creep Test ด้วยเครงมือ AMPT ตามมาตรฐาน AASHTO T79-09 เนองจกสมรถปรับเงอนไขในการทดสอบได้หลกหลยรบบ อทอ อุณหภูมิ แรงกระทำแนวตั้ง แรงดันด้านข้าง เป็นต้น นอกจกนั้นแล้วยังสมรถติดตามค่าตัวแปรต่งๆที่เปลยนเปลงไปได้ระหว่งการทดสอบได้ง่าย ซึ่งผลลัพท์จกการทดสอบควมคืบคือค่า Flow Number โดยนำค่าด่งกล่วไปใช้เพรียบเทียบประสิทธิภพของส่วนผสมแอสฟลต์คอนกรีตรบบต่งๆต่อไป
- **ควมทนทานในการจำลองสภาพใช้งนจริง :** การทดสอบควมคืบเป็นการทดสอบรบบหนึ่งในการพิจรณประสิทธิภพด้านการต้านทานการเสีรูปลถวรของแอสฟลต์คอนกรีตได้ดี แต่มีข้อจกัดคือ รบบการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างจนเกิดควมเสียหายไม่คล้ายคลึงกับสภวะจริงในสนามเท่ำที่ควร จึงมีการพัฒนารบบการทดสอบที่จำลองสภวะจริงในสนามขึ้นม โดยการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างด้วยล้อยรบบต่งๆที่วิ่งทับบนตัวอย่าง จนตัวอย่างทดสอบยุบตัวและเสีรูปลตามแนวที่ล้อยวิ่งผ่าน ซึ่งทดสอบภยใต้สภวะควคุมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิทดสอบ ควมชื้น เป็นต้น สำหรบในงนวจยนี้เลอกใช้ Wheel Tracking Device ประเภทล้อยทดสอบเป็นล้อยางตันขนาดเล้ก model B โดยทดสอบบแบบห่ง (Small size model B testing in Air) ตามมาตรฐาน BS EN 12697-22:2003 Wheel tracking[46] เนองจกสมรถติดตามค่าการยุบตัวของตัวอย่างที่เปลยนเปลงไปตลอดระยเวลการทดสอบได้โดยอัตโนมัติ

แต่จกการทดสอบควมเป็นไปได้เบ้องต้น เพรประกอบกรออกบแบบการทดสอบ การทดสอบเพรหาค่า Dynamic Modulus ของแอสฟลต์คอนกรีต ด้วยเครงมือ Asphalt Mixture Performance Test (AMPT) ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบและเงอนไขการทดสอบตามมาตรฐาน AASHTO TP79-09 โดยมีรายละเอียดในขั้นตอนการเตรียมขึ้นตัวอย่างทดสอบ คือ หลงจกผลิตแอสฟลต์คอนกรีตที่มีรบบส่วนผสมตามต้องการ แล้วบดอัดเป็นขึ้นตัวอย่างทรงระบอกเพรทดสอบด้วย Gyrotory Compactor โดยตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 20 cm แล้วเจจเพรนำแกนกลางตัวอย่างไปตัดส่วนหัวและท่ำออก ท่ำสุดแล้วตัวอย่างสำหรบการทดสอบจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm หลงจกนั้นติดตั้งอุปกรณ์ยึด LVDT เพรวัดค่าการเสีรูปลในแนวตั้งของตัวอย่างและคำนวณเป็นค่าควมเครียด (Strain) ต่อไป โดยเหตุผลของการเตรียมตัวอย่างทดสอบด้วยการเจจแกนกลางและตัดส่วนหัวและท่ำมี 2 ประเด็น คือ

- เพรให้ผิวของตัวอย่างเรียบ โดยการทำให้ผิวด้านข้างเรียบเพรให้ติดตั้งอุปกรณ์ยึด LVDT ได้ ในขณะที่การทำให้หัวและท่ำของตัวอย่างเรียบเพรให้พื้นที่รับแรงกระทำได้ระนบด่งจกกับชุดให้แรงกระทำของเครงทดสอบ ทำให้ขึ้นตัวอย่างรับแรงกระทำได้สม่ำเสมอตลอดขึ้นตัวอย่าง

- เพื่อให้ความหนาแน่นของชั้นตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชั้นมากที่สุด เนื่องจากโดยทั่วไป การบดอัดตัวอย่างด้วย Gyrotory Compactor จะเป็นการให้แรงอัดในแนวตั้งพร้อมกับการหมุนตัวอย่างเพื่อให้เกิดแรงเฉือน ส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งชั้นตัวอย่างเท่าที่ควร โดยวัสดุด้านในของตัวอย่างจะมีความหนาแน่นที่สูงและสม่ำเสมอกว่าวัสดุบริเวณด้านนอกของชั้นตัวอย่าง

อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างโดยการเจาะแกนกลางที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้อยู่ในสภาพไม่สมบูรณ์ เมื่อเจาะแล้วพบว่าผิวข้างของตัวอย่างมีลักษณะเป็นคลื่น ไม่เรียบ ดังแสดงในภาพที่ 3.1 จากข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่างทดสอบดังกล่าวจึงปรับเปลี่ยนวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm แทน ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO TP79-09 และทดลองติดตั้งอุปกรณ์ LVDT พบว่ายังสามารถติดตั้งอุปกรณ์ LVDT บนผิวตัวอย่างได้ จึงดำเนินการทดสอบ Dynamic Modulus โดยระหว่างการทดสอบ ชิ้นส่วนสำหรับยึด LVDT หลุดระหว่างการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 เนื่องมาจากผิวด้านข้างของตัวอย่างไม่เรียบและบางกรณีอุปกรณ์ LVDT ติดตั้งอยู่บนเม็ดหินขนาดเล็กหรือบนเนื้อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยตรง เมื่อตัวอย่างรับแรงกระทำขณะดำเนินการทดสอบจะเกิดแรงต้านจาก LVDT จนดันให้เนื้อวัสดุที่อุปกรณ์ LVDT ติดตั้งอยู่หลุดจากตัวอย่าง ดังภาพที่ 3.3 ดังนั้นเมื่อไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้จึงไม่สามารถคำนวณค่า Dynamic Modulus ได้ นอกจากนี้ข้อจำกัดของการเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ด้วย Gyrotory Compactor คือสามารถเตรียมตัวอย่างได้สูงที่สุดเพียง 17.5 cm ซึ่งน้อยเกินไปหากต้องนำตัวอย่างไปตัดส่วนหัวและท้ายออก (ต้องการความสูงอย่างน้อย 20 cm) จึงเลือกที่จะเตรียมตัวอย่างสูง 15 cm โดยไม่ตัดส่วนด้านหัวและท้ายตัวอย่างทำให้บางตัวอย่างมีส่วนหัวและท้ายไม่เรียบ ดังภาพที่ 3.4 เมื่อดำเนินการทดสอบตัวอย่างจะรับแรงได้ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งชั้นตัวอย่าง ส่งผลให้การทดสอบมีความคลาดเคลื่อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงยกเลิกการทดสอบ Dynamic Modulus เนื่องจากไม่สามารถดำเนินการทดสอบได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้จึงเหลือตัวแปรตามที่สนใจเพียงสองตัวแปร คือ ความสามารถในการต้านทานการเสีรูปร่างจากการทดสอบ Dynamic Creep และความทนทานในการจำลองสภาพใช้งานจริงจากการทดสอบด้วย Wheel Tracking Device เท่านั้น



ภาพที่ 3.1 ผิวด้านข้างตัวอย่างที่ไม่เรียบจากการเจาะแกนกลางตัวอย่าง



ภาพที่ 3.2 LVDT ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากอุปกรณ์ยึดหลุด



ภาพที่ 3.3 อุปกรณ์ยึดจับ LVDT หลุด จากเนื้อวัสดุที่หลุดออกจากชั้นตัวอย่าง



ภาพที่ 3.4 ตัวอย่างที่ส่วนหัวไม่เรียบขณะทำการทดสอบ Dynamic Modulus

ด้านปัจจัยหรือตัวแปรต้นที่สนใจ ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยด้านขนาดคละ ปัจจัยด้านขนาดของยางบด และปัจจัยด้านปริมาณของยางบดที่ผสม ซึ่งแต่ละปัจจัยได้กำหนดกลุ่มของการทดสอบ ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **ขนาดคละ** งานวิจัยนี้กำหนดขนาดคละที่ต้องการศึกษาไว้ 2 รูปแบบ คือ
 - Dense Graded กำหนดให้ขนาดคละสำหรับงานวิจัยนี้เป็นไปตามข้อกำหนดด้านขนาดคละสำหรับผิวทางชั้น Wearing Coarse โดยอ้างอิงตามมาตรฐานแอสฟัลต์คอนกรีตของกรมทางหลวง (ทล.-ม. 408/2532)[47]
 - Gap Graded หรือผิวทางประเภท Stone Matrix Asphalt (SMA) เนื่องจากปัจจุบันกรมทางหลวงไม่มีมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับงานก่อสร้างผิวทางแบบ SMA มีเพียงข้อกำหนดพิเศษที่กำหนดโดยสำนักวิศวกรและตรวจสอบ กรมทางหลวงสำหรับใช้ในงานวิจัย งานทดลองหรืองานก่อสร้างแปลงทดสอบเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ขนาดคละสำหรับงานวิจัยเป็นไปตามข้อเสนอแนะตามคู่มือที่อ้างอิง คือ Designing and Constructing SMA Mixtures – State – of – the – Practice ซึ่งจัดทำโดย National Asphalt Pavement Association (NAPA) ประเทศสหรัฐอเมริกา[48] ซึ่งเป็นคู่มือฉบับที่สำนักวิศวกรและตรวจสอบใช้ในการอ้างอิงเพื่อกำหนดเป็นข้อกำหนดพิเศษเช่นกัน
- **ขนาดของยางบด** เพื่อใช้ทดแทนมวลรวมที่เป็นหินปูน โดยงานวิจัยนี้กำหนดขนาดยางบดที่ต้องการศึกษาไว้ 3 กลุ่ม คือ
 - ยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 8 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 เป็นตัวแทนมวลรวมขนาดค่อนข้างใหญ่
 - ยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 เป็นตัวแทนมวลรวมขนาดปานกลาง
 - ยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 เป็นตัวแทนมวลรวมขนาดค่อนข้างเล็ก
- **ปริมาณของยางบด** งานวิจัยนี้กำหนดปริมาณของยางบดที่ต้องการศึกษาไว้ 2 ระดับ คือ 1% และ 2% โดยปริมาตรของมวลรวมทั้งหมด ซึ่งงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการผสมยางบดเข้าเป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยต้องการให้ยางบดทำหน้าที่เป็นมวลรวม (Rubber Aggregate) ดังนั้นยางบดที่เติมเข้าไปจะเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยไม่ทำให้สัดส่วนของมวลรวมแต่ละขนาดเปลี่ยนแปลงไปจากขนาดคละที่กำหนดไว้ เพื่อต้องการควบคุมปัจจัยด้านประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปจากขนาดคละที่แตกต่างกัน โดยการผสมยางบดลงในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้จะควบคุมปริมาตรของยางบดขนาดต่างๆที่เติมเข้าด้วยสัดส่วนที่กำหนดและลดทอนปริมาตรของหินปูนขนาดนั้นๆลงเป็นปริมาตรเดียวกับยางบดที่นำมาแทนที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเมื่อทำการวิเคราะห์ Sieve Analysis เพื่อหาขนาดคละ หาก

พิจารณาสัดส่วนตามปริมาตรของมวลรวมทั้งหมดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ขนาดคละของส่วนผสมที่เป็นหินปูนทั้งหมดกับส่วนผสมที่มียางบดแทนที่จะมีขนาดคละที่เหมือนกัน

โดยสาเหตุที่กำหนดขนาดของยางบดและปริมาณของยางบดเป็นไปตามรายละเอียดข้างต้น เนื่องจากได้ดำเนินการทดสอบความเป็นไปได้เบื้องต้นก่อนการออกแบบการทดสอบ ด้วยการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded ที่ผสมยางบดขนาดใหญ่ คือ ยางบด ค้างบนตะแกรงเบอร์ 4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 8 ในสัดส่วน 2.5% และ 5% โดยปริมาตรมวลรวม (อ้างอิงจากรายงานของ FHWA ที่แนะนำสัดส่วนของยางบดที่เหมาะสมอยู่ที่ 3 -5% โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต แต่เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของยางบดมีค่าประมาณ 1.1 จึงประมาณโดยคร่าวได้ว่ายางบดที่ผสมด้วยสัดส่วนโดยปริมาตรหรือสัดส่วนโดยน้ำหนักมีความใกล้เคียงกัน) จากการทดลองผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบดังกล่าวและบดอัดเป็นตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm ด้วย Gyratory Compactor พบว่ารูปแบบส่วนผสมดังกล่าวหลังจากบดอัดแล้วตัวอย่างไม่สามารถคงรูปเป็นทรงกระบอกได้ ตัวอย่างจะบวมอย่างเห็นได้ชัด และตัวอย่างที่บดอัดจากแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดขนาดใหญ่ในปริมาณที่มากจะไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ หลังจากนำตัวอย่างออกจากแบบตัวอย่างจะพังทลายทันที จึงปรับปรุงส่วนผสมใหม่โดยกำหนดให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีรูปแบบส่วนผสมที่ผสมด้วยยางบดขนาดและปริมาณดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

โดยสรุป ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้มี 2 รูปแบบขนาดคละ โดยมวลรวมของแต่ละขนาดคละจะมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยด้านขนาดยางบด 3 ขนาด และในแต่ละขนาดยางบดที่เปลี่ยนแปลงจะมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยด้านปริมาณยางบด 2 ระดับ คิดเป็น 6 รูปแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มียางบด ซึ่งต้องพิจารณาประสิทธิภาพเทียบกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีมวลรวมเป็นหินปูนทั้งหมด 1 รูปแบบส่วนผสม ดังนั้นสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต 1 รูปแบบขนาดคละจะมีความแตกต่างของส่วนผสมทั้งสิ้น 7 รูปแบบ โดยงานวิจัยนี้ศึกษา 2 รูปแบบขนาดคละ คิดเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 14 รูปแบบ

3.2 ดำเนินการทดสอบ

งานวิจัยนี้ใช้การออกแบบส่วนผสมด้วยวิธี Marshall ทั้งหมดสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละทั้ง 2 รูปแบบ โดยตลอดการทดสอบจะใช้วัสดุชนิดเดียวกันในรอบการผลิตเดียวกันทั้งหมด คือ หินปูนจากโรงโม่แหล่งหินจังหวัดสุพรรณบุรี ยางบดจากโรงงานแปรรูปยางรถยนต์จังหวัดนครปฐม และแอสฟัลต์ประเภท AC 60/70 จากบริษัท ไทยลูบเบส จำกัด โดยการควบคุมการใช้วัสดุดังกล่าวเป็นการป้องกันความแตกต่างของผลการทดสอบจากปัจจัยอื่นๆนอกเหนือจากปัจจัยที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ เนื่องจากการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันในแต่ละรูปแบบส่วนผสม ย่อมก่อให้เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีयरูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีตที่แตกต่างกันจากคุณสมบัติวัสดุ ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตการศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้

สำหรับการดำเนินการทดสอบ แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ระยะ คือ

- การทดสอบระยะนำร่อง

- ทดสอบความเป็นไปได้เบื้องต้นในการดำเนินการทดสอบ (preliminary test)

เป็นการทดสอบเบื้องต้นในระยะแรกของการดำเนินงานวิจัย เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาความเป็นไปได้ในการดำเนินงานทดสอบ รวมไปถึงใช้ประกอบการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลองด้วย โดยดำเนินการทดสอบด้านต่างๆ เช่น ทดลองความเป็นไปได้การผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยรูปแบบและขั้นตอนการดำเนินงานที่กำหนด หรือการทดลองดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบต่างๆ เพื่อพิจารณาความสมบูรณ์ของเครื่องทดสอบและเพื่อทราบถึงข้อจำกัดของการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบรูปแบบนั้นๆ ได้เป็นอย่างดี

- ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ดำเนินการทดสอบปัจจัยด้านคุณสมบัติของวัสดุชนิดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย เช่น การทดสอบความหนาแน่นของมวลรวม ความหนาแน่นของยางบด รวมไปถึงคุณลักษณะต่างๆของวัสดุที่จะนำมาใช้งาน ทั้งมวลรวมประเภทหิน ยางบด และแอสฟัลต์ เพื่อนำมาประกอบการพิจารณาว่าวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัยเหมาะสมต่อการใช้งานตามมาตรฐาน โดยอ้างอิงรูปแบบการทดสอบจากมาตรฐานต่างๆ เช่น มาตรฐานของกรมทางหลวง หรือ ASTM เป็นต้น

- หาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับแต่ละขนาดคละ

ดำเนินการทดสอบตามหลักการของ Marshall ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบต่างๆ ตามมาตรฐานการออกแบบของหน่วยงานที่อ้างอิง คือ กรมทางหลวง และ NAPA โดยขนาดคละแบบ Dense Graded จะบดอัดตัวอย่างที่ระดับจราจรสูง (Heavy Traffic) ในขณะที่ขนาดคละแบบ Gap Graded จะบดอัดตัวอย่างที่ระดับจราจรปานกลาง (Medium Traffic) โดยขนาดคละแต่ละรูปแบบจะเปลี่ยนแปลงปริมาณแอสฟัลต์แตกต่างกัน 3 ระดับ ระดับละ 3 ตัวอย่าง โดยแต่ละชั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 6.4 cm และเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบค่าความหนาแน่นสูงสุดทางทฤษฎี (Maximum Theoretical Density, Gmm) ซึ่งเป็นตัวอย่างแบบไม่บดอัด (Loose Mix) ในระดับปริมาณแอสฟัลต์ละ 2 ตัวอย่าง

ดำเนินการทดสอบที่เกี่ยวข้องตามมาตรฐานการออกแบบได้กำหนดไว้ เช่น Flow Stability Mix Drindown เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขนาดคละนั้นๆ และตรวจสอบว่ารูปแบบส่วนผสมที่ได้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริงหรือไม่

จำนวนตัวอย่างสำหรับขั้นตอนนี้ คือ $2 \times ((3 \times 3) + (3 \times 2)) = 30$ ตัวอย่าง

○ **หารูปแบบการเติมยางบดที่เหมาะสมที่สุด**

หลังจากได้ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมสำหรับขนาดคละทั้ง 2 รูปแบบแล้ว ดำเนินการทดสอบเพื่อพิจารณาหารูปแบบการเติมยางบดเข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมที่สุด โดยมีข้อสมมติ คือ ขนาดคละและขนาดของยางบดไม่มีผลต่อรูปแบบการกระจายตัวหรือการยึดเกาะของยางบดในสัดส่วนผสมโดยรวมของแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดคละแบบ Dense Graded ในการทดสอบ

โดยรูปแบบการเติมยางที่สนใจ ประกอบไปด้วย

- เติมยางบดขณะขั้นตอนการผสมหินอบร้อนกับแอสฟัลต์อบร้อน คลุกเคล้าให้เข้ากัน เป็นการจำลองการเติมยางบดในขั้นตอนการผสมที่ห้องผสม (pugmill) ของโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต
- เติมยางบดในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้ว โดยผสมให้เข้ากันดี ก่อนทำการบดอัดตัวอย่าง เป็นการจำลองการเติมยางบดที่ส่วนพรวน (auger) ของรถปูผิว (Paver) ที่หน้างานแล้วบดอัดทันทีด้วยรถบด

ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้รูปแบบส่วนผสมที่ผสมด้วยยางบดขนาดค่างบน ตะแกรงเบอร์ 16 ที่ปริมาณยางบด 2% โดยปริมาตรมวลรวม รูปแบบการเติมยางบดละ 3 ตัวอย่าง แล้วบดอัดตัวอย่างเป็นทรงกระบอกโดยแต่ละชั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm ด้วย Gyrotory Compactor

พิจารณาด้วยเกณฑ์ด้านเสถียรภาพของตัวอย่างทดสอบหลังจากนำออกจากแบบ ร่วมกับความสะดวกและความเหมาะสมในการผลิตวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งการดำเนินงานในห้องปฏิบัติการและการคำนึงถึงการประยุกต์เพื่อการดำเนินงานในการก่อสร้างจริงต่อไป

จำนวนตัวอย่างสำหรับขั้นตอนนี้ คือ $2 \times 3 = 6$ ตัวอย่าง

โดยสรุป การทดสอบในระยะนำร่องผลลัพธ์ที่ได้ คือ สูตรการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขนาดคละแต่ละรูปแบบ และรูปแบบการเติมยางบดเข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมที่สุด โดยจะใช้ผลลัพธ์นี้ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการทดสอบขั้นอื่นๆ ในงานวิจัยนี้ต่อไป

- **การทดสอบระยะที่ 1** เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมด้านการต้านทานการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงจากการผสมยางบดในส่วนผสมมวลรวม

จากผลการทดสอบระยะนำร่อง ดำเนินการผลิตวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละขนาดคละ โดยครอบคลุมรูปแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 14 รูปแบบตามระดับปัจจัยที่สนใจในงานวิจัย โดยเติมยางบดเข้ากับส่วนผสม

แอสฟัลต์คอนกรีตด้วยรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด หลังจากนั้นบดอัดส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตให้เป็นตัวอย่างที่มีรูปแบบและเงื่อนไขการบดอัดที่เหมาะสมกับการทดสอบนั้นๆ แล้วดำเนินการทดสอบทดสอบ Dynamic Creep เพื่อนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากปัจจัยด้านขนาดและปริมาณของยางบดที่ผสมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบนี้ คือค่า Flow Number ที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีต รูปแบบส่วนผสมต่างๆ โดยมีลักษณะของการเตรียมตัวอย่างทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบ Dynamic Modulus โดยหลังจากการทดสอบ Dynamic Creep ตัวอย่างจะไม่สามารถนำใช้เพื่อการทดสอบอื่นๆต่อไปได้ เนื่องจากการทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง

การทดสอบนี้ใช้เครื่องมือ Asphalt Mixture Performance Test (AMPT) ตามมาตรฐานการทดสอบ AASHTO TP-79-09 โดยเงื่อนไขการทดสอบเป็นไปตาม NCHRP Report No. 673[49] ซึ่งมีเงื่อนไข คือ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 50°C ด้วยแรงกระทำแนวตั้ง (deviator stress) 600 kPa โดยไม่มีแรงดันด้านข้าง (confining pressure) จนกระทั่งตัวอย่างมีค่าความเครียดสะสมอยู่ที่ 100,000 microstrains หรือผ่านการทดสอบจนถึง 20,000 รอบการทดสอบขึ้นกับค่าใดค่าหนึ่งถึงก่อน หลังจากนั้นนำข้อมูลจากการทดสอบมาวิเคราะห์เพื่อหาค่า Flow Number (FN) เพื่อใช้เปรียบเทียบต่อไป

โดยรวม สำหรับการทดสอบ Dynamic Creep ต้องทำการทดสอบทั้งสิ้น $1 \times 28 = 28$ ครั้ง

ในภาพรวม การทดสอบในระยะที่ 1 ผลลัพธ์จากการทดสอบที่ได้ คือทราบถึงคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมด้านการต้านทานการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากการผสมยางบดเพื่อแทนที่มวลรวมประเภทหินในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน และสามารถวิเคราะห์หา รูปแบบส่วนผสมที่มียางบดเป็นส่วนประกอบที่ดีที่สุดของขนาดคละแบบต่างๆ ภายใต้ปัจจัยของงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปทดสอบในระยะที่ 2 ต่อไป

- การทดสอบระยะที่ 2 เพื่อศึกษาพฤติกรรมจากการจำลองสภาพการใช้งานจริงของผิวทาง

การทดสอบในระยะนี้ เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อถูกกระทำภายใต้สภาวะจำลองสภาพการใช้งานจริง โดยรูปแบบส่วนผสมที่เลือกใช้สำหรับขนาดคละแต่ละประเภท คือ ส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของยางบดที่ให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุดของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละนั้นๆ จากการทดสอบในระยะที่ 1 โดยพิจารณาจากผลการทดสอบ Dynamic Modulus และค่า Flow Number

สำหรับการทดสอบในระยะนี้ จะใช้เครื่องมือทดสอบประเภท Wheel Tracking Device ตามมาตรฐาน BS-EN 12697 - 22 เพื่อจำลองสภาพการใช้งานและสามารถตรวจวัดค่าความสึกของร่องล้อที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างได้ตลอดการทดสอบ โดยขนาดคละแต่ละรูปแบบจะดำเนินการทดสอบที่รูปแบบส่วนผสม 2 รูปแบบ คือ ส่วนผสมที่มียางบดเป็น

ส่วนประกอบที่ให้ค่าจากการทดสอบในระยะที่ 1 ดีที่สุด และส่วนผสมที่มวลรวมเป็นหินปูนทั้งหมด โดยผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตและบดอัดตัวอย่างด้วย Roller Compactor ตามมาตรฐาน BS EN 12697-33:2003 Specimen prepared by roller compactor[50] ตัวอย่างที่ได้จะมีลักษณะเป็นแผ่นพื้นที่เหมาะสมกับรูปแบบการทดสอบ ขนาดกว้าง 30.5 cm ยาว 30.5 cm และหนา 5 cm สมในการทดสอบ โดยใช้ตัวอย่าง 2 ชั้นต่อ 1 รูปแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต

โดยรวมแล้ว การทดสอบระยะนี้ จะต้องเตรียมตัวอย่างทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 = 8$ ชั้น

โดยภาพรวมของการดำเนินการทดสอบ สรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปรูปแบบการทดสอบและจำนวนตัวอย่างในการทดสอบ

ระยะเวลาการทดสอบ	จุดประสงค์	การทดสอบ	ปัจจัยที่ 1	รายละเอียด	ปัจจัยที่ 2	รายละเอียด	ปัจจัยที่ 3	รายละเอียด	จำนวนตัวอย่าง	จำนวนการทดสอบ
นำร่อง	หาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม	Marshall	ขนาดคละ	2 รูปแบบ -Dense -Gap	ปริมาณแอสฟัลต์	3 ระดับ แตกต่างกัน 1% ของน้ำหนักวัสดุรวมทั้งหมด	-	-	Ø 10 cm, h 6.4 cm และ loose mix (3x(3+2))x2 = 30	30 x 1 = 30
ระยะที่ 1	หารูปแบบการเติมยางบดที่เหมาะสมที่สุด	จากความเสถียรในการทำงาน	ขนาดคละ	1 รูปแบบ -Dense	ขนาดยาง	1 รูปแบบ คือ ยางบดขนาดค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 16	รูปแบบการเติมยางบด	2 รูปแบบ -เติมขณะผสม -เติมก่อนบดอัด	Ø 10 cm, h 15 cm (1x1x2) x 3 = 6	6 x 3 = 18

ตารางที่ 3.1 สรุปรูปแบบการทดสอบและจำนวนตัวอย่างในการทดสอบ (ต่อ)

ระยะการทดสอบ	จุดประสงค์	การทดสอบ	ปัจจัยที่ 1	รายละเอียด	ปัจจัยที่ 2	รายละเอียด	ปัจจัยที่ 3	รายละเอียด	จำนวนตัวอย่าง	จำนวนการทดสอบ
ระยะที่ 2	ศึกษาพฤติกรรมการจําลองสภาพใช้งานจริง	Wheel Tracking Device	ขนาดคละ	2 รูปแบบ -Dense -Gap	รูปแบบส่วนผสม	2 รูปแบบ คือ ไม่มียางบด และรูปแบบที่ ให้ผลการทดสอบระยะที่ 1 ดีที่สุด	-	Slab 30 x 30 x 5 cm (2x2)x2 = 8	8 x 1 = 8	
สรุปรวม										
หมายเหตุ: ทุกรูปแบบของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จะมีตัวอย่าง 2 ชิ้น เพื่อกระทำการทดสอบซ้ำ										

ตารางที่ 3.2 การประมาณการณ์เวลาในการทดสอบ

ลำดับ	กิจกรรม	ตัวอย่าง (ชิ้น)	จำนวน ต่อวัน (ชิ้น)	เวลา ทำงาน (วัน)	หมายเหตุ
1	เตรียมตัวอย่าง Ø 10 cm, h 6.4 cm และ loose mix	30	6 - 10	3 - 5	กิจกรรมเริ่มต้น
2	เตรียมตัวอย่าง Ø 10 cm, h 15 cm	6	3	2 - 3	รอผลจาก 5
3	เตรียมตัวอย่าง Ø 10 cm, h 15 cm	28	3	9 - 10	รอผลจาก 6
4	เตรียมตัวอย่าง Slab	8	1 - 2	4 - 8	รอผลจาก 7
รวมงานบดอัดตัวอย่าง				18 - 26	
5	Marshall Test	30	10 - 12	3 - 4	ทดสอบหลังจาก 1
6	พิจารณาความเสถียรในการทำงาน	6	6	1	ทดสอบหลังจาก 2
7	Dynamic Creep	28	1 - 2	14 - 28	ทดสอบหลังจาก 7
8	Wheel Tracking	8	1	8	ทดสอบหลังจาก 4
รวมงานทดสอบ				35 - 59	
รวมเวลาทั้งสิ้น				53 - 85	

3.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

นำผลการทดสอบที่ได้จากกระบวนการบดอัดตัวอย่างและดำเนินการทดสอบค่าตามตัวแปรต่างๆ ที่สนใจมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาความแตกต่างที่เกิดขึ้นในแต่ละปัจจัยของการทดสอบและหาข้อสรุปว่าในแต่ละรูปแบบขนาดคละ ปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงวิศวกรรม ด้านการต้านทานการเสียดรูปถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปและเปลี่ยนแปลงไปในแนวทางใด

3.4 สรุปผลการศึกษา

ดำเนินการสรุปผลการศึกษาที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยยางบด ภายใต้กระบวนการแบบ Dry Process และจัดทำรูปเล่มรายงาน รวมทั้งนำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการต่างๆต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

หลังจากการดำเนินงานทดสอบตามขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 นำผลการทดสอบแต่ละรูปแบบที่วางแผนไว้สำหรับการทดสอบระยะต่างๆ มาพิจารณาและวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบทุกรูปแบบที่ดำเนินการ โดยรายละเอียดของการทดสอบและผลลัพธ์ของการทดสอบรวมไปถึงการวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนแรกของการดำเนินงานวิจัย คือ การตรวจสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของวัสดุที่นำมาใช้ผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยแบ่งคุณสมบัติขั้นพื้นฐานออกเป็น 3 ส่วน คือ คุณสมบัติของแอสฟัลต์ คุณสมบัติของมวลรวม และคุณสมบัติของยางบด ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

- คุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์

คุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่จำเป็นต้องตรวจสอบว่าเป็นแอสฟัลต์ที่เหมาะสมกับการนำไปผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตหรือไม่ โดยปกติแล้วการทดสอบคุณสมบัติเหล่านี้ผู้ผลิตแอสฟัลต์จะดำเนินการทดสอบทุกรอบการผลิตเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีมาตรฐานที่ดีเพียงพอต่อการจัดจำหน่ายได้ โดยผลการทดสอบในตารางที่ 4.1 เป็นข้อมูลจากผู้ผลิตแอสฟัลต์ซีเมนต์

สำหรับแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแอสฟัลต์ประเภท penetration grade แบบ AC 60/70 จากบริษัท ไทยลูบเบส จำกัด

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของแอสฟัลต์ที่ใช้ในงานวิจัย จากบริษัท ไทยลูบเบส จำกัด

ลำดับ	การทดสอบ	มาตรฐาน	ผลการทดสอบ
			ผลิตภัณฑ์ Bitumen Lot T-119B
1	Penetration	ASTM D-5	62 (1/10 mm)
2	Softening Point	ASTM D-36	46.4 °C
3	Specific Gravity	ASTM D 70	1.03
4	Kinematic Viscosity at 135 °C	ASTM D-445	293.3 cSt
5	Kinematic Viscosity at 150 °C	ASTM D-445	149.8 cSt

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตมีคุณสมบัติอยู่ในแอสฟัลต์ประเภท AC 60/70 จริง และมีคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสมต่อการนำไปผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อนได้

- คุณสมบัติของมวลรวม

คุณสมบัติของมวลรวมที่จำเป็นสำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากแนวคิดในการผสมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยการแทนที่มวลรวมด้วยยางบด จะแทนที่ด้วยร้อยละโดยปริมาตรของมวลรวม ซึ่งการวัดปริมาตรจะทำให้ลำบากระหว่างขั้นตอนการผลิตทั้งการผลิตในห้องปฏิบัติการหรือการผลิตที่โรงงาน อย่างไรก็ตามความถ่วงจำเพาะของวัสดุมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักและปริมาตรของวัสดุ การทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของวัสดุแล้วพิจารณาที่น้ำหนักของวัสดุแทน จะก่อให้เกิดความสะดวกในการทำงานมากกว่า

งานวิจัยนี้ทำการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมทั้งมวลรวมขนาดใหญ่และมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 127-12: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate[51] และ ASTM C 128-12: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate[52] โดยผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม แสดงดังตารางที่ 4.2

สำหรับมวลรวมที่ใช้ เป็นมวลรวมประเภทหินปูน จากโรงงานโมหิน ที่แหล่งหินจังหวัดสุพรรณบุรี

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม

ขนาดของตะแกรงที่มวลรวมค้าง	ขนาดของมวลรวม (mm)	ความถ่วงจำเพาะ
3/4 in	19	2.704
1/2 in	12.5	2.710
3/8 in	9.5	2.707
# 4	4.75	2.712
# 8	2.36	2.720
# 16	1.18	2.678
# 30	0.6	2.630
# 50	0.3	2.606
#100	0.15	2.636
# 200	0.075	2.692
Pan	< 0.075	2.631

- คุณสมบัติของยางบด

จากแนวคิดของงานวิจัยที่ต้องการการผสมยางบดเพื่อแทนที่หินปูนในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยการแทนที่ในสัดส่วนโดยปริมาตรมวลรวม ในรายละเอียดจากที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นคุณสมบัติของยางบดที่จำเป็นสำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต คือ ความถ่วงจำเพาะของยางบด โดยมีการทดสอบเช่นเดียวกับการหาค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม ซึ่งได้ค่าความถ่วงจำเพาะของยางบดอยู่ที่ 1.105

โดยยางบดที่นำมาใช้ เป็นยางบดจากโรงงานแปรรูปยางรถบรรทุกเก่า จังหวัดนครปฐม

4.2 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วย Marshall Mix Design

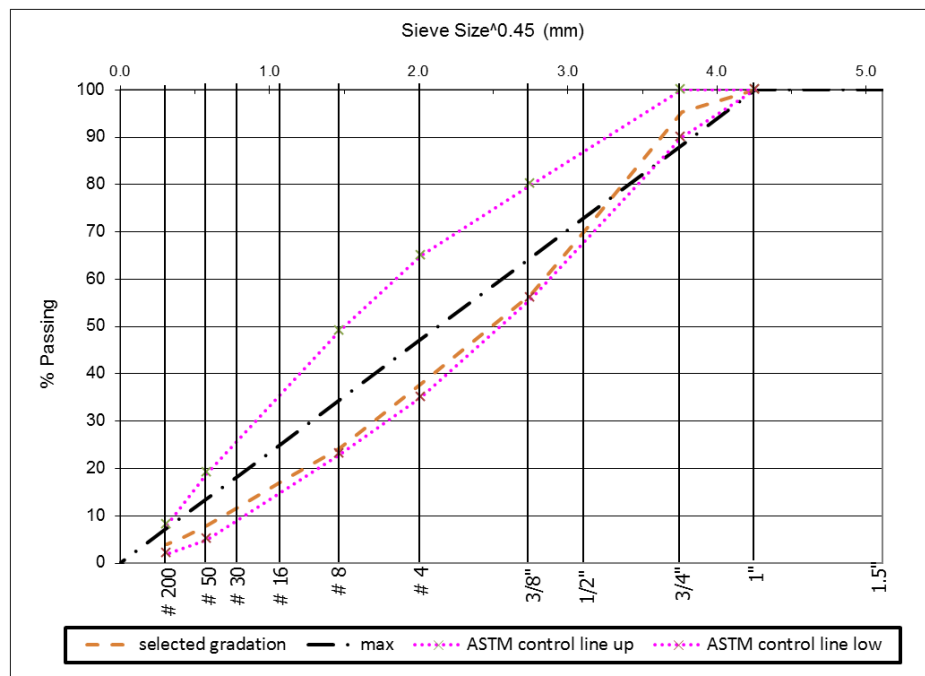
หลังจากทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้สำหรับเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต พบว่าวัสดุทั้งหมดที่นำมาใช้งานผ่านข้อกำหนดของวัสดุเพื่อการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับชั้นผิวทางได้ ขั้นตอนต่อไปหลังจากตรวจสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ คือ การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป โดยแบ่งเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ที่มีขนาดคละของมวลรวมแบบ Dense Graded และ Gap Graded ซึ่งมีรายละเอียดผลการออกแบบดังต่อไปนี้

- Dense Graded

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เริ่มจากการกำหนดขนาดคละของมวลรวมให้มีลักษณะเป็นไปตามรูปแบบ Dense Graded โดยอ้างอิงขอบเขตบนและขอบเขตล่างของขนาดคละสำหรับชั้น Wearing Coarse จากข้อกำหนดของกรมทางหลวง สำหรับขนาดคละที่เลือกใช้งานแสดงโดยเส้นประดังภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.3 โดยขนาดมวลรวมที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่ 19 mm ซึ่งจะเห็นว่าขนาดคละเน้นไปที่การใช้มวลรวมขนาดกลางและใหญ่ (Coarse Gradation) และค่อนข้างหลวม จากการที่เส้นแสดงขนาดคละเข้าใกล้ขอบเขตล่างและห่างจากเส้นแสดง Maximum density ค่อนข้างมาก สาเหตุเนื่องจากคำนึงถึงการเติมยางบดลงในส่วนผสมในการทดสอบลำดับต่อไป โดยอ้างอิงจากการศึกษาในต่างประเทศพบว่า การปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Dry Process หากใช้เม็ดยางที่มีขนาดใหญ่หรือใส่ยางบดในปริมาณที่เยอะเกินไป หลังจากการบดอัดแล้ววัสดุจะบวมตัวอย่างชัดเจน จึงออกแบบขนาดคละให้มีลักษณะดังกล่าวเพื่อให้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตหลังจากบดอัดแล้วมีช่องว่างในเนื้อวัสดุมากพอและไม่แน่นมากเกินไป จนเม็ดยางถูกบีบอัดแล้วคลายตัวภายหลังจนตัวอย่างบวมตัวจนเสียรูปทรง

ตารางที่ 4.3 ขนาดคละแบบ Dense Graded ที่ใช้ในงานศึกษา

ตะแกรง	%การผ่านตะแกรง โดยน้ำหนัก	%ค้ำบนตะแกรงสะสม โดยน้ำหนัก	%ค้ำบนตะแกรง โดยน้ำหนัก
1 in	100.0	0.0	0.0
3/4 in	95.4	4.6	4.6
1/2 in	70.4	29.6	25.0
3/8 in	56.9	43.1	13.5
# 4	38.0	62.0	18.9
# 8	24.3	75.7	13.7
# 16	17.2	82.8	7.0
# 30	12.0	88.0	5.2
# 50	8.0	92.0	4.0
# 100	5.5	94.5	2.5
# 200	4.0	96.0	1.5
Pan	0	100.0	4.0



ภาพที่ 4.1 เส้นขนาดคละแบบ Dense Graded ที่ใช้ในงานศึกษา

หลังจากนั้นพิจารณาคุณสมบัติด้านความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อกำหนดอุณหภูมิสำหรับการเตรียมส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในขั้นตอนต่อไป โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบความหนืดของแอสฟัลต์จากผู้ผลิตซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- สถานะผสมต้องการความหนืด 0.17 ± 0.02 Pa-s เทียบเท่ากับความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 140-146 °C.
- สถานะบดอัดต้องการความหนืด 0.28 ± 0.02 Pa-s เทียบเท่ากับความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 129-134 °C

จากข้อมูลข้างต้น การเตรียมส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้จะผสมมวลรวม (หินปูน) อบร้อนที่ 165°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และแอสฟัลต์อบร้อนที่ 155°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสมไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนของแอสฟัลต์ให้เพิ่มขึ้นเป็นระดับซึ่งอยู่ในช่วง 4% - 6% โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด และควบคุมอุณหภูมิมผสมไม่ให้ต่ำกว่า 140°C แล้วนำวัสดุผสมเข้าอบในเตาที่ 135°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อจำลองการเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์ขณะขนส่งจากโรงงานไปยังหน้างาน (Short Term Aging) แล้วนำวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจำนวนหนึ่งไปบดอัดด้วย Marshall Compactor จำนวน 75 ครั้งต่อด้าน ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณจราจรระดับสูง (มากกว่า 1,000,000 เพลามาตรฐาน) โดยควบคุมอุณหภูมิมบดอัดให้ไม่ต่ำกว่า 130°C และอีกส่วนหนึ่งนำไปหาความหนาแน่นสูงสุดตามทฤษฎีโดยไม่บดอัด (Maximum Theoretical Density of Mixture, Gmm)

นำตัวอย่างที่บดอัดแล้วเสร็จทดสอบหาค่าความหนาแน่น (Bulk Specific Gravity of Mixture, Gmb) และทดสอบหาค่า Marshall stability and flow แล้วนำค่าต่างๆมาคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Binder Content, OBC)

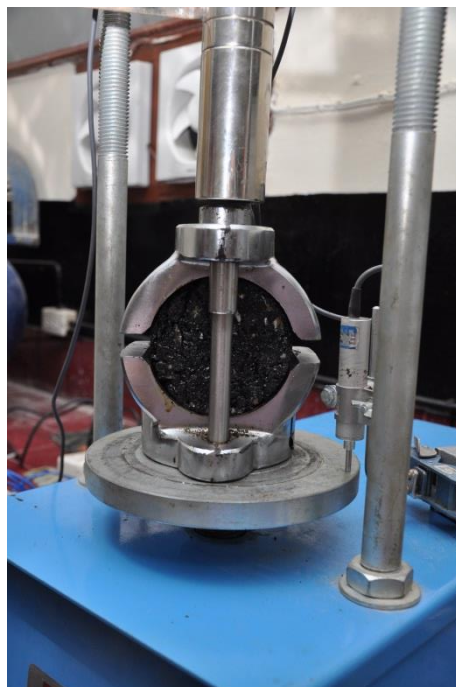
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์หาค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Binder Content) สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละ Dense Graded

การหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด				
%AC @ max Gmb	5.9%	ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสม (OBC)	5.4%	
%AC @ max stability	4.9%			
%AC @ middle AV limit	5.4%			
ข้อกำหนดของปริมาณจราจรระดับสูง				
ข้อกำหนด	ผลการทดสอบ	ขั้นต่ำ	ขั้นสูง	ผลลัพธ์
%AV @ OBC (%)	4	3	5	ผ่าน
stability @ OBC (kN)	12.2	8	-	ผ่าน
flow @ OBC (0.25 mm)	13.5	8	14	ผ่าน
VMA @ OBC (%)	14.7	14	-	ผ่าน

จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.4 ได้ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขนาดคละที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ที่ 5.4% โดยน้ำหนักวัสดุผสมทั้งหมด และที่ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด ค่าของตัวแปรต่างๆผ่านตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่เป็นตัวควบคุมคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับปริมาณจราจรระดับสูงทุกตัวแปร



ภาพที่ 4.2 (ซ้าย) เครื่องบดอัดอัตโนมัติแบบ Marshall
(ขวา) ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Marshall Stability และ Flow



ภาพที่ 4.3 การทดสอบ Marshall Stability & Flow ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต
(ซ้าย) ก่อนการทดสอบ (ขวา) หลังการทดสอบ

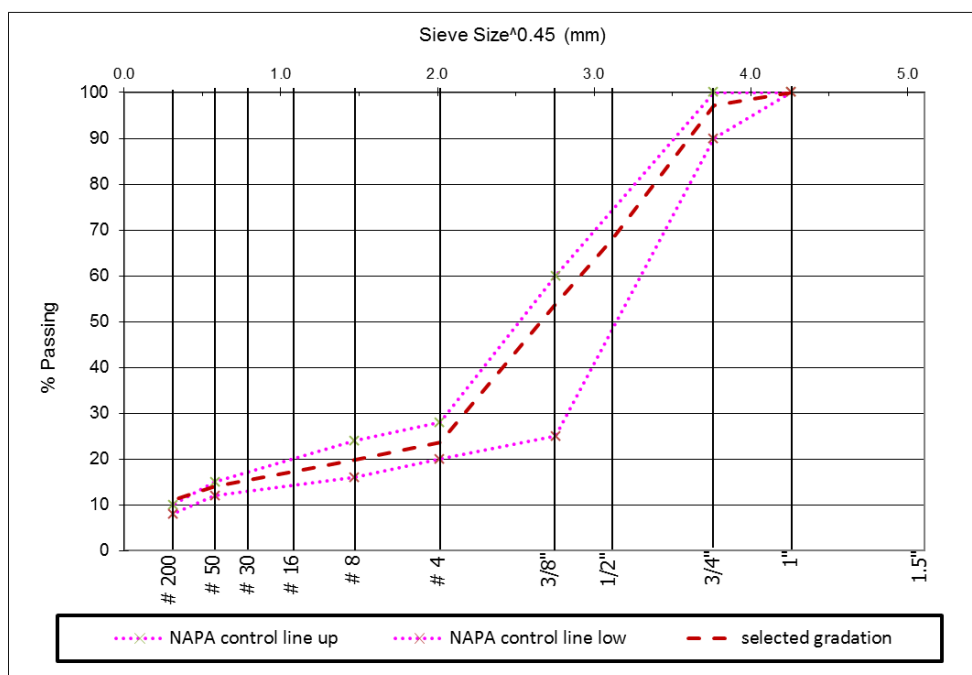
- Gap Graded

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded หรือที่นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่า Stone Mastic Asphalt (SMA) สำหรับงานวิจัยนี้จะดำเนินการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามข้อเสนอแนะของคู่มือ Designing and Constructing SMA Mixtures – State – of – the – Practice ซึ่งจัดทำโดย National Asphalt Pavement Association (NAPA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีรายละเอียดของการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตออกเป็น 2 ส่วน การทดสอบเพื่อหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Marshall Mix Design และการทดสอบการแยกตัวระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต หรือการทดสอบ Draindown ด้วยมาตรฐานการทดสอบ AASHTO T 305-09 Standard Method of Test for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures[53]

สำหรับการหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมจะใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall เช่นเดียวกับการออกแบบส่วนผสมของขนาดคละแบบ Dense Graded โดยเริ่มจากการกำหนดขนาดคละที่ใช้สำหรับงานวิจัยให้มีลักษณะเป็นไปตามรูปแบบของ Gap Graded ซึ่งอ้างอิงขอบเขตบนและล่างของขนาดคละตามข้อเสนอแนะของ NAPA โดยขนาดคละที่กำหนดมีขนาดของมวลรวมใหญ่ที่สุดที่ 19 mm เช่นเดียวกับขนาดคละแบบ Dense Graded โดยขนาดคละแบบ Gap Graded สำหรับงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ขนาดคละแบบ Gap Grade ที่ใช้ในงานศึกษา

ตะแกรง	%การผ่านตะแกรง โดยน้ำหนัก	%ค้างบนตะแกรงสะสม โดยน้ำหนัก	%ค้างบนตะแกรง โดยน้ำหนัก
1 in	100.0	0.0	0.0
3/4 in	97.3	2.7	2.7
1/2 in	68.0	32.0	29.3
3/8 in	53.8	46.2	14.2
# 4	23.5	76.5	30.2
# 8	19.6	80.4	3.9
# 16	17.1	82.9	2.6
# 30	15.4	84.6	1.7
# 50	13.8	86.2	1.6
# 200	10.9	89.1	2.9
Pan	0	100.0	10.9



ภาพที่ 4.4 เส้นขนาดคละแบบ Gap Graded ที่ใช้ในงานศึกษา

หลังจากนั้นพิจารณาคุณสมบัติด้านความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ เนื่องจากใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เช่นเดียวกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded จึงใช้อุณหภูมิสำหรับการเตรียมส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเดียวกันกับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Dense Graded ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- สถานะผสมต้องการความหนืด 0.17 ± 0.02 Pa-s เทียบเท่ากับความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 140 - 146 °C.
- สถานะบดอัดต้องการความหนืด 0.28 ± 0.02 Pa-s เทียบเท่ากับความหนืดของแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิ 129 - 134 °C

โดยรูปแบบการเตรียมวัสดุ จะมีรูปแบบคล้ายคลึงกับการเตรียมวัสดุเพื่อการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded คือผสมมวลรวมอบร้อนที่ 165°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และแอสฟัลต์อบร้อนที่ 155°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องผสมไฟฟ้า โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนของแอสฟัลต์ให้เพิ่มขึ้นเป็นระดับซึ่งอยู่ในช่วง 6% - 8% โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด และควบคุมอุณหภูมิผสมไม่ให้ต่ำกว่า 140°C แล้วจำลองการเสื่อมสภาพของแอสฟัลต์ขณะขนส่งจากโรงงานไปยังหน้างาน (Short Term Aging) ก่อนการบดอัด โดยนำวัสดุผสมเข้าอบในเตาที่ 135°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นบดอัดวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตด้วย Marshall Compactor จำนวน 50 ครั้งต่อด้าน โดยควบคุมอุณหภูมิขณะบดอัดให้ไม่ต่ำกว่า 130°C และอีกส่วนหนึ่งนำไปหาความหนาแน่นสูงสุดตามทฤษฎีโดยไม่บดอัด (Maximum Theoretical Density of Mixture, Gmm)

หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่บดอัดเสร็จทดสอบหาค่าความหนาแน่น (Bulk Specific Gravity of Mixture, Gmb) และทดสอบหาค่า Marshall stability and flow แล้วนำค่าต่างๆมาคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการพิจารณาหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Binder Content, OBC) โดยผลการวิเคราะห์มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์หาค่าปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Binder Content) สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียด Gap Graded

การหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด				
%AC @ max Gmb	6%	ปริมาณแอสฟัลต์ที่		6%
%AC @ max stability	6%	เหมาะสม (OBC)		
%AC @ middle AV limit	6%			
ข้อกำหนดของ NAPA				
ข้อกำหนด	ผลการทดสอบ	ขั้นต่ำ	ขั้นสูง	ผลลัพธ์
%AV @ OBC (%)	4	3	5	ผ่าน
stability @ OBC (kN)	6.7	6.2	-	ผ่าน
flow @ OBC (0.25 mm)	16	-	-	ผ่าน
VMA @ OBC (%)	18.7	17	-	ผ่าน

จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.6 ได้ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขนาดละเอียดแบบ Gap Graded ที่กำหนดไว้ใช้สำหรับงานวิจัยนี้อยู่ที่ 6.0% โดยน้ำหนักวัสดุผสมทั้งหมด และที่ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด ค่าของตัวแปรต่างๆผ่านตามข้อกำหนดของ NAPA ที่เป็นตัวควบคุมคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA ทุกตัวแปร

หลังจากนั้น ดำเนินการทดสอบเพื่อพิจารณาการแยกตัวระหว่างมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตระหว่างการขนส่ง หรือการทดสอบ Draindown เนื่องจากแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA มีปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่สูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบทั่วไป จึงมีโอกาสที่แอสฟัลต์ซีเมนต์จะแยกตัวได้ง่าย ดังนั้น NAPA จึงกำหนดให้มีการทดสอบนี้หลังจากได้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ซึ่งขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO T305-09 โดยทดสอบกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบปกติ ที่มีมวลรวมเป็นหินปูนทั้งหมด ร่วมกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ในปริมาณ 2% โดยปริมาตรมวลรวม เพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมยางบดต่อการเกิด Draindown ด้วย โดยรายละเอียดผลการทดสอบ Draindown แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบ Draindown

งาน		A	B	C	D
รายละเอียด		หินปูน + แอสฟัลต์	หินปูน + แอสฟัลต์	หินปูน + ยางบด + แอสฟัลต์	หินปูน + ยางบด + แอสฟัลต์
เงื่อนไขการทดสอบ	อุณหภูมิ	150 C	150 C	150 C	150 C
	เวลา	1 hr	1 hr	1 hr	1 hr
น้ำหนักหินปูน (g)		941.7	940.8	920.2	920.9
น้ำหนักยางบด (CR) (g)		0	0	7.7	7.7
น้ำหนักแอสฟัลต์ (g)		61.5	60	59.6	60
% แอสฟัลต์		6.1%	6.0%	6.0%	6.0%
น้ำหนักงานเปล่า (g)		193	213.2	200.3	202.5
น้ำหนักงานและส่วนผสมในงาน (g)		241.5	260.5	202	204
น้ำหนักส่วนผสมในงาน (g)		48.5	47.3	1.7	1.5
น้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด (g)		1003.2	1000.8	998.6	999.7
% drain down (กำหนดไม่เกิน 0.3%)		4.8%	4.7%	0.2%	0.2%
ผลการทดสอบ		ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

จากผลการทดสอบพบว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจากการทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด ส่วนผสมรูปแบบที่มวลรวมเป็นหินปูนทั้งหมด (งาน A และ B) ไม่ผ่านข้อกำหนดของการทดสอบ Draindown เนื่องจากมีการแยกตัวระหว่างแอสฟัลต์และมวลรวมที่มากเกินไปเกินข้อกำหนด จึงยังไม่เหมาะสมมากเท่าที่ควรในการนำแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบดังกล่าวไปดำเนินการก่อสร้างผิวทางในสนามจริง โดยสาเหตุที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตดังกล่าวไม่ผ่านการทดสอบเนื่องจากโดยทั่วไปส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA มักจะใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์แบบปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt : PMA) ร่วมกับการเติมเส้นใยเพื่อลดการแยกตัวของวัสดุผสม จึงส่งผลให้ได้ผลการทดสอบ Draindown ที่ดีกว่าส่วนผสมที่ผลิตด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์แบบทั่วไป นอกจากนั้นแอสฟัลต์ซีเมนต์แบบ PMA ยังมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ทั่วไป ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผลิตด้วย PMA จึงมีความแข็งแรงที่สูงกว่าด้วย แต่ราคาของ PMA ยังคงสูงกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์แบบทั่วไป จึงนิยมใช้เป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างผิวทางบนสายทางที่มีปริมาณจราจรสูงมากเท่านั้น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้เป็นเพียงงานศึกษาเท่านั้น ยังต้องการการพัฒนาต่อยอดอีกมากก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงได้ ดังนั้นจึงยังคงเลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์แบบทั่วไปสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA ต่อไป เนื่องจากต้องการศึกษาถึงผลจากการเติมยางบดลงใน

ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยศึกษาความแตกต่างของปัจจัยด้านปริมาณและขนาดของยางบดเท่านั้น จึงควบคุมปัจจัยอื่นๆให้เหมือนกัน แต่จากการทดสอบการเกิด Draindown ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด (งาน C และ D) เพื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมรูปแบบทั่วไป พบว่าการเติมยางบดสามารถลดการเกิด Draindown ได้เป็นอย่างดีชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.5 จึงถือว่าเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของการเติมยางบดลงในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ช่วยลดการเกิด Draindown ได้โดยไม่ต้องเติมเส้นใยเพิ่มเติมแต่อย่างใด



ภาพที่ 4.5 ตัวอย่างหลังการทดสอบ Draindown ของงาน A, B, C และ D
เรียงจากซ้ายไปขวาตามลำดับ

จากจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการทราบถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการเสีรูปร่างของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไป จากการผสมยางบดด้วยขนาดและปริมาณต่างๆ ลงในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตโดยต้องการให้ยางบดทำหน้าที่เป็นมวลรวม (Rubber Aggregate) โดยความต้องการให้ยางบดที่เติมเข้าไปจะเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยไม่ทำให้สัดส่วนของมวลรวมแต่ละขนาดเปลี่ยนแปลงไปจากขนาดคละที่กำหนดไว้ เพื่อต้องการควบคุมปัจจัยด้านประสิทธิภาพของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงไปจากขนาดคละที่ต่างกันไป ดังนั้นหลักการของการผสมยางบดเข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต คือเมื่อพิจารณาเฉพาะมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีต หากทำการวิเคราะห์ Sieve Analysis เพื่อพิจารณาขนาดคละโดยสัดส่วนตามปริมาตรของมวลรวมทั้งหมดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ ขนาดคละของส่วนผสมที่เป็นหินปูนทั้งหมดกับส่วนผสมที่มียางบดแทนที่จะมีขนาดคละที่เหมือนกัน

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ Sieve Analysis มักจะพิจารณาด้วยสัดส่วนโดยน้ำหนัก เนื่องจากมีความสะดวกมากกว่าการพิจารณาด้วยปริมาตรในการเนนการทดสอบ แต่ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม 2 ประเภท คือ หินปูนและยางบดไม่เท่ากัน (แม้แต่หินปูนที่ขนาดแตกต่างกัน ค่าความถ่วงจำเพาะก็แตกต่างกันไป ดังแสดงในตารางที่ 4.2) งานวิจัยนี้จึงควบคุมความสม่ำเสมอของขนาดคละด้วยการพิจารณาจากสัดส่วนมวลรวมโดยปริมาตรแทน

แต่จากที่กล่าวในข้างต้นว่าระหว่างการค้าดำเนินการผลิต การตรวจวัดน้ำหนักมวลรวมจะมีความสะดวกและเหมาะสมกว่าการตรวจวัดปริมาตร ดังนั้นการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ทั้งหมดจะควบคุมน้ำหนักของวัสดุระหว่างการผลิตด้วยการคำนวณแปลงสัดส่วนโดยน้ำหนักเป็นสัดส่วนโดยปริมาตร ซึ่งมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันตามค่าความถ่วงจำเพาะที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตรของวัสดุ โดยความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของมวลรวมแต่ละขนาดโดยน้ำหนักและโดยปริมาตรของมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded และ Gap Graded มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 สัดส่วนโดยน้ำหนักและปริมาตรของมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded

ตะแกรง	% ค้างบนตะแกรงโดยน้ำหนัก	ความถ่วงจำเพาะ	% ค้างบนตะแกรงโดยปริมาตร
3/4 in	4.6	2.704	4.6
1/2 in	25.0	2.710	24.9
3/8 in	13.5	2.707	13.4
# 4	18.9	2.712	18.8
# 8	13.7	2.720	13.6
# 16	7.0	2.678	7.1
# 30	5.2	2.630	5.4
# 50	4.0	2.606	4.1
# 100	2.5	2.636	2.6
# 200	1.5	2.692	1.5
Pan	4.0	2.631	4.1
SUM	100.0		100.0

ตารางที่ 4.9 สัดส่วนโดยน้ำหนักและปริมาตรของมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded

ตะแกรง	% ค้างบนตะแกรงโดยน้ำหนัก	ความถ่วงจำเพาะ	% ค้างบนตะแกรงโดยปริมาตร
3/4 in	2.7	2.704	2.7
1/2 in	29.3	2.710	29.1
3/8 in	14.2	2.707	14.2
# 4	30.2	2.712	30.1
# 8	3.9	2.720	3.9
# 16	2.6	2.678	2.6
# 30	1.7	2.630	1.7
# 50	1.6	2.606	1.6
# 200	2.9	2.692	3.0
Pan	10.9	2.631	11.1
SUM	100.0		100.0

โดยหลักการในการคำนวณน้ำหนักยางบดสำหรับผสมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต คือ พิจารณาที่มวลรวมขนาดเดียวกัน ปริมาตรที่ลุดออกจากส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตของหินปูนจะ เท่ากับปริมาตรของยางบดที่ต้องการผสมแทนที่ โดยการดำเนินงานจะแปลงปริมาตรของหินปูนและ ยางบดเป็นน้ำหนักด้วยค่าความถ่วงจำเพาะและควบคุมการผลิตจากการตรวจวัดน้ำหนัก ดัง ตัวอย่างเช่น จากผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วย Marshall Mix Design บ่งบอกได้ ว่าขนาดคละแบบ Dense Graded และ Gap Graded ที่กำหนดไว้มีความเหมาะสม โดยมีปริมาณ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมค่าหนึ่งสำหรับขนาดคละแต่ละรูปแบบ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การบดอัดตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm ให้มีช่องว่างอากาศ 7% ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded จากข้อมูลผลการออกแบบด้วย Marshall Mix Design ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 5.4% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด โดย วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดตามทฤษฎี (Gmm) อยู่ที่ 2.496 g/cm³ ดังนั้นเมื่อ คำนวณย้อนกลับ ความหนาแน่นของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว (Gmb) มีค่าเท่ากับ 2.321 g/cm³

เมื่อคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตร สำหรับตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm มีปริมาตรของตัวอย่างโดยรวม 1178.1 cm³ จากค่า Gmb สามารถคำนวณน้ำหนักวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้ 2734.3 g และใช้ค่าสัดส่วนแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ที่สุด คำนวณย้อนกลับได้เป็นน้ำหนักมวลรวม 2586.7 g และน้ำหนักแอสฟัลต์ 147.7 g โดย ความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.8 สามารถหาปริมาตรของมวลรวมแต่ละขนาดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 รายละเอียดด้านความถ่วงจำเพาะ น้ำหนักและปริมาตรมวลรวม สำหรับแอสฟัลต์ คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded

ตะแกรง	ความ ถ่วงจำเพาะ	% ค้างบนตะแกรง โดยน้ำหนัก	น้ำหนักมวล รวม (g)	ปริมาตรมวล รวม (cm ³)	% ค้างบนตะแกรง โดยปริมาตร
3/4 in	2.704	4.6	119.9	44.34	4.62%
1/2 in	2.710	25.0	646.8	238.66	24.86%
3/8 in	2.707	13.5	348.6	128.77	13.41%
# 4	2.712	18.9	488.5	180.13	18.77%
# 8	2.720	13.7	354.7	130.41	13.59%
# 16	2.678	7.0	182.0	67.98	7.08%
# 30	2.630	5.2	135.8	51.62	5.38%
# 50	2.606	4.0	103.5	39.70	4.14%
# 100	2.636	2.5	64.7	24.53	2.56%
# 200	2.692	1.5	38.8	14.41	1.50%
Pan	2.631	4.0	103.5	39.33	4.10%
SUM		100.0	2586.7	959.89	100.0%

หากต้องการผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ด้วยสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวมทั้งหมดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตนี้ จากการทดสอบชั้นนำร่องพบว่ายางบดมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 1.105 หากแทนที่มวลรวมในสัดส่วน 2% ของปริมาตรมวลรวม คือ 19.20 cm^3 จะคำนวณเป็นน้ำหนักยางบดได้ 21.2 g แล้วคำนวณการลดทอนน้ำหนักของมวลรวมที่เป็นหินปูนลงตามสัดส่วนในขนาดคละ เช่น น้ำหนักของมวลรวมหินปูนขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ที่ถูกแทนที่ด้วยยางบดขนาดเดียวกันด้วยปริมาตร 19.20 cm^3 จากค่าความถ่วงจำเพาะของหินปูนขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 คือ 2.678 ปริมาตรหินปูน 19.20 cm^3 คิดเป็นน้ำหนัก 51.4 g จึงต้องลดน้ำหนักของหินปูนขนาดดังกล่าวลง จากส่วนผสมโดยปกติ คือ 182.0 g เหลือเพียง 130.6 g โดยเติมยางบดน้ำหนัก 21.2 g เพื่อแทนที่หินปูนที่ลดทอนลง โดยรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded เพื่อบดอัดเป็นตัวอย่างทรงกระบอก

ตะแกรง	% ค้ำบนตะแกรงโดยปริมาตร	ปริมาตรมวลรวม (cm^3)	หินปูนล้วน (Control)	น้ำหนักมวลรวม (g)	
				ความถ่วงจำเพาะยางบด = 1.105	
				ยางบด 2% โดยปริมาตรมวลรวม = 19.20 cm^3	
				ส่วนผสมที่มียางบดค้ำบนตะแกรง #16	
				หินปูน	ยางบด
3/4 in	4.62	44.34	119.9	119.9	
1/2 in	24.86	238.66	646.8	646.8	
3/8 in	13.41	128.77	348.6	348.6	
# 4	18.77	180.13	488.5	488.5	
# 8	13.59	130.41	354.7	354.7	
# 16	7.08	67.98	182.0	130.6	21.2
# 30	5.38	51.62	135.8	135.8	
# 50	4.14	39.70	103.5	103.5	
# 100	2.56	24.53	64.7	64.7	
# 200	1.50	14.41	38.8	38.8	
Pan	4.10	39.33	103.5	103.5	
รวม	100.0	959.89	2586.7	2535.3	21.2

กล่าวโดยสรุปคือ การเติมยางบดจะไม่เปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดยปริมาตรโดยรวมของมวลรวมแต่ละขนาดและยังใช้ปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์คงที่ทุกรูปแบบส่วนผสม สำหรับการผลิตแอสฟัลต์ซีเมนต์เพื่อการทดสอบประเภทเดียวกัน โดยใช้หลักการที่กล่าวมาในการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทุกรูปแบบส่วนผสมสำหรับขนาดคละทั้ง 2 รูปแบบทดลองงานวิจัย

4.3 การพิจารณารูปแบบการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมที่สุด

จากการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วเสร็จ ผลลัพธ์ที่ได้คือสูตรสำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded และ Gap Graded หลังจากนั้นพิจารณาในส่วนของการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด เพื่อหาวิธีการในการเติมยางบดและผสมให้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมที่สุด โดยอ้างอิงวิธีการจากขั้นตอนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตในโรงงานจนถึงขั้นตอนการก่อสร้างเพื่อปูผิวทาง เมื่อได้วิธีการเติมยางบดที่เหมาะสมที่สุดแล้วจะใช้วิธีการดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งขั้นตอนปฏิบัติในการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มียางบดรูปแบบต่างๆ ในการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการต้านทานการเสีयरูปถาวรจากการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในการทดสอบอื่นๆต่อไป

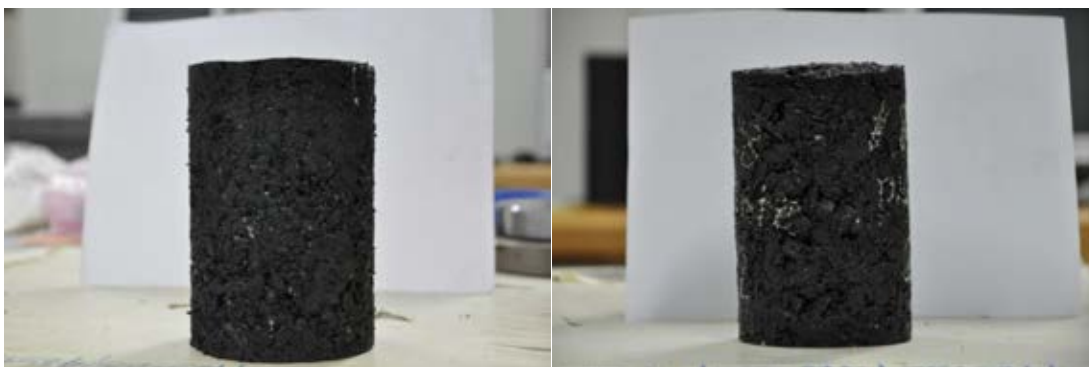
รูปแบบการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ กำหนดวิธีการดำเนินงานไว้ 2 รูปแบบที่สอดคล้องกับขั้นตอนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตในระดับอุตสาหกรรม คือ

- เติมยางบดขณะขั้นตอนการผสมหินอบร้อนกับแอสฟัลต์อบร้อน คลุกเคล้าให้เข้ากัน เป็นการจำลองการเติมยางบดในขั้นตอนการผสมที่ห้องผสม (Pugmill) ของโรงงานผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต
- เติมยางบดในวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้ว โดยผสมให้เข้ากันดีก่อนทำการบดอัดตัวอย่าง เป็นการจำลองการเติมยางบดที่ส่วนพรวน (Auger) ของรถปูผิว (Paver) ที่หน้างานแล้วบดอัดทันทีด้วยรถบด (Compactor)

ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded โดยใช้รูปแบบส่วนผสมที่ผสมด้วยยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ที่ปริมาณยางบด 2% โดยปริมาตรรวมรวม รูปแบบการเติมยางบดละ 3 ตัวอย่าง แล้วบดอัดตัวอย่างเป็นทรงกระบอกโดยแต่ละชิ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm ให้หนาแน่นจนมีช่องว่างอากาศเท่ากับ 7% ด้วย Gyrotory Compactor โดยรายละเอียดน้ำหนักมวลรวมเป็นดังตารางที่ 4.11

เกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสม จะพิจารณาจากความสะดวกในการปฏิบัติงานและเสถียรภาพของตัวอย่างหลังจากการบดอัดแทน พบว่าการเติมยางบดขณะขั้นตอนการผสมหินปูนและแอสฟัลต์เพื่อผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีความสะดวกการดำเนินงานผลิตมากกว่า มีการสูญเสียความร้อนของแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการบดน้อยกว่าการผสมยางบดกับแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการบดอัด นอกจากนี้การเติมยางบดผสมกับแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนขั้นตอนการบดอัดพบว่าตัวอย่างมีการขยายตัวและไม่คงรูปอย่างเห็นได้ชัดด้วยตาเปล่า ดังแสดงในภาพที่ 4.6

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกรูปแบบการเติมยางบดขณะขั้นตอนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เป็นขั้นตอนการปฏิบัติสำหรับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดรูปแบบต่างๆ สำหรับการทดสอบในขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.6 (ซ้าย) ตัวอย่างที่เตรียมยางบดขณะขั้นตอนการผสม
(ขวา) ตัวอย่างที่เตรียมยางบดก่อนขั้นตอนการบดอัด

4.4 การทดสอบการต้านทานการเสีรูปลถวรของแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยการทดสอบความคืบแบบพลวัตร (Dynamic Creep)

การทดสอบความคืบแบบพลวัตร (Dynamic Creep) เป็นการทดสอบด้านความต้านทานการเสีรูปลถวรของแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบหนึ่ง โดยนำแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆบดอัดเป็นตัวอย่างทรงกระบอกให้ได้ขนาดและความหนาแน่นตามที่เงื่อนไขการทดสอบกำหนด หรือเจาะเก็บตัวอย่างจากสนามเพื่อนำมาทดสอบได้เช่นกัน สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบ Dynamic Creep ด้วยเครื่องมือ Asphalt Mixture Performance Test (AMPT) ตามมาตรฐาน AASHTO TP79-09 โดยมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบ Dynamic Modulus โดยเงื่อนไขอื่นๆ ของการเตรียมตัวอย่างเป็นไปตามรายละเอียดการดำเนินงานศึกษาของ NCHRP Report No.673 ซึ่งใช้ตัวอย่างทดสอบที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ ผสมวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตและบดอัดเป็นตัวอย่างทรงกระบอกด้วย Gyrotory Compactor ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 20 cm ให้มีความหนาแน่นเทียบเท่ากับกรณีช่องว่างอากาศ 7% ในตัวอย่าง แล้วเจาะแกนกลางพร้อมกับตัวส่วนหัวและท้ายให้เรียบ เหลือเป็นตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm เช่นกัน

สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded และ Gap Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ ผลิตตามขั้นตอนที่ได้จากการศึกษาในระยะนำร่อง โดยผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด 3 รูปแบบสำหรับแต่ละขนาดคละ คือ

- ส่วนผสมที่เป็นหินปูนทั้งหมด เพื่อเป็นฐานสำหรับเปรียบเทียบ
- ส่วนผสมที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ปริมาณ 2% ของปริมาตรมวลรวมทั้งหมด
- ส่วนผสมที่ผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ปริมาณ 2% ของปริมาตรมวลรวมทั้งหมด

หมายเหตุ การทดสอบ Dynamic Creep ใช้ตัวอย่างในการทดสอบชุดเดียวกับตัวอย่างที่บิดอัดเพื่อการทดสอบหาวิธีการเติมยางบดที่ดีที่สุดในหัวข้อ 4.3 โดยในช่วงแรกของการทดสอบต้องการดูแนวโน้มของผลการทดสอบ จึงเลือกผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตเพียง 3 รูปแบบจาก 7 รูปแบบส่วนผสมคือเลือกส่วนผสมที่มีมวลรวมเป็นหินปูนทั้งหมด มียางบดขนาดเล็กที่สุดและใหญ่ที่สุดที่มีสัดส่วนยางบดมากที่สุดก่อน ซึ่งพบว่าผลการทดสอบ Dynamic Creep ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสียรูปถาวรของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้เท่าที่ควร นอกจากนั้นการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบไม่สามารถดำเนินการตามข้อกำหนดตามมาตรฐานของ AASHTO TP79-09 ได้ทั้งหมด ซึ่งส่งผลให้ผลการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน จึงดำเนินการทดสอบเพียง 3 รูปแบบส่วนผสมต่อขนาดแต่ละแบบเท่านั้น

จากหลักการในการคำนวณน้ำหนักส่วนผสมที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.2 สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded การบดอัดตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm ให้มีช่องว่างอากาศ 7% ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded ที่มีปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 5.4% ของน้ำหนักรวมทั้งหมด โดยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดตามทฤษฎี (Gmm) อยู่ที่ 2.496 g/cm^3 ดังนั้นเมื่อคำนวณย้อนกลับ ความหนาแน่นของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว (Gmb) มีค่าเท่ากับ 2.321 g/cm^3 เมื่อคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตร สำหรับตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm มีปริมาตรของตัวอย่างโดยรวม 1178.1 cm^3 จากค่า Gmb สามารถคำนวณน้ำหนักวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้ 2734.3 g และใช้ค่าสัดส่วนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด คำนวณย้อนกลับได้เป็นน้ำหนักรวม 2586.7 g และน้ำหนักแอสฟัลต์ 147.7 g จากหลักการคำนวณทำให้ได้รายละเอียดของมวลรวมสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ เพื่อבודัดเป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic Creep

ตะแกรง	% ค้าง บน ตะแกรง โดย ปริมาตร	ปริมาตร มวลรวม (cm ³)	หินปูนล้วน (Control)	น้ำหนักมวลรวม (g)			
				ความถ่วงจำเพาะยางบด = 1.105			
				ยางบด 2% โดยปริมาตรมวลรวม = 19.20 cm ³			
				ส่วนผสมที่มียางบดค้ำ บนตะแกรง #16		ส่วนผสมที่มียางบดผ่าน ตะแกรง #30	
			หินปูน	ยางบด	หินปูน	ยางบด	
3/4 in	4.62	44.34	119.9	119.9		119.9	
1/2 in	24.86	238.66	646.8	646.8		646.8	
3/8 in	13.41	128.77	348.6	348.6		348.6	
# 4	18.77	180.13	488.5	488.5		488.5	
# 8	13.59	130.41	354.7	354.7		354.7	
# 16	7.08	67.98	182.0	130.6	21.2	182.0	
# 30	5.38	51.62	135.8	135.8		135.8	
# 50	4.14	39.70	103.5	103.5		86.6	21.2
# 100	2.56	24.53	64.7	64.7		54.1	
# 200	1.50	14.41	38.8	38.8		32.5	
Pan	4.10	39.33	103.5	103.5		86.6	
รวม	100.0	959.89	2586.7	2535.3	21.2	2536.2	21.2



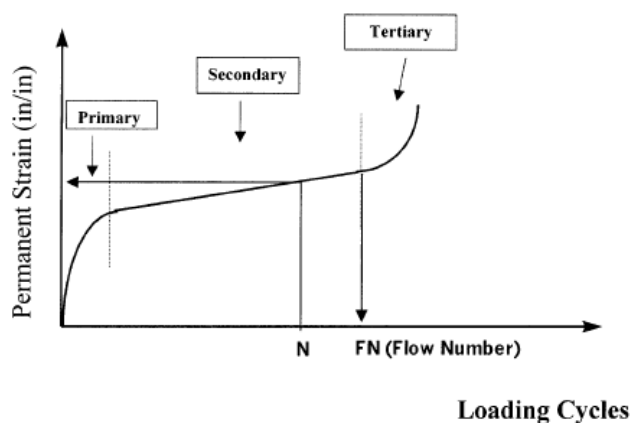
ภาพที่ 4.7 (ซ้าย) Gyratory Compactor (ขวา) ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic Creep

สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded จากหลักการในการคำนวณ น้ำหนักส่วนผสมในหัวข้อ 4.2 การบดอัดตัวอย่างทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm ให้มีช่องว่างอากาศ 7% ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded ที่มีปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 6.0% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด โดยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดตามทฤษฎี (Gmm) อยู่ที่ 2.473 g/cm^3 ดังนั้นเมื่อคำนวณย้อนกลับ ความหนาแน่นของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว (Gmb) มีค่าเท่ากับ 2.300 g/cm^3 เมื่อคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตร สำหรับตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 15 cm มีปริมาตรของตัวอย่างโดยรวม 1178.1 cm^3 จากค่า Gmb สามารถคำนวณน้ำหนักวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้ 2709.5 g และใช้ค่าสัดส่วนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด คำนวณย้อนกลับได้เป็น น้ำหนักมวลรวม 2546.9 g และน้ำหนักแอสฟัลต์ 162.9 g จากหลักการคำนวณทำให้ได้รายละเอียดของมวลรวมสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรมวลรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ เพื่อบดอัดเป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Dynamic Creep

ตะแกรง	% ค้าง บน ตะแกรง โดย ปริมาตร	ปริมาตร มวลรวม (cm^3)	หินปูนล้วน (Control)	น้ำหนักมวลรวม (g)			
				ความถ่วงจำเพาะยางบด = 1.105			
				ยางบด 2% โดยปริมาตรมวลรวม = 18.89 cm^3			
				ส่วนผสมที่มียางบดค้าง บนตะแกรง #16		ส่วนผสมที่มียางบดผ่าน ตะแกรง #30	
				หินปูน	ยางบด	หินปูน	ยางบด
3/4 in	2.74%	25.89	70.0	70.0		70.0	
1/2 in	29.11%	274.92	745.0	745.0		745.0	
3/8 in	14.18%	133.92	362.5	362.5		362.5	
# 4	30.07%	283.94	770.0	770.0		770.0	
# 8	3.89%	36.77	100.0	100.0		100.0	
# 16	2.57%	24.27	65.0	14.4	20.9	65.0	
# 30	1.71%	16.16	42.5	42.5		42.5	
# 50	1.63%	15.35	40.0	40.0		34.9	20.9
# 200	2.95%	27.86	75.0	75.0		65.5	
Pan	11.14%	105.21	276.8	276.8		241.6	
รวม	100.0%	944.29	2546.9	2496.3	20.9	2497.1	20.9

หลังจากเตรียมตัวอย่างแล้วเสร็จ ดำเนินการทดสอบ Dynamic Creep โดยให้แรงกระทำในแนวตั้งซ้ำแก่ตัวอย่างด้วยขนาดและความถี่ที่คงที่ ภายใต้สภาวะอื่นๆ เช่น อุณหภูมิทดสอบ แรงดันด้านข้าง (Confinement) ตามเงื่อนไขการทดสอบที่กำหนด โดยตัวอย่างจะยุบตัวเมื่อถูกแรงกดในแนวตั้งและคืนตัวหลังจากไม่ได้รับแรงกระทำ แต่ตัวอย่างไม่สามารถคืนตัวได้ทั้งหมดเนื่องจากมีความเครียดถาวร (Permanent Strain) เกิดขึ้น โดยความเครียดถาวรจะสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามรอบของการให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติในที่สุด โดยลักษณะการวิบัติของตัวอย่างจะมีลักษณะซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมในสนามของวัสดุ กล่าวคือ ช่วงแรก (Primary) วัสดุยังมีช่องว่างอากาศอยู่มาก จึงเกิดการขยับและเรียงตัวของมวลรวมจนมีความแน่นเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นช่วงที่สอง (Secondary) วัสดุเริ่มมีการยุบตัวถาวรอย่างช้าๆและต่อเนื่อง จนถึงช่วงที่สาม (Tertiary) วัสดุถึงขีดจำกัดในการรักษาสภาพคงรูปไว้ได้ เมื่อรับแรงกระทำต่อวัสดุจะเกิดการยุบตัวอย่างรวดเร็วและวิบัติในที่สุด โดยค่าที่ได้จากผลการทดสอบความคืบแบบพลวัตร คือ ค่าการไหล หรือ Flow Number ซึ่งนิยามของ Flow Number คือ รอบการให้แรงกระทำ ที่เป็นจุดเริ่มของการยุบตัวช่วงที่สาม ดังแสดงในภาพที่ 4.8

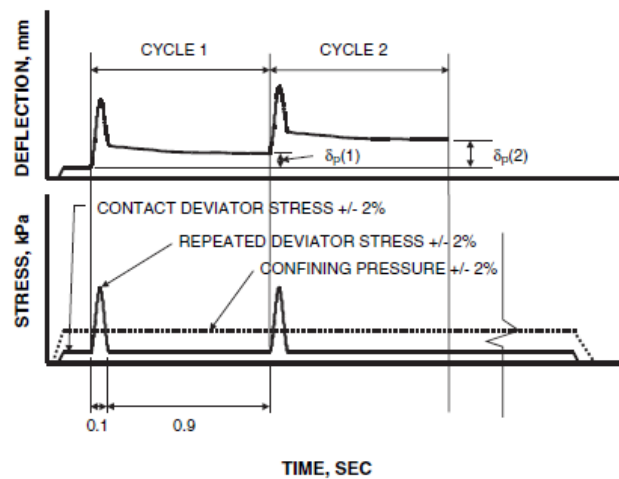


ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรกับรอบการทดสอบ Flow Number

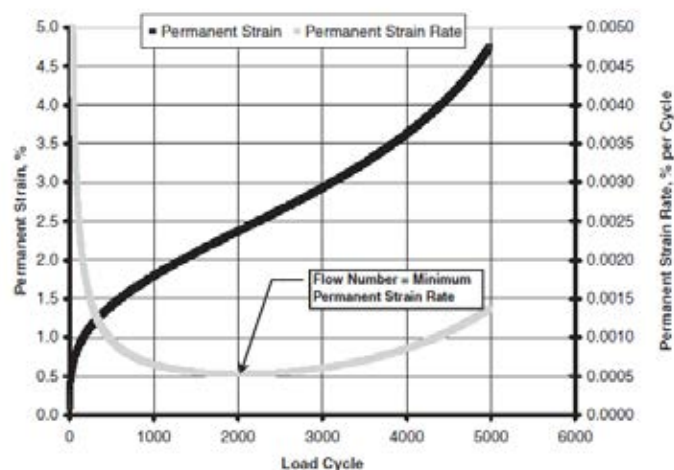
สำหรับรูปแบบการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบ AASHTO TP79 - 09 ระบุว่าใน 1 รอบการทดสอบจะมีระยะเวลา 1 วินาที ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงให้แรงกระทำ จะให้หน่วยแรงกระทำแก่ตัวอย่างในแนวตั้ง (Deviator Stress) ด้วยขนาดคงที่ใดๆค่าหนึ่งโดยคำนวณจากน้ำหนักยานพาหนะที่กระทำต่อผิวทางในลักษณะของ Haversine เป็นเวลา 0.1 วินาที และปล่อยให้ตัวอย่างมีระยะพักอีก 0.9 วินาทีก่อนเริ่มการทดสอบรอบถัดไป โดยสามารถเพิ่มแรงดันด้านข้าง (Confining Pressure) แก่ตัวอย่างได้หากเงื่อนไขการทดสอบต้องการพิจารณาผลจากแรงกระทำด้านข้าง ในแต่ละรอบการทดสอบเครื่องทดสอบจะวัดค่าการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้น (Permanent Deformation) ดังแสดงในภาพที่ 4.9 แล้วแปลงเป็นค่าความเครียดถาวร (Permanent Strain) เพื่อคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเครียดถาวร (Permanent Strain Rate) ต่อไป เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณค่า Flow Number มาตรฐานการทดสอบ AASHTO TP79-09 ได้เพิ่มนิยามของ Flow Number ว่าเป็นจุดที่มีค่า Permanent Strain Rate ต่ำที่สุด

โดยผ่านการพิจารณาจาก NCHRP แล้วว่า นิยามของ Flow Number ทั้งสองแบบให้ผลการคำนวณค่า Flow Number ที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.10

สำหรับงานศึกษานี้ อ้างอิงเงื่อนไขการทดสอบ Dynamic Creep จาก NCHRP Report No.673 คือ ปรับอุณหภูมิตัวอย่างด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 50°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนเริ่มการทดสอบ โดยมีลักษณะของแรงกระทำต่อรอบการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน AASHTO TP79-09 กำหนดให้ Deviator Stress มีค่า 600 kPa และไม่มีการให้แรงกระทำด้วย Confining Pressure กำหนดให้เครื่องหยุดการทดสอบเมื่อตัวอย่างมีค่า Permanent Strain เท่ากับ 100,000 microstrain หรือ 20,000 รอบการทดสอบ



ภาพที่ 4.9. รูปแบบการให้แรงกระทำและการวัดการยุบตัวของตัวอย่างต่อรอบการทดสอบด้วยเครื่อง AMPT

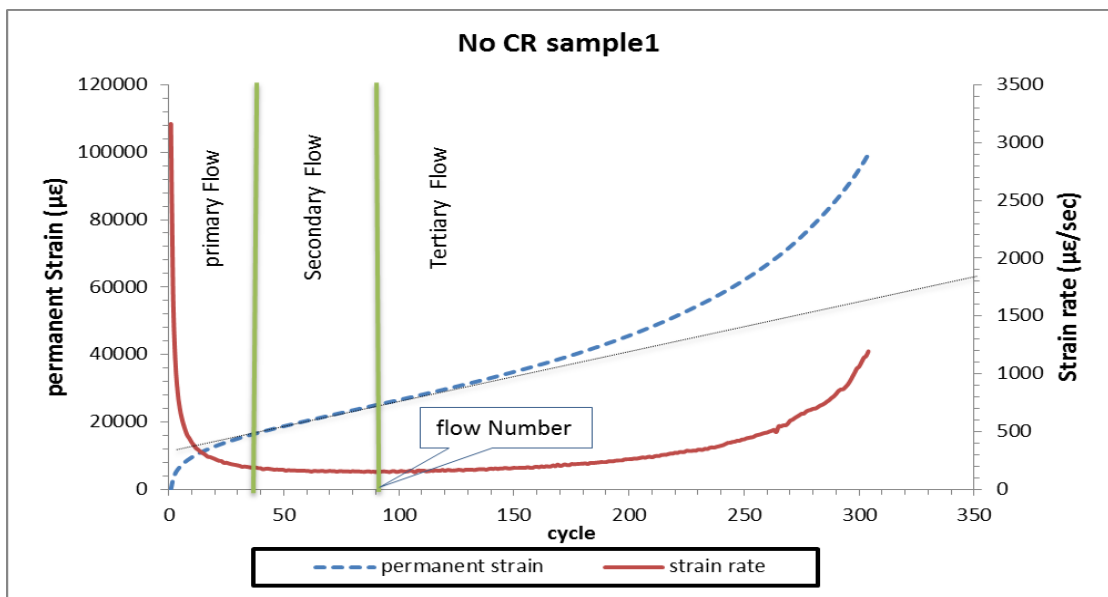


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดถาวรและอัตราเกิดความเครียดถาวรต่อรอบการทดสอบ



ภาพที่ 4.11 (ซ้าย) เครื่อง AMPT (ขวา) ตัวอย่างในเครื่อง AMPT ที่พร้อมทดสอบ Flow Number

หลังจากการทดสอบ นำข้อมูลที่เครื่องทดสอบบันทึกไว้ว่าคำนวณเพื่อหาค่า Flow Number โดยยกตัวอย่างผลการทดสอบสำหรับตัวอย่างที่ 1 ที่เตรียมด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded โดยมีรูปแบบส่วนผสมที่มีมวลรวมเป็นหินปูนทั้งหมด สามารถคำนวณค่า Flow Number ได้เท่ากับ 88 แสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบการทดสอบกับค่า Permanent strain และ Strain Rate ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded แบบไม่ผสมยางบด ตัวอย่างที่ 1

โดยผลการทดสอบ Dynamic Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.14 และผลการทดสอบสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded เป็นไปตามตารางที่ 4.15 โดยภาพที่ 4.13 แสดงถึงสภาพของตัวอย่างก่อนและหลังการทดสอบ Dynamic Creep ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบ Dynamic Creep ของขนาดคละแบบ Dense Graded

	flow number			deformation @ flow point		
	control	#16-2%	pass#30 - 2%	control	#16-2%	pass#30 - 2%
ตัวอย่าง#1	88	83	65	24674	71966	40075
ตัวอย่าง#2	79	122	75	25491	92422	40117
SD	6.4	27.6	7.1	577.7	14464.6	29.7
Mean	83.5	102.5	70.0	25082.5	82194.0	40096.0

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบ Dynamic Creep ของขนาดคละแบบ Gap Graded

	flow number			deformation @ flow point		
	control	#16-2%	pass#30 - 2%	control	#16-2%	pass#30 - 2%
ตัวอย่าง#1	153	156	151	28488	56843	36031
ตัวอย่าง#2	155	133	156	29108	63469	35232
SD	1.4	16.3	3.5	438.4	4685.3	565.0
Mean	154.0	144.5	153.5	28798.0	60156.0	35631.5



ภาพที่ 4.13 ตัวอย่างที่มีขนาดคละแบบ Dense รูปแบบส่วนผสมที่ไม่มียางบด, ผสมยางบดขนาด #16 2% และผสมยางบดขนาดผ่าน #30 2% เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา (ซ้าย) ก่อนการทดสอบ (ขวา) หลังจากทดสอบ

หลังจากนั้นนำผลจากการทดสอบ Dynamic Creep มาพิจารณาถึงความแม่นยำในการดำเนินการทดสอบว่ามีความแม่นยำเพียงพอที่จะยอมรับผลการทดสอบได้หรือไม่ ซึ่งตามข้อกำหนดของ AASHTO TP79-09 ระบุว่าให้พิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ (Flow Number และ Permanent Strain) หากค่าที่ได้จากการทดสอบไม่เกินข้อกำหนดดังกล่าวสามารถยอมรับผลการทดสอบได้ โดยรายละเอียดดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.16

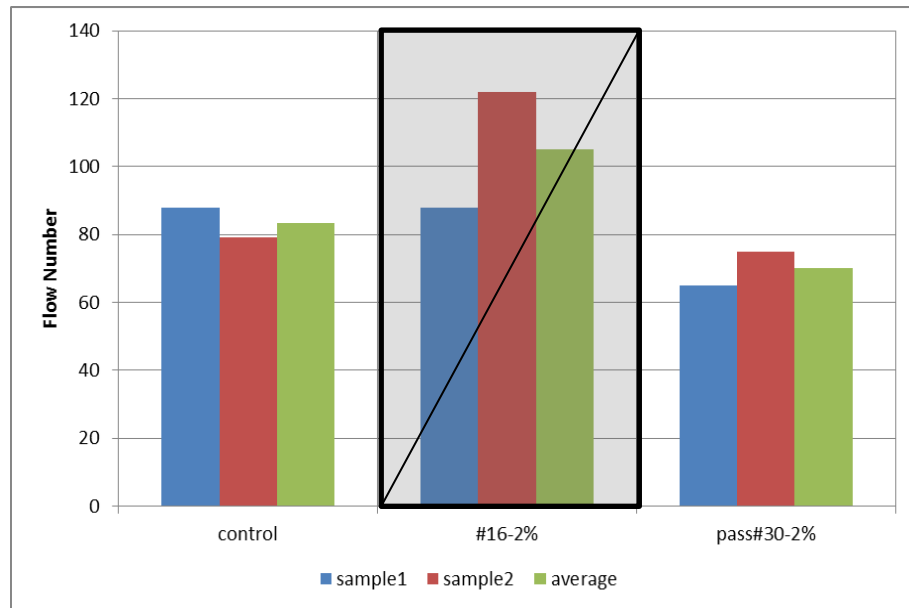
ตารางที่ 4.16 สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยผลการทดสอบ จากการทดสอบ Dynamic Creep ด้วยเครื่อง AMPT

No. of Specimens	Coefficient of Variation for Mean (CV), %	
	Permanent Strain @ Flow Number	Flow Number
2	10.6	14.1
3	8.7	11.5
4	7.5	10.0
5	6.7	8.9
6	6.1	8.2
7	5.7	7.6
8	5.3	7.1
9	5.0	6.7
10	4.7	6.3

โดยผลการวิเคราะห์ถึงการยอมรับได้ของผลการทดสอบ Dynamic Creep สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded แสดงดังตารางที่ 4.17 และภาพที่ 4.14 และสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded แสดงดังตารางที่ 4.18 และภาพที่ 4.15

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์การยอมรับได้ของผลการทดสอบ Dynamic Creep สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded

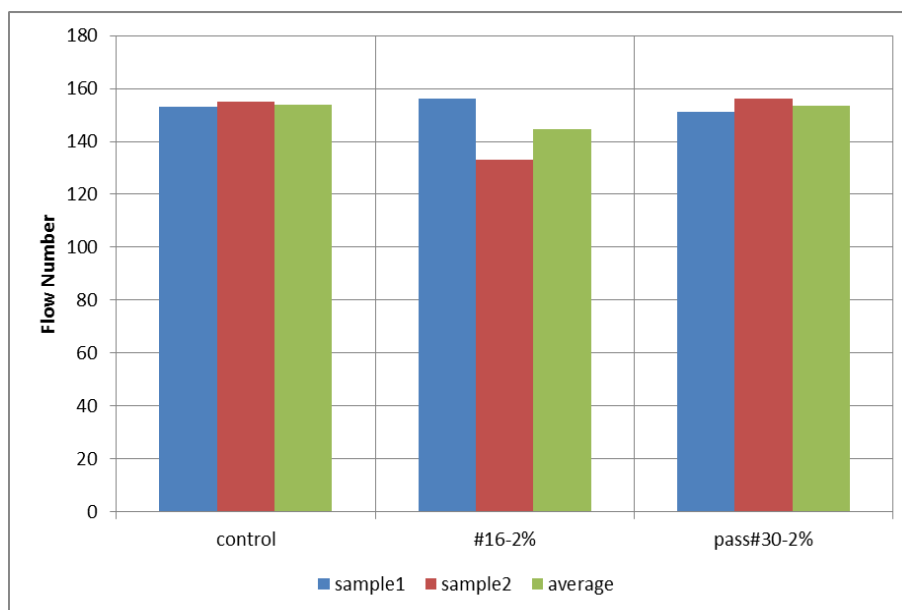
	flow number			deformation @ flow number		
	control	#16 -2%	pass#30 - 2%	control	#16 -2%	pass#30 - 2%
ตัวอย่าง#1	88	83	65	24674	71966	40075
ตัวอย่าง#2	79	122	75	25491	92422	40117
SD	6.4	27.6	7.1	577.7	14464.6	29.7
Mean	83.5	102.5	70.0	25082.5	82194.0	40096.0
%CV	7.6%	26.9%	10.1%	2.3%	17.6%	0.1%
การวิเคราะห์ผลทดสอบ	ยอมรับ	ไม่ยอมรับ	ยอมรับ	ยอมรับ	ไม่ยอมรับ	ยอมรับ
การพิจารณาขั้นสุดท้าย	control	#16-2%	pass#30 - 2%			
	ยอมรับ	ไม่ยอมรับ	ยอมรับ			



ภาพที่ 4.14 ค่า Flow Number จากการทดสอบ Dynamic Modulus ของแอสฟัลต์คอนกรีต
ขนาดคละแบบ Dense Graded

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์การยอมรับได้ของผลการทดสอบ Dynamic Creep สำหรับแอสฟัลต์
คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded

	flow number			deformation @ flow number		
	control	#16 -2%	pass#30 - 2%	control	#16 -2%	pass#30 - 2%
ตัวอย่าง#1	153	156	151	28488	56843	36031
ตัวอย่าง#2	155	133	156	29108	63469	35232
SD	1.4	16.3	3.5	438.4	4685.3	565.0
Mean	154.0	144.5	153.5	28798.0	60156.0	35631.5
%CV	0.9%	11.3%	2.3%	1.5%	7.8%	1.6%
การวิเคราะห์ผลทดสอบ	ยอมรับ	ยอมรับ	ยอมรับ	ยอมรับ	ยอมรับ	ยอมรับ
การพิจารณาขั้นสุดท้าย	control	#16-2%	pass#30 - 2%			
	ยอมรับ	ยอมรับ	ยอมรับ			



ภาพที่ 4.15 ค่า Flow Number จากการทดสอบ Dynamic Modulus ของแอสฟัลต์คอนกรีต ขนาดคละแบบ Gap Graded

สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่า รูปแบบส่วนผสมที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวม ไม่ผ่านเกณฑ์ในการยอมรับผลการทดสอบได้ จึงไม่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปลถาร โดยเมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของค่า Flow Number พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบปกติที่ไม่ผสมยางบด มีค่า Flow Number เท่ากับ 83.5 ขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ปริมาณ 2% โดยปริมาตรมวลรวม มีค่า Flow Number เท่ากับ 70.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบ Dynamic Creep ด้วยขั้นตอนการดำเนินงานของงานวิจัยนี้ ไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของการผสมยางบดในแอสฟัลต์คอนกรีตได้

หากพิจารณาผลการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded พบว่าสามารถยอมรับผลการทดสอบได้ทุกรูปแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยส่วนผสมรูปแบบที่ไม่ผสมยางบด มีค่า Flow Number เฉลี่ย 154.0 ขณะที่ส่วนผสมรูปแบบที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ในสัดส่วน 2% มีค่า Flow Number เฉลี่ย 144.5 และส่วนผสมรูปแบบที่ผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 สัดส่วน 2% มีค่า Flow Number เฉลี่ย 153.5 ซึ่งมีผลการทดสอบเป็นไปในแนวทางเดียวกับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded คือ ขั้นตอนการดำเนินงานทดสอบ Dynamic Creep ของงานวิจัยนี้ ไม่สามารถแสดงถึงประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปลถารที่ดีขึ้นเช่นกัน

จากผลการทดสอบที่ตรงข้ามกับสมมติฐานของงานวิจัยนี้และให้ผลการทดสอบที่ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยจากต่างประเทศที่ได้พบทวนไว้ ดังนั้นอาจจะไม่สามารถยืนยันอย่างแน่ชัดได้ว่าผลการทดสอบดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือมากนักเพียงใด เนื่องจากข้อจำกัดในการเตรียมตัวอย่าง

สำหรับการทดสอบที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบระบุไว้ โดยการที่ไม่สามารถตัดส่วนหัวและท้ายของตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้ผิวด้านหัวและท้ายของตัวอย่างไม่เรียบเป็นระนาบร่วมกับตัวอย่างเกิดการบวมตัว ทำให้ตัวอย่างรับแรงไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดตัวอย่างโดยสังเกตได้จากภายหลังการวิบัติของตัวอย่างที่มีการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันตลอดหน้าตัด ดังแสดงในภาพที่ 4.16 ซึ่งส่งผลต่อการวัดค่าการทรุดตัวของตัวอย่างที่คลาดเคลื่อน ค่า Strain rate ที่ใช้ในการพิจารณา Flow Number จึงคลาดเคลื่อนไปด้วย ในขณะที่การไม่ได้เจาะตัวอย่างเพื่อนำแกนกลางมาทดสอบ ส่งผลให้ตัวอย่างมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้น เมื่อดำเนินการทดสอบจุดที่มีความหนาแน่นน้อยหรือบดอัดแล้วเกิดโพรงที่ผิวข้างจะเกิดการวิบัติก่อน ดังภาพที่ 4.17 การทรุดตัวที่เกิดขึ้นจึงไม่เท่ากันส่งผลให้การพิจารณา Flow Number คลาดเคลื่อนเช่นกัน



ภาพที่ 4.16 การวิบัติของตัวอย่างที่ไม่ได้ระนาบจากการทดสอบ Dynamic Creep



ภาพที่ 4.17 การวิบัติจากความหนาแน่นที่ไม่สม่ำเสมอของตัวอย่าง

4.5 การทดสอบการต้านทานการเสีรูปลถวรของแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยการทดสอบ Wheel Tracking

การทดสอบการต้านทานการเสีรูปลถวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ด้วยการทดสอบแบบ Wheel Tracking เป็นรูปแบบการทดสอบอีกรูปแบบหนึ่ง ที่จำลองลักษณะการวิบัติของตัวอย่างได้ใกล้เคียงกับรูปแบบการเกิดความเสียหายจริงในสนามได้มากขึ้น โดยมีลักษณะการทดสอบ คือให้แรงกระทำซ้ำแก่ตัวอย่างผ่านทางล้อที่วิ่งผ่านบนแผ่นตัวอย่าง โดยมีน้ำหนักถ่วงเพื่อสร้างแรงกดจากล้อลงสู่ผิวแผ่นตัวอย่าง จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติในลักษณะของการยุบตัวเป็นแนวตามร่องล้อจากล้อที่วิ่งผ่านเข้าไปมาบนตัวอย่าง โดยตัวอย่างสำหรับการทดสอบรูปแบบนี้สามารถเตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการหรือเจาะเก็บตัวอย่างจากสนามเพื่อนำมาทดสอบได้เช่นกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ การเตรียมตัวอย่างเพื่อดำเนินการทดสอบจะเป็นการเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ โดยการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ แล้วบดอัดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องบดอัดแบบ Roller Compactor ตามมาตรฐาน BS EN 12697-33:2003 Specimen prepared by roller compactor ดังภาพที่ 4.18 ซึ่งเงื่อนไขในเตรียมตัวอย่าง คือผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและบดอัดเป็นตัวอย่างแบบแผ่นสี่เหลี่ยม ขนาด $30.5 \times 30.5 \times 5$ cm โดยบดอัดให้ได้ความหนาแน่นที่คำนวณเป็นร้อยละช่องว่างอากาศ (% Air Void) อยู่ที่ 7%

สำหรับรูปแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับการทดสอบนี้ ในขั้นตอนการออกแบบการทดสอบ กำหนดให้ทดสอบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละทั้งสองรูปแบบ ด้วยรูปแบบส่วนผสมที่ไม่ผสมยางบด และรูปแบบส่วนผสมที่ผสมยางบดที่มีประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปลถวรที่ดีที่สุด จากผลการทดสอบระยะที่ 1 (Dynamic Creep) เนื่องจากการทดสอบ Wheel Tracking เป็นการทดสอบที่ใช้ระยะเวลาในการทดสอบมากและมีความซับซ้อนในการเตรียมตัวอย่างสูง แต่จากผลการทดสอบระยะที่ 1 ไม่สามารถระบุได้ว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบใดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ดังที่กล่าวในรายละเอียดไว้ข้างต้น

ดังนั้น จึงปรับเปลี่ยนแผนการดำเนินงานทดสอบ โดยการทดสอบ Wheel Tracking จะทดสอบกับแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งสิ้น 7 รูปแบบส่วนผสม ต่อขนาดคละ 1 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ส่วนผสมที่เป็นหินปูนทั้งหมด เพื่อเป็นส่วนผสมอ้างอิงเปรียบเทียบ เท่ากับ 1 รูปแบบส่วนผสม
- ส่วนผสมที่ผสมยางบด โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยด้านขนาดยางบด 3 ขนาด (ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16, 30 และผ่านตะแกรงเบอร์ 30) ขนาดละ 2 ปริมาณยางบด (1% และ 2% โดยปริมาตรของมวลรวมทั้งหมด) คิดเป็น $3 \times 2 = 6$ รูปแบบส่วนผสม

อ้างอิงหลักการในการคำนวณน้ำหนักส่วนผสมที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded การบดอัดตัวอย่างแบบแผ่นสี่เหลี่ยม ขนาด $30.5 \times 30.5 \times 5$ cm โดยบดอัดให้มีช่องว่างอากาศ 7% ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded ที่มี

ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 5.4% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด โดยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดตามทฤษฎี (Gmm) อยู่ที่ 2.496 g/cm^3 ดังนั้นเมื่อคำนวณย้อนกลับ ความหนาแน่นของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว (Gmb) มีค่าเท่ากับ 2.321 g/cm^3 เมื่อคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตร สำหรับตัวอย่างแบบแผ่นขนาด $30.5 \times 30.5 \times 5 \text{ cm}$ มีปริมาตรของตัวอย่างโดยรวม 4651.3 cm^3 จากค่า Gmb สามารถคำนวณน้ำหนักวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้ 10795.5 g และใช้ค่าสัดส่วนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด คำนวณย้อนกลับได้เป็นน้ำหนักมวลรวม 10212.5 g และน้ำหนักแอสฟัลต์ 583.0 g จากหลักการคำนวณทำให้ได้รายละเอียดของมวลรวมสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.19

และอ้างอิงด้วยหลักการในการคำนวณน้ำหนักส่วนผสมเดียวกันในหัวข้อ 4.2 สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded การบดอัดตัวอย่างแบบแผ่นสี่เหลี่ยม ขนาด $30.5 \times 30.5 \times 5 \text{ cm}$ โดยบดอัดให้มีช่องว่างอากาศ 7% ด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded ที่มีปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 6.0% ของน้ำหนักมวลรวมทั้งหมด โดยวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีค่าความหนาแน่นสูงสุดตามทฤษฎี (Gmm) อยู่ที่ 2.473 g/cm^3 ดังนั้นเมื่อคำนวณย้อนกลับ ความหนาแน่นของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดอัดแล้ว (Gmb) มีค่าเท่ากับ 2.300 g/cm^3 เมื่อคำนวณโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตร สำหรับตัวอย่างแบบแผ่นขนาด $30.5 \times 30.5 \times 5 \text{ cm}$ มีปริมาตรของตัวอย่างโดยรวม 4651.3 cm^3 จากค่า Gmb สามารถคำนวณน้ำหนักวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้ 10697.4 g และใช้ค่าสัดส่วนแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่สุด คำนวณย้อนกลับได้เป็นน้ำหนักมวลรวม 10055.5 g และน้ำหนักแอสฟัลต์ 641.8 g จากหลักการคำนวณทำให้ได้รายละเอียดของมวลรวมสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.19 รายละเอียดด้านน้ำหนักและปริมาตรรวมสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded รูปแบบส่วนผสมต่างๆ เพื่ออัด
เป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Wheel Tracking

ตะแกรง	ปริมาตร รวม (cm ³)	น้ำหนักมวลรวม (g)											
		ความกว้างเฉพาะยางบด = 1.105											
		ส่วนผสมที่มียางบดค้ำบดตะแกรง #16		ส่วนผสมที่มียางบดค้ำบดตะแกรง #30		ส่วนผสมที่มียางบดผ่านตะแกรง #30		ส่วนผสมที่มียางบดผ่านตะแกรง #30		ส่วนผสมที่มียางบดผ่านตะแกรง #30		ส่วนผสมที่มียางบดผ่านตะแกรง #30	
หินปูน ล้วน (Control)	1% โดยปริมาตร = 37.90 cm3	2% โดยปริมาตร = 75.79 cm3	1% โดยปริมาตร = 37.90 cm3	2% โดยปริมาตร = 75.79 cm3	1% โดยปริมาตร = 37.90 cm3	2% โดยปริมาตร = 75.79 cm3	1% โดยปริมาตร = 37.90 cm3	2% โดยปริมาตร = 75.79 cm3	1% โดยปริมาตร = 37.90 cm3	2% โดยปริมาตร = 75.79 cm3	1% โดยปริมาตร = 37.90 cm3	2% โดยปริมาตร = 75.79 cm3	
	หินปูน	ยางบด	หินปูน	ยางบด	หินปูน	ยางบด	หินปูน	ยางบด	หินปูน	ยางบด	หินปูน	ยางบด	
3/4 in	175.07	473.4		473.4		473.4		473.4		473.4		473.4	
1/2 in	942.24	2553.5		2553.5		2553.5		2553.5		2553.5		2553.5	
3/8 in	508.38	1376.2		1376.2		1376.2		1376.2		1376.2		1376.2	
# 4	711.17	1928.7		1928.7		1928.7		1928.7		1928.7		1928.7	
# 8	514.88	1400.5		1400.5		1400.5		1400.5		1400.5		1400.5	
# 16	268.39	718.7	41.9	515.8	83.8	718.7		718.7		718.7		718.7	
# 30	203.82	536.0		536.0		436.4	41.9	336.7	83.8	536.0		536.0	
# 50	156.75	408.5		408.5		408.5		408.5		375.3		342.0	
# 100	96.86	255.3		255.3		255.3		255.3		234.5		213.8	
# 200	56.90	153.2		153.2		153.2		153.2		140.7	41.9	128.3	
Pan	155.26	408.5		408.5		408.5		408.5		375.3		342.0	
รวม	3789.73	10212.5	41.9	10009.5	83.8	10112.8	41.9	10013.2	83.8	10112.8	41.9	10013.1	
												83.8	



ภาพที่ 4.18 เครื่องบดอัดวัสดุแบบ Roller Compactor สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

หลังจากเตรียมตัวอย่างแล้วเสร็จ ดำเนินการทดสอบ Wheel Tracking ด้วยเครื่องมือแบบ Small size model B testing in air ตามมาตรฐาน BS EN 12697-22:2003 Wheel tracking ดังภาพที่ 4.19 โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบ คือ

- ทดสอบกับตัวอย่างที่บดอัดด้วยความหนาแน่นที่มีช่องว่างอากาศ (% Air Void) เท่ากับ 7%
- ทดสอบที่อุณหภูมิ 50 °C
- แรงกระทำของล้อต่อชิ้นงาน 700 N
- ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปกลับของล้อ 26.5 รอบต่อนาที
- ทดสอบจำนวน 20,000 รอบการวิ่งผ่านของล้อ



ภาพที่ 4.19 เครื่องทดสอบ Wheel Tracking สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

สำหรับขั้นตอนการทดสอบ Wheel Tracking มีขั้นตอนการทดสอบโดยสรุป คือ

- ปรับอุณหภูมิของตัวอย่างให้เท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ เป็นเวลา 4 – 24 ชั่วโมง สำหรับการทดสอบนี้ ทำการปรับอุณหภูมิของตัวอย่างที่ 50 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนเริ่มการทดสอบ
- ติดตั้งตัวอย่าง(พร้อมแบบ) เข้าเครื่องทดสอบที่ตั้งอุณหภูมิในห้องทดสอบไว้ที่ 50 °C ปรับตั้งชุดล้อ ติดตั้งน้ำหนักถ่วงที่สร้างแรงกดจากล้อสู่ตัวอย่าง ปรับตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวของตัวอย่างตามแนวเคลื่อนที่ของล้อ (LVDT) และปรับตั้งความเร็วการเคลื่อนที่ของล้อ
- เริ่มการทดสอบ โดยวัดค่าการยุบตัวของตัวอย่างตลอดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของล้อ ทุก 50 รอบ การเคลื่อนผ่านของล้อ ซึ่งการทดสอบทั้งหมดจะส่งงานและบันทึกข้อมูลโดยอัตโนมัติด้วยระบบคอมพิวเตอร์ทั้งหมด
- หลังจากครบ 20,000 รอบ เครื่องจะหยุดการทำงานโดยอัตโนมัติ นำข้อมูลการยุบตัวที่คอมพิวเตอร์บันทึกไว้ ไปวิเคราะห์หาค่า Wheel Tracking Slope (WTS) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอ้างอิงประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปลถาวรของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยคำนวณจาก

$$WTS = \frac{D_{20000} - D_{10000}}{10} \quad \text{mm/1000 pass cycles}$$

โดยที่ WTS = Wheel Tracking Slope ในหน่วย mm/ 1000 pass cycles

D_{20000} = ค่าการยุบตัวในแนวร่องล้อของตัวอย่างที่ 20000 รอบ

D_{10000} = ค่าการยุบตัวในแนวร่องล้อของตัวอย่างที่ 10000 รอบ

แอสฟัลต์คอนกรีตที่ให้ผลการทดสอบเป็นค่า WTS ที่มีค่าต่ำ หมายถึงแอสฟัลต์คอนกรีตมีความสามารถในการต้านทานการเสีรูปลถาวรได้ดี โดยรูปแบบส่วนผสมที่มีค่า WTS ต่ำจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบส่วนผสมที่มีค่า WTS สูง นั่นหมายถึง ส่วนผสมที่มีค่า WTS ต่ำจะใช้รอบการทดสอบที่นานกว่า ระยะเวลาที่ส่วนผสมที่มีค่า WTS สูงใช้ในการทดสอบจนเกิดความลึกร่องล้อที่ระดับเดียวกัน

หลังจากการทดสอบแล้วเสร็จ ตัวอย่างจะวัดจากการยุบตัวเป็นร่องตามแนวที่ล้อเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งมีลักษณะโดยทั่วไปดังภาพที่ 4.20

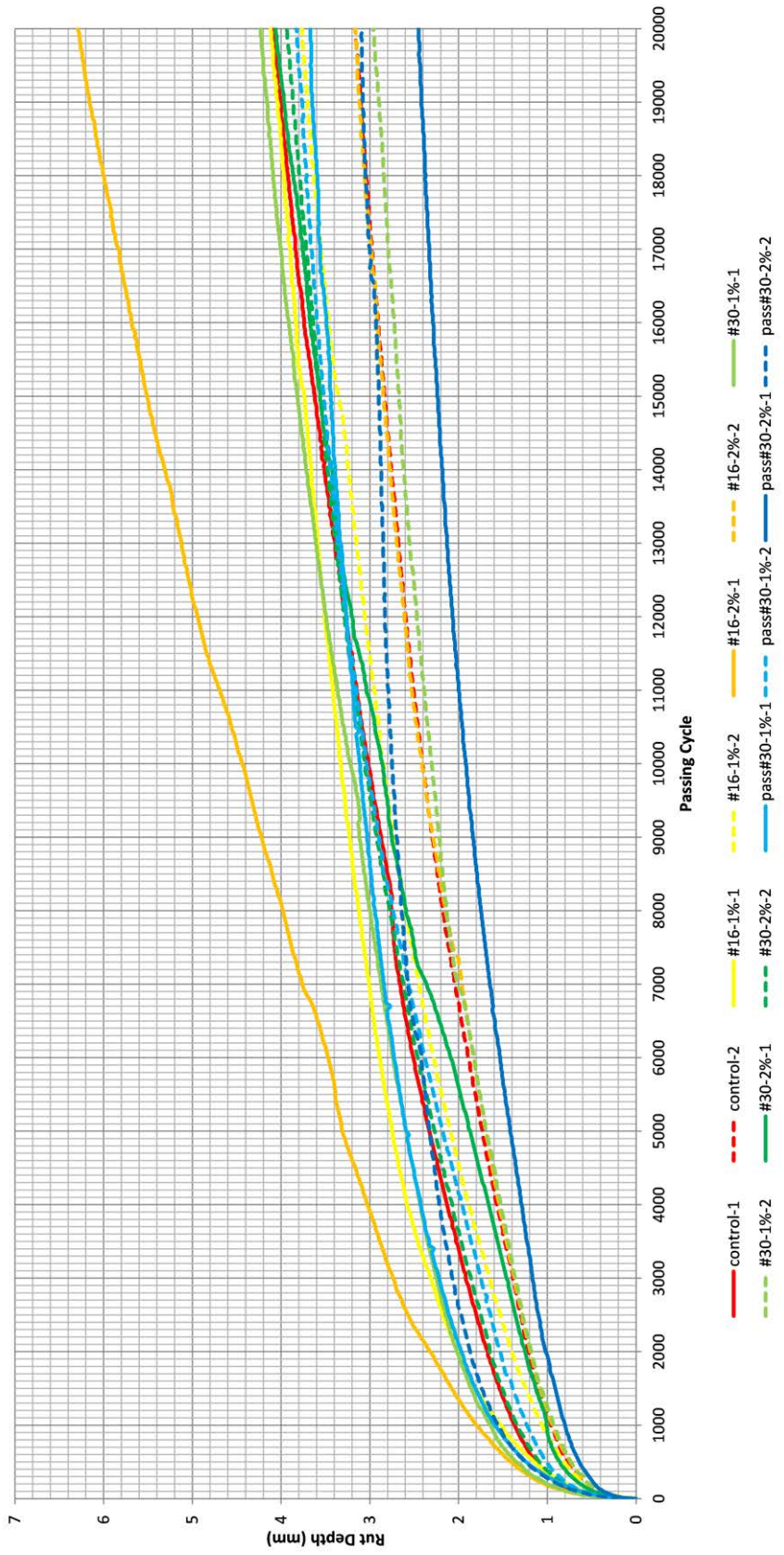


ภาพที่ 4.20 ตัวอย่างแบบแผ่น หลังจากการทดสอบด้วยเครื่อง Wheel Tracking

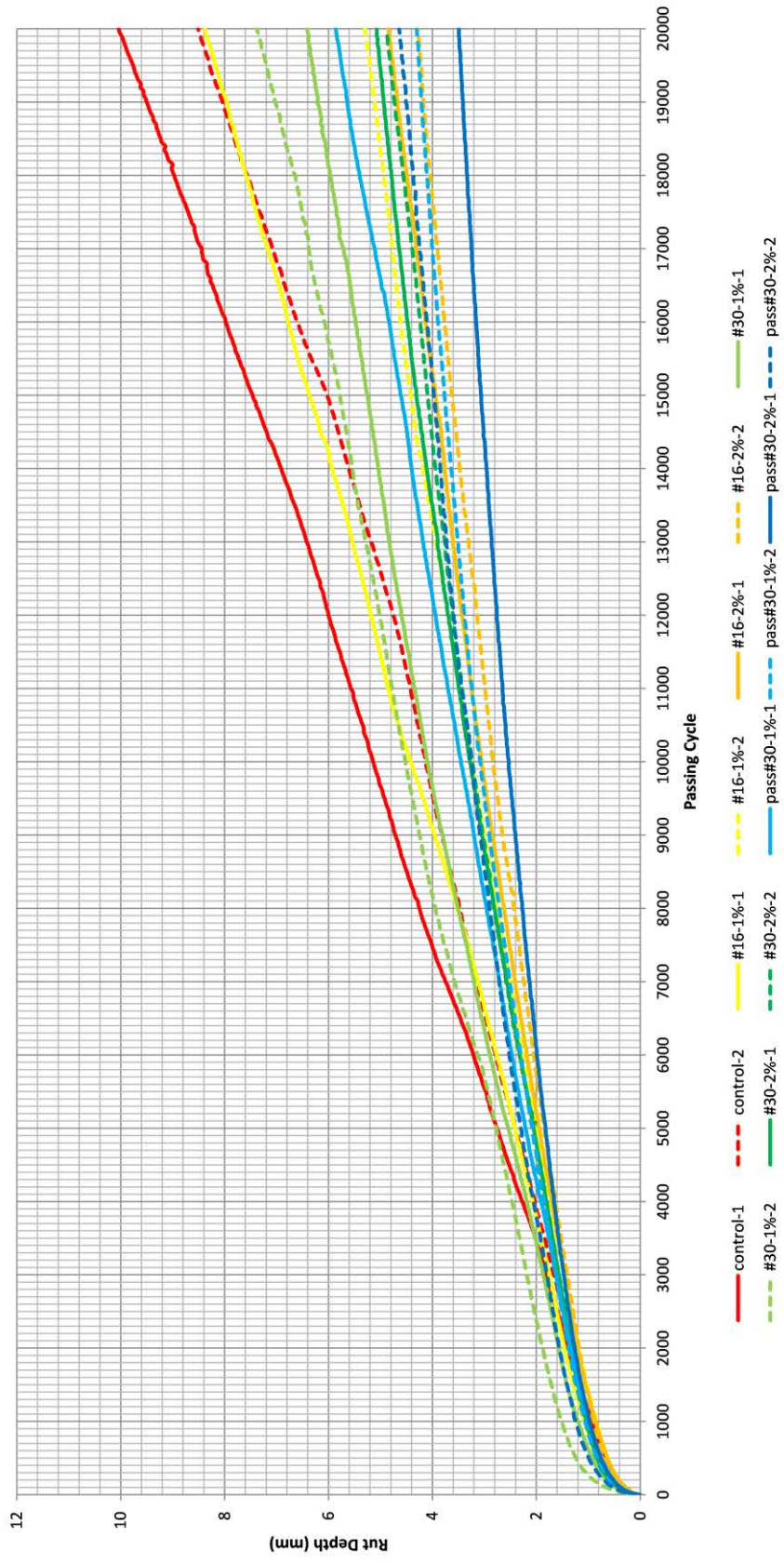
โดยความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและรอบการทดสอบตลอดระยะเวลาการทดสอบ สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded แสดงดังภาพที่ 4.21 และสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded แสดงดังภาพที่ 4.22

หากพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและรอบการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบส่วนผสมเดียวกัน จะพบว่าการทดสอบตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 2 สำหรับรูปแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตบางรูปแบบมีความไม่สม่ำเสมอของการทดสอบ (การทดสอบมี Repeatability ต่ำ) อันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น ประสบการณ์ในการดำเนินการทดสอบของผู้วิจัยที่ไม่สามารถเตรียมตัวอย่างทดสอบให้มีความสม่ำเสมอ มวลรวมแต่ละขนาดจึงไม่สามารถกระจายตัวตลอดตัวอย่างทดสอบได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ หรือการจัดเรียงตัวของมวลรวมที่เป็นหินปูนขนาดใหญ่จับตัวกันอยู่ในส่วนใดส่วนหนึ่งของตัวอย่างทดสอบ หากมวลรวมขนาดใหญ่จับตัวกันในบริเวณที่ล้อวิ่งผ่าน ค่าการยุบตัวตามแนวร่องล้อของตัวอย่างจะน้อยกว่าที่ควรจะเป็น หรือในทางตรงกันข้าม หากมวลรวมขนาดใหญ่เกาะกลุ่มกันนอกบริเวณที่ล้อวิ่งผ่าน ค่าการยุบตัวตามแนวร่องล้อจะสูงกว่าที่ควรจะเป็นเช่นกัน ส่งผลให้ผลการทดสอบไม่สม่ำเสมอจากการทดสอบกับตัวอย่าง 2 ชั้นที่ผลิตจากแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบส่วนผสมเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม มาตรฐานการทดสอบ BS-EN 12697-22:2003 หรือมาตรฐานการทดสอบอื่นๆที่มีลักษณะการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน เช่น AG:PT/T231 Deformation resistance of asphalt mixtures by the wheel tracking test ของประเทศออสเตรเลีย ไม่ได้ระบุถึงระดับของความแตกต่างของผลการทดสอบที่ยอมรับได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดเกณฑ์เพื่อพิจารณาความสม่ำเสมอของผลการทดสอบ โดยพิจารณาจากค่าสัดส่วนการยุบตัว (Proportional Rut Depth) ซึ่งหมายถึง สัดส่วนระหว่างการยุบตัวของตัวอย่างหลังการทดสอบเทียบกับความหนาของตัวอย่าง โดยกำหนดเกณฑ์ว่า หาก Proportional Rut Depth ของตัวอย่างรูปแบบส่วนผสมเดียวกัน 2 ชั้น ต้องมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 2 เท่า จะยอมรับผลการทดสอบ ซึ่งสาเหตุที่กำหนดอัตราส่วนความแตกต่างไว้สูงมาก เพื่อให้ครอบคลุมความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว



ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกการล้อและรอบการทดสอบ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและรอบการทดสอบ ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded

เมื่อพิจารณาแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและรอบการทดสอบ สามารถคำนวณค่า Wheel Tracking Slope ได้ โดยค่าความลึกร่องล้อหลังสิ้นสุดการทดสอบและค่า Wheel Tracking Slope จากการทดสอบ Wheel Tracking แสดงดังตารางที่ 4.21 และผลการพิจารณาการยอมรับผลการทดสอบด้วยเกณฑ์จากการเปรียบเทียบค่า Proportional Rut Depth แสดงดังตารางที่ 4.22

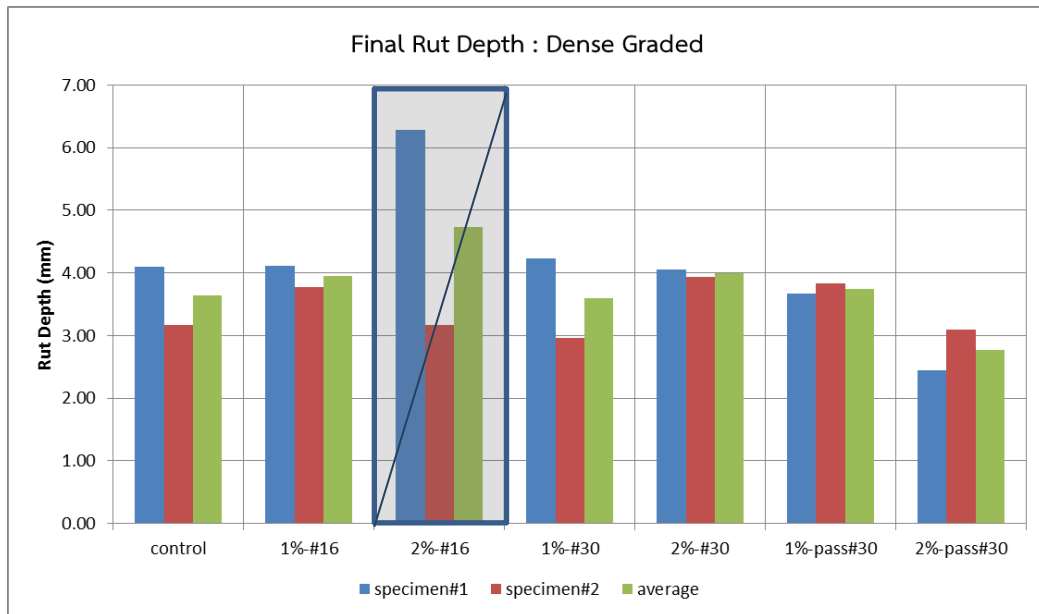
ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบ wheel tracking ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded

รูปแบบส่วนผสม	ความลึกร่องล้อหลังการทดสอบ (mm)			WTS (mm/1000 pass cycle)		
	#1	#2	เฉลี่ย	#1	#2	เฉลี่ย
control	4.10	3.17	3.63	0.11	0.08	0.09
1%-#16	4.12	3.77	3.94	0.08	0.09	0.09
2%-#16	6.29	3.16	4.73	0.18	0.08	0.13
1%-#30	4.23	2.96	3.59	0.10	0.07	0.08
2%-#30	4.06	3.94	4.00	0.12	0.09	0.10
1%-pass#30	3.67	3.83	3.75	0.06	0.08	0.07
2%-pass#30	2.45	3.10	2.77	0.05	0.03	0.04

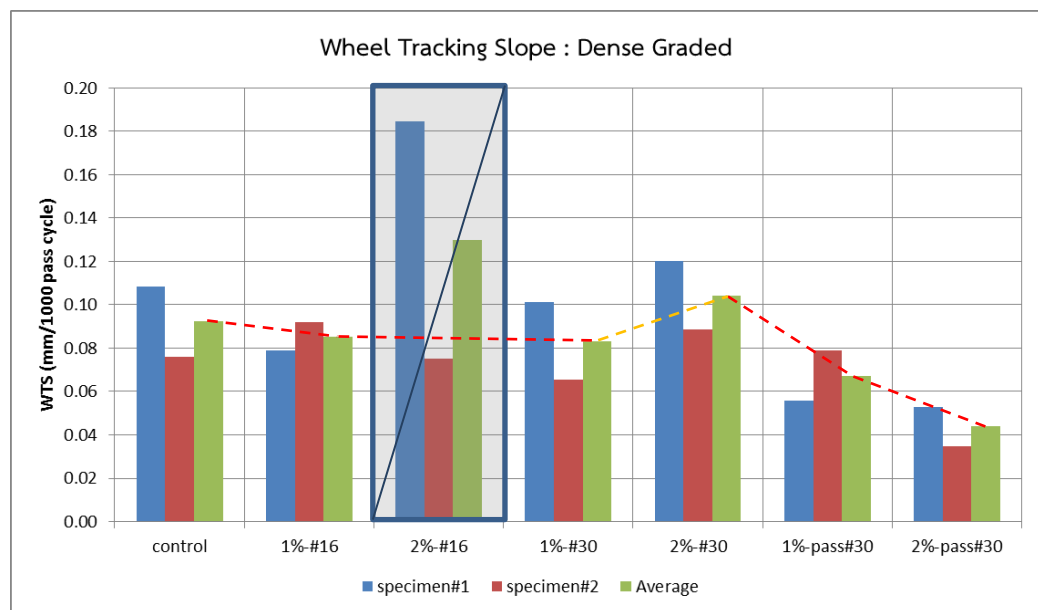
ตารางที่ 4.22 ผลการพิจารณาการยอมรับผลการทดสอบ wheel tracking จากค่า Proportional Rut Depth ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Dense Graded

รูปแบบส่วนผสม	สัดส่วนการยุบตัว (Proportional Rut Depth) (%)			อัตราส่วนค่าความแตกต่าง	ผลการพิจารณา
	#1	#2	เฉลี่ย		
control	8.1	6.3	7.2	1.3	ยอมรับ
1%-#16	8.1	7.4	7.8	1.1	ยอมรับ
2%-#16	12.4	6.2	9.3	2.0	ไม่ยอมรับ
1%-#30	8.3	5.8	7.1	1.4	ยอมรับ
2%-#30	8.0	7.8	7.9	1.0	ยอมรับ
1%-pass#30	7.2	7.5	7.4	1.0	ยอมรับ
2%-pass#30	4.8	6.1	5.5	1.3	ยอมรับ

จากตารางที่ 4.22 พบว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดขนาดค้ำงบนตะแกรงเบอร์ 16 ในปริมาณ 2% โดยปริมาตรรวม มีผลการทดสอบที่แตกต่างกันมากเกินไป จึงไม่นำรูปแบบส่วนผสมดังกล่าวไปร่วมวิเคราะห์ในส่วนต่อไป



ภาพที่ 4.23 ความลึกร่องล้อหลังการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded

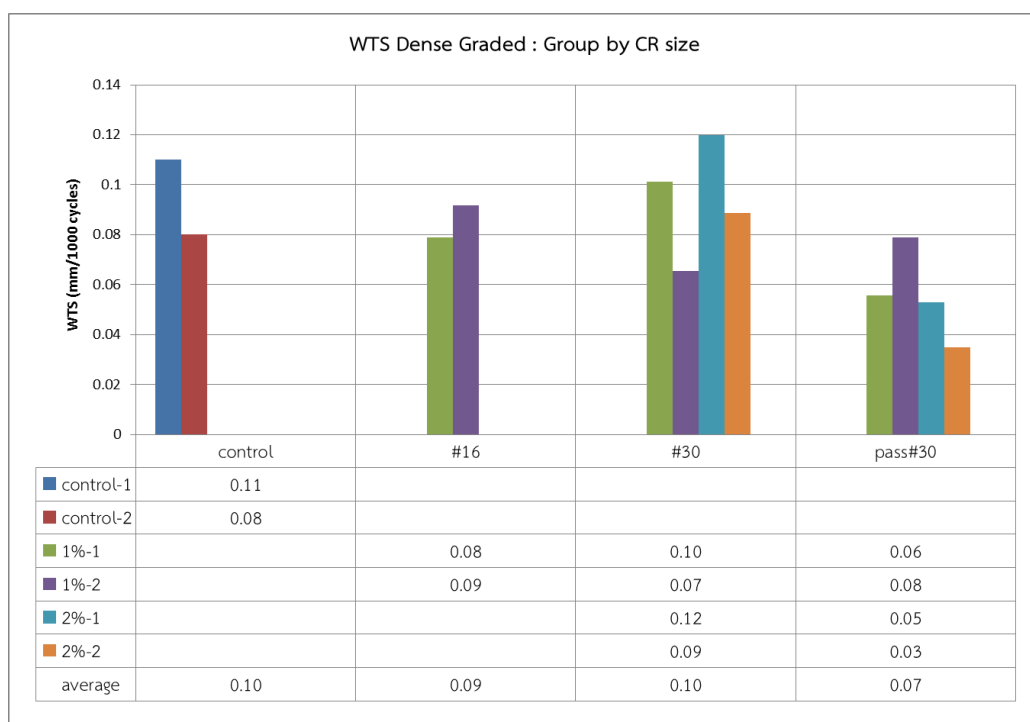


ภาพที่ 4.24 ค่า Wheel Tracking Slope ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่า Wheel Tracking Slope โดยตัดแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ปริมาณ 2% โดยปริมาตรมวลรวมออก ดังแสดงในภาพที่ 4.24 เส้นประสีแดงแสดงถึงค่า WTS ที่ลดลงซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรที่ดีขึ้น ในขณะที่เส้นประสีเหลืองแสดงถึงค่า WTS ที่เพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรที่ลดลง ซึ่งหากมองโดยภาพรวมแล้วการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะเพิ่มประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรได้จริง โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเกือบทุกรูปแบบจะมีค่า WTS ที่ต่ำกว่าส่วนผสมรูปแบบที่ไม่ผสมยางบดทั้งหมด (ยกเว้นรูปแบบที่ผสมยางบด

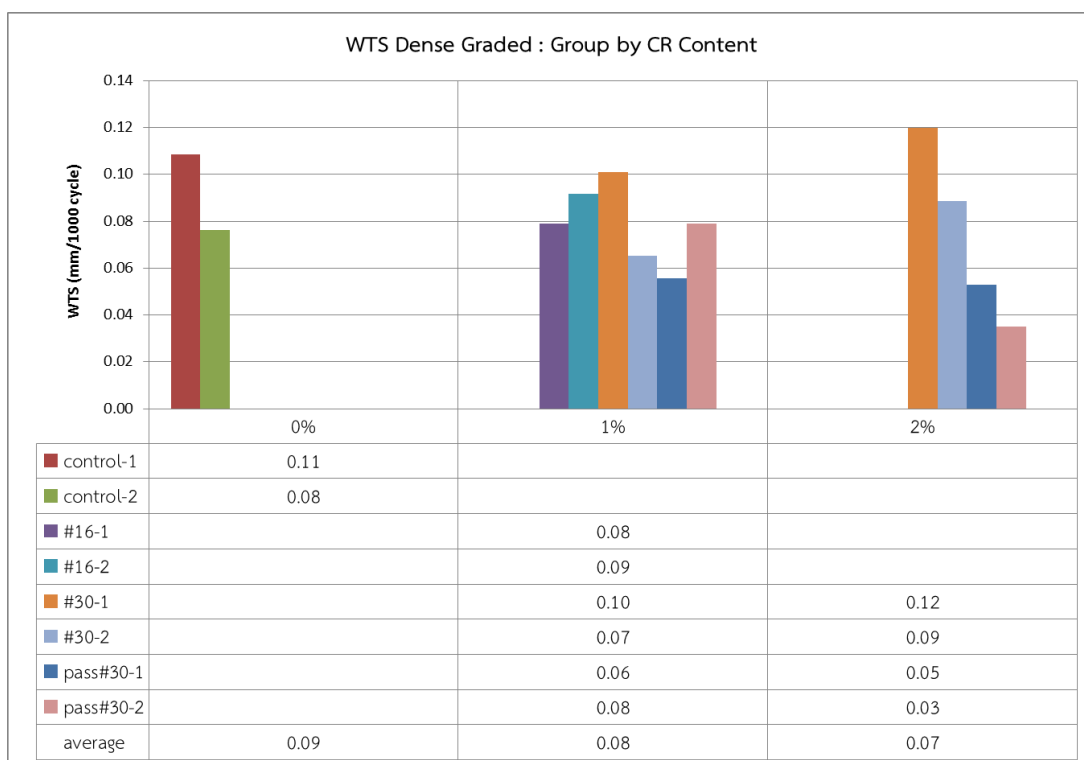
ขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 ปริมาณ 2% ซึ่งอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบ) โดยรูปแบบส่วนผสมที่ไม่ผสมยางบดซึ่งเป็นฐานสำหรับเปรียบเทียบ มีค่า WTS เท่ากับ 0.09 mm/1000 pass cycles ซึ่งส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีค่า WTS ต่ำที่สุด คือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรรวม ซึ่งมีค่า WTS อยู่ที่ 0.04 mm/1000 pass cycles

หากพิจารณาผลลึกรายละเอียดมากขึ้นโดยสนใจศึกษาเฉพาะประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากปัจจัยด้านขนาดของยางบดเท่านั้น จากการนำผลการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ ยกเว้นรูปแบบที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 ปริมาณ 2% ที่ไม่ยอมรับผลการทดสอบ มาจัดกลุ่มใหม่ตามขนาดยางบด ซึ่งจัดกลุ่มได้เป็น 4 กลุ่ม ดังภาพที่ 4.25 และคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า WTS ในแต่ละกลุ่ม พบว่าขนาดของยางบดที่เล็กลงจะส่งผลให้ค่า WTS ลดลง (ประสิทธิภาพดีขึ้น) จากส่วนผสมรูปแบบอ้างอิงทั้งหมด โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตปกติที่เป็นรูปแบบอ้างอิง 1.11 เท่า ขณะที่ส่วนผสมกลุ่มที่ผสมด้วยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบอ้างอิง 1.71 เท่า แต่การผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 ในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า WTS น้อยมาก ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพดีกว่ารูปแบบอ้างอิง 1.01 เท่า หรือเกือบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง หากมองโดยภาพรวมโดยไม่นำส่วนผสมที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 แล้ว อาจกล่าวได้ว่าขนาดยางบดที่เล็กลง ส่งผลให้ค่า WTS ดีขึ้น



ภาพที่ 4.25 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามขนาดยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded

สำหรับปัจจัยด้านปริมาณของยางบดที่ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อนำข้อมูลชุดเดียวกับการพิจารณาปัจจัยด้านขนาดยางบดมาจัดกลุ่มใหม่ โดยแบ่งตามปริมาณยางบดที่ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจัดกลุ่มได้ทั้งหมด 3 กลุ่มและคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า WTS ในแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 4.26 พบว่าปริมาณยางบดที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปถาวรได้ โดยพิจารณาจากค่า WTS โดยเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มที่ลดลงจากกลุ่มที่เป็นแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ผสมยางบด ซึ่งเป็นรูปแบบอ้างอิง สำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดปริมาณ 1% โดยปริมาตรมวลรวม จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบอ้างอิง 1.17 เท่า และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ผสมยางบด 2% โดยปริมาตรมวลรวม จะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่ากลุ่มที่ผสมยางบด 2% เมื่อเทียบกับส่วนผสมรูปแบบอ้างอิง โดยประสิทธิภาพที่พิจารณาจากค่าเฉลี่ยของ WTS กลุ่มที่ผสมยางบด 2% จะมีประสิทธิภาพดีกว่ากลุ่มอ้างอิง 1.24 เท่า ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่ผสมยางบดปริมาณ 1% ที่ประสิทธิภาพสูงกว่าส่วนผสมกลุ่มอ้างอิง 1.17 เท่า



ภาพที่ 4.26 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามปริมาณยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded

กล่าวโดยสรุปคือ สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded การผสมยางบดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปถาวรได้จริง เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านขนาดยางบด ขนาดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 จะมีผลการทดสอบที่ดีที่สุด และพิจารณาที่ปัจจัยด้านปริมาณยางบด การผสมยางบดในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวม จะให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด จึงอาจกล่าวได้ว่า สำหรับขนาดละเอียดแบบ Dense Graded สำหรับงานวิจัยนี้ การผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรจะเป็นรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตด้านการ

ด้านทานการเสียรูปถาวรที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาที่ค่า WTS แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสมยางบด มีค่า WTS เฉลี่ยเท่ากับ 0.09 mm/1000 pass cycles ขณะที่ค่า WTS ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ปริมาณ 2% มีค่าเท่ากับ 0.04 mm/1000 pass cycles ซึ่งให้ผลการทดสอบที่ดีกว่า (ประสิทธิภาพการต้านทานการเสียรูปถาวรดีกว่า) ส่วนผสมกลุ่มอ้างอิง 2.10 เท่า

สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Gap Graded จากความสัมพันธ์ระหว่างความลึกร่องล้อและรอบการทดสอบ สามารถคำนวณค่า Wheel Tracking Slope ได้ โดยค่าความลึกร่องล้อหลังสิ้นสุดการทดสอบและค่า Wheel Tracking Slope จากการทดสอบ Wheel Tracking แสดงดังตารางที่ 4.23 และผลการพิจารณาการยอมรับผลการทดสอบด้วยเกณฑ์จากการเปรียบเทียบค่า Proportional Rut Depth แสดงดังตารางที่ 4.24

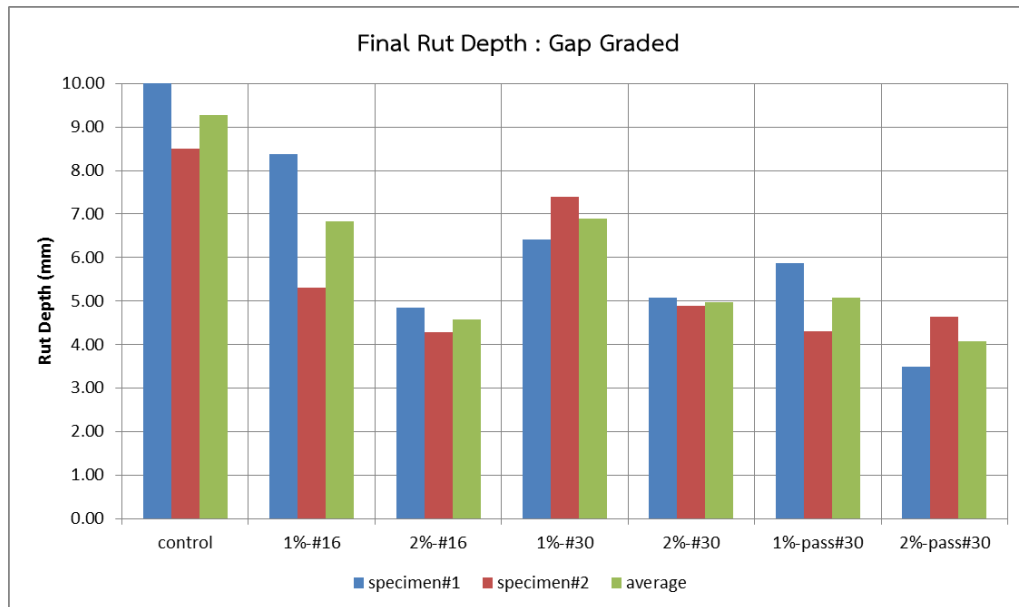
ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบ wheel tracking ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Gap Graded

รูปแบบส่วนผสม	ความลึกร่องล้อหลังการทดสอบ (mm)			WTS (mm/1000 pass cycle)		
	#1	#2	เฉลี่ย	#1	#2	เฉลี่ย
control	10.04	8.51	9.28	0.49	0.44	0.46
1%-#16	8.38	5.30	6.84	0.40	0.21	0.30
2%-#16	4.85	4.28	4.57	0.18	0.14	0.16
1%-#30	6.41	7.39	6.90	0.23	0.29	0.26
2%-#30	5.07	4.89	4.98	0.18	0.17	0.17
1%-pass#30	5.86	4.30	5.08	0.24	0.12	0.18
2%-pass#30	3.49	4.64	4.07	0.10	0.14	0.12

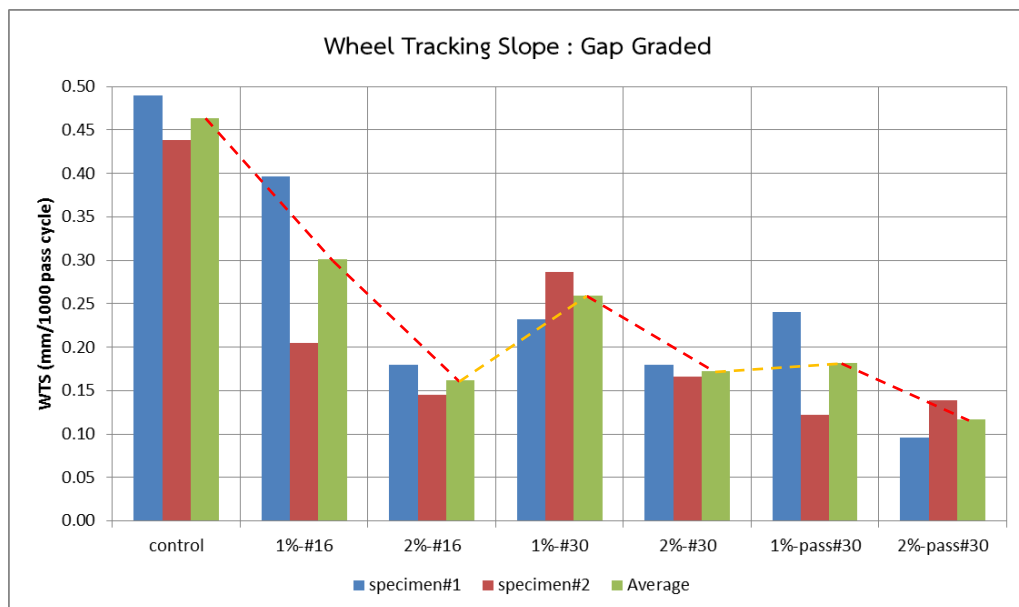
ตารางที่ 4.24 ผลการพิจารณาการยอมรับผลการทดสอบ wheel tracking จากค่า Proportional Rut Depth ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Gap Graded

รูปแบบส่วนผสม	สัดส่วนการยุบตัว (Proportional Rut Depth) (%)			อัตราส่วนความแตกต่าง	ผลการพิจารณา
	#1	#2	เฉลี่ย		
control	19.9	16.9	18.4	1.2	ยอมรับ
1%-#16	16.5	10.5	13.5	1.6	ยอมรับ
2%-#16	9.6	8.4	9.0	1.1	ยอมรับ
1%-#30	12.6	14.6	13.6	1.2	ยอมรับ
2%-#30	10.0	9.6	9.8	1.0	ยอมรับ
1%-pass#30	11.5	8.5	10.0	1.4	ยอมรับ
2%-pass#30	6.9	9.1	8.0	1.3	ยอมรับ

จากตารางที่ 4.24 พบว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded ทุกรูปแบบส่วนผสมผ่านเกณฑ์ ผลการทดสอบจึงยอมรับได้ สามารถนำผลการทดสอบใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบในขั้นตอนต่อไปได้ทั้งหมด



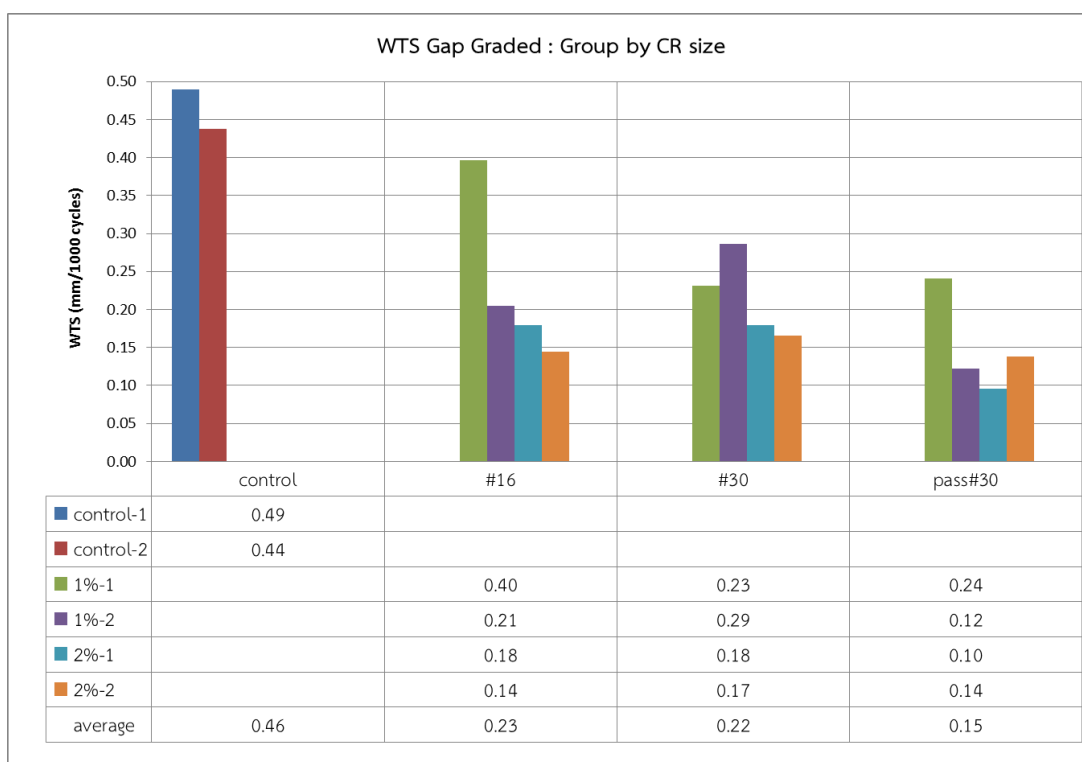
ภาพที่ 4.27 ความลึกร่องล้อหลังการทดสอบ ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded



ภาพที่ 4.28 ค่า Wheel Tracking Slope ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded

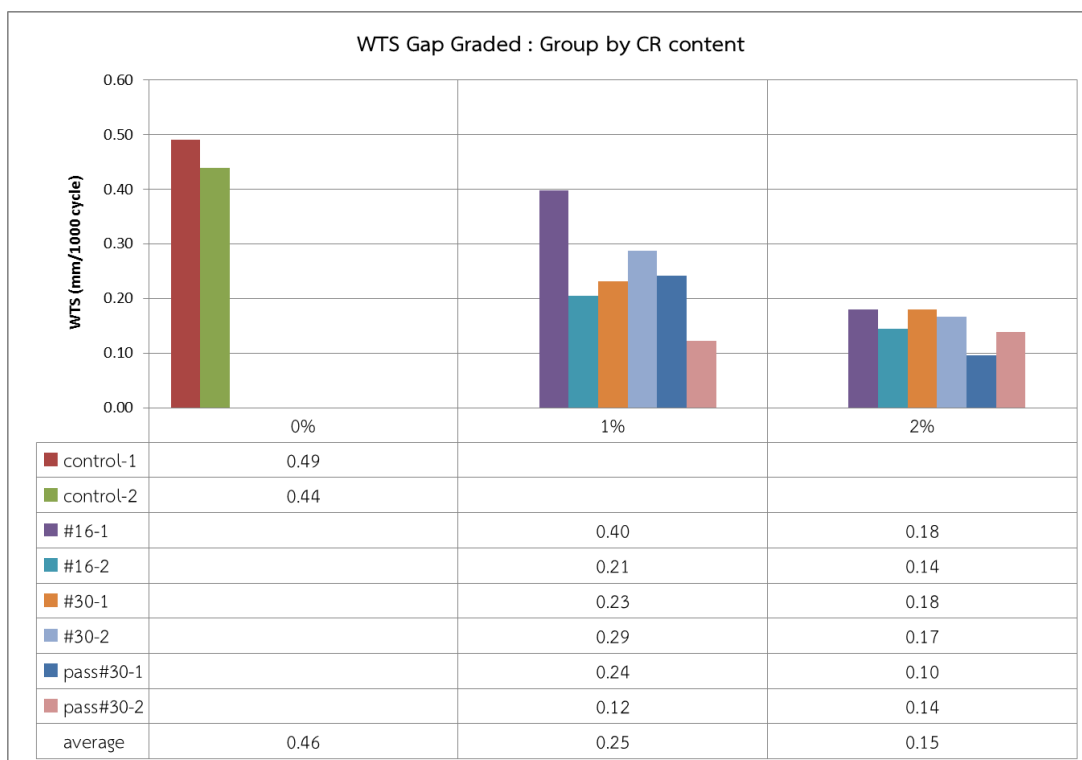
เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของค่า Wheel Tracking Slope ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดคละแบบ Gap Graded ดังแสดงในภาพที่ 4.28 เส้นประสีแดงแสดงถึงค่า WTS ที่ลดลงซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรที่ดีขึ้น ในขณะที่เส้นประสีเหลืองแสดงถึงค่า

WTS ที่เพิ่มขึ้นซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปร่างที่ลดลง ซึ่งหากมองโดยภาพรวมแล้วการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะเพิ่มประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปร่างได้จริง โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทุกรูปแบบจะมีค่า WTS ที่ต่ำกว่าส่วนผสมรูปแบบที่ไม่ผสมยางบดทั้งหมด โดยรูปแบบส่วนผสมที่ไม่ผสมยางบดซึ่งเป็นฐานสำหรับเปรียบเทียบ มีค่า WTS เท่ากับ 0.46 mm/1000 pass cycles และรูปแบบส่วนผสมที่มีค่า WTS ต่ำสุด คือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมด้วยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวม ซึ่งมีค่า WTS อยู่ที่ 0.12 mm/1000 pass cycles



ภาพที่ 4.29 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามขนาดยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded

หากพิจารณาในรายละเอียด โดยสนใจศึกษาเฉพาะประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปจากปัจจัยด้านขนาดของยางบดเท่านั้น จากการนำผลการทดสอบของแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ ไปจัดกลุ่มใหม่ตามขนาดของยางบดที่ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจัดกลุ่มได้เป็น 4 กลุ่ม ดังภาพที่ 4.29 และคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า WTS ในแต่ละกลุ่ม พบว่าขนาดของยางบดที่เล็กลงจะส่งผลให้ค่า WTS ลดลงตามไปด้วยอย่างชัดเจน โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ผสมยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 16 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตปกติที่เป็นรูปแบบอ้างอิง จากการพิจารณาค่า WTS ที่ 2.00 เท่า ขณะที่ส่วนผสมกลุ่มที่ผสมด้วยยางบดขนาดค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบอ้างอิง 2.15 เท่า และกลุ่มที่ผสมด้วยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบอ้างอิง 3.11 เท่า



ภาพที่ 4.30 ค่า WTS จากการจัดกลุ่มตามปริมาณยางบด ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded

เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณของยางบดที่ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อนำข้อมูลชุดเดียวกับการพิจารณาปัจจัยด้านขนาดยางบดมาจัดกลุ่มใหม่ โดยแบ่งตามปริมาณยางบดที่ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งจัดกลุ่มได้ทั้งหมด 3 กลุ่มและคำนวณค่าเฉลี่ยของค่า WTS ในแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 4.30 พบว่าปริมาณยางบดที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปถาวรได้ โดยพิจารณาจากค่า WTS โดยเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มที่ลดลงจากกลุ่มที่เป็นแอสฟัลต์คอนกรีตไม่ผสมยางบดซึ่งเป็นรูปแบบอ้างอิง โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดปริมาณ 1% โดยปริมาตรมวลรวม จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบอ้างอิง 1.88 เท่า และส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตกลุ่มที่ผสมยางบด 2% โดยปริมาตรมวลรวมจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารูปแบบอ้างอิง 3.08 เท่า

กล่าวโดยสรุปคือ สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded การผสมยางบดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปถาวรได้จริง โดยเมื่อพิจารณาปัจจัยด้านขนาดยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 จะมีผลการทดสอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณยางบด การผสมยางบดในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรมวลรวมจะให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด จึงอาจกล่าวได้ว่าสำหรับขนาดละเอียดแบบ Gap Graded สำหรับงานวิจัยนี้ การผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรจะเป็นรูปแบบการปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรที่ดีที่สุด เมื่อพิจารณาที่ค่า WTS แอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสมยางบด มีค่า WTS เฉลี่ยเท่ากับ 0.46 mm/1000 pass cycles ขณะที่ค่า WTS ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยาง

บดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ปริมาณ 2% มีค่าเท่ากับ 0.12 mm/1000 pass cycles ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรฐปลาวรรที่ติกว่าส่วนผสมกลุ่มอ้างอิง 3.95 เท่า

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยตามแผนการดำเนินงานที่ได้วางแผนไว้ หลังจากการดำเนินงานทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบแล้วเสร็จ สามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยออกเป็นเนื้อหา 2 หัวข้อหลักสำหรับงานวิจัยนี้ คือ การสรุปผลการวิจัยและการวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

5.1 การสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปลถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยศึกษาปัจจัยด้านขนาดของยางบดและปริมาณของยางบดที่ใช้ว่าจะส่งผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลงไป เริ่มต้นจากการทดสอบความเป็นไปได้ของงานวิจัยซึ่งช่วยในการกำหนดระดับปัจจัยต่างๆในงานทดสอบได้เป็นอย่างดี โดยงานวิจัยนี้สนใจแอสฟัลต์คอนกรีต 2 ขนาดคละ คือ ขนาดคละแบบ Dense Graded และขนาดคละแบบ Gap Graded ด้านปัจจัยของขนาดยางบดสนใจยางบด 3 ขนาด คือ ขนาดค้ำบดตะแกรงเบอร์ 16 ค้ำบดตะแกรงเบอร์ 30 และผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ซึ่งยางบดแต่ละขนาดให้ความสนใจปัจจัยด้านปริมาณยางบด 2 ระดับ คือ 1% และ 2% โดยปริมาตรของมวลรวม ผลการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปลถาวรของส่วนผสมที่มียางบดทุกรูปแบบจะเปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบที่ไม่ได้ผสมยางบด ของขนาดคละแบบนั้นๆที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการอ้างอิง

โดยหลักการในการผสมยางบดเข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต คือ ต้องการให้ยางบดทำหน้าที่เสมือนเป็นมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการผสมยางบดจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะของขนาดคละ เพื่อควบคุมผลการทดสอบที่ไม่สม่ำเสมอจากขนาดคละที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการศึกษาจะควบคุมให้สัดส่วนมวลรวมขนาดต่างๆโดยปริมาตรคงที่ในขนาดคละหนึ่งๆหรือกล่าวได้ว่าการเติมยางบดขนาดหนึ่งๆลงในส่วนผสมมวลรวมด้วยปริมาตรค่าหนึ่งต้องลดทอนหินปูนที่มีขนาดเดียวกับยางบดลงในปริมาตรที่เท่ากัน โดยทุกรูปแบบส่วนผสมในขนาดคละนั้นๆใช้ปริมาณแอสฟัลต์คอนกรีตที่คงที่เท่ากับค่าที่ดีที่สุดจากการออกแบบ Marshall Mix Design

งานด้านการทดสอบ เริ่มจากการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Marshall Mix Design ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ คือขนาดคละที่เลือกใช้และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมที่สุด หลังจากนั้นพิจารณาหารูปแบบการผสมยางบดเข้ากับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ดีที่สุด โดยผลการทดสอบพบว่าการเติมยางบดโดยตรงในขั้นตอนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นรูปแบบการเติมยางบดที่เหมาะสมมากกว่าการเติมยางบดในขั้นตอนก่อนการบดอัด

หลังจากนั้นทดสอบประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไป จากการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ การทดสอบ Dynamic Creep และการทดสอบ Wheel Tracking แล้วเปรียบเทียบผลการทดสอบ

สำหรับการทดสอบ Dynamic Creep ผลการทดสอบไม่สามารถชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปร่างที่ดีขึ้นแต่อย่างใด จึงไม่สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปร่างด้วยการทดสอบ Dynamic Creep ที่มีเงื่อนไขในการทดสอบตามที่งานวิจัยนี้ใช้ได้

แต่อย่างไรก็ตามการทดสอบ Wheel Tracking สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปได้จากการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยยางบด หากมองโดยภาพรวมแล้วการปรับปรุงคุณภาพแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยการผสมยางบดจะเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปร่างได้จริง จากผลการทดสอบที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันสำหรับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละทั้งสองรูปแบบ

จากผลการดำเนินงานวิจัยและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ เมื่อพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยสามารถสรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

1. ยางบดมีศักยภาพในการนำมาผสมเป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปร่างได้จริง โดยจะเห็นได้จากการที่สามารถผสมยางบดในส่วนผสมแล้วสามารถบดอัดตัวอย่างและดำเนินการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ และจากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปร่างของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตดีขึ้นจริง นอกจากนั้นแล้วงานวิจัยนี้ยังพบว่าการเติมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA ยังสามารถลดการเกิด draindown ของแอสฟัลต์คอนกรีตได้เป็นอย่างดี จึงถือได้ว่าเป็นประโยชน์อีกรูปแบบหนึ่งของการผสมยางบดกับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA โดยยางบดจะทำให้แอสฟัลต์มีความหนืดมากขึ้นและลดการแยกตัวขณะการขนส่งจากโรงงานผลิตไปยังหน้างานได้ดี
2. ขั้นตอนการผสมยางบดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบด คือการเติมยางบดในระหว่างขั้นตอนการผสม โดยเติมเข้าสู่ห้องผสม (pugmill) โดยตรงขณะผสมแอสฟัลต์และมวลรวมที่เป็นหินปูนให้เข้ากัน จากเกณฑ์ในการพิจารณา คือ ความสะดวกในการปฏิบัติงานจริงและลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่บดอัดจากแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมยางบดในขั้นตอนก่อนการบดอัดมีความยุ่งยากในการดำเนินสูงกว่า อีกทั้งยางบดยังไม่ได้รับการผสมและกระจายตัวในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีเพียงพอ นอกจากนั้นแล้วอาจจะมีปัญหาเรื่องอุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ลดลงกว่ามาตรฐานขณะผสมยางบดเข้ากับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเสร็จแล้ว

3. สำหรับขนาดและปริมาณที่เหมาะสมของยางบดที่ผสมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรที่ดียิ่งขึ้นมากที่สุด โดยพิจารณาจากผลการทดสอบด้วยเครื่อง Wheel Tracking เพียงอย่างเดียวเท่านั้น เนื่องจากการทดสอบ Dynamic Creep ด้วยรูปแบบการดำเนินงานซึ่งรวมไปถึงขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบที่งานวิจัยนี้ใช้นั้น อาจจะไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ แต่จากผลการทดสอบด้วย wheel tracking เมื่อมองโดยภาพรวมนั้นการผสมเศษยางบดเข้ากับส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ส่งผลให้ประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสีรูปถาวรเปลี่ยนแปลงจากส่วนผสมรูปแบบปกติที่มวลรวมเป็นหินปูนทั้งหมดจริงและเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางดีขึ้น

สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากปัจจัยด้านขนาดยางบดที่ผสม การผสมยางบดขนาดเล็กในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพได้ดีกว่าการผสมด้วยยางบดขนาดใหญ่ โดยการผสมด้วยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 จะให้ผลการทดสอบที่ดีที่สุด ขณะที่แนวโน้มของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากปัจจัยด้านปริมาณยางบดที่ผสม การผสมยางบดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตดีขึ้นตามไปด้วย โดยการผสมยางบดในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรของมวลรวมจะมีผลการทดสอบที่ดีที่สุด ดังนั้นสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded สามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพการต้านทานการเสีรูปถาวรด้วยการผสมยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ปริมาณ 2% โดยปริมาตรจะมีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบส่วนผสมดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบทั่วไปที่เป็นเกณฑ์อ้างอิง 2.10 เท่า

สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Gap Graded จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ Wheel Tracking เช่นเดียวกันพบว่าแนวโน้มของผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดละเอียดแบบ Dense Graded คือ การผสมยางบดขนาดเล็กและผสมในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการต้านทานการเสีรูปถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตดีขึ้นด้วย จึงสรุปได้ว่าสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขนาดละเอียดแบบ Gap Graded การผสมด้วยยางบดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ในสัดส่วน 2% โดยปริมาตรจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบที่ไม่ผสมยางบดที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการอ้างอิง 3.95 เท่า

หากเปรียบเทียบให้เข้าใจได้ง่ายมากขึ้น จากเกณฑ์ในการจัดระดับของความเสียหายแบบร่องล้อของกรมทางหลวง ที่แบ่งระดับความรุนแรงไว้ 3 ระดับ คือ

- ระดับต่ำ ร่องล้อมีความลึกเฉลี่ย ระหว่าง 6 ถึง 12 มิลลิเมตร
- ระดับกลาง ร่องล้อมีความลึกเฉลี่ย ระหว่าง 12 ถึง 25 มิลลิเมตร
- ระดับสูง ร่องล้อมีความลึกเฉลี่ย มากกว่า 25 มิลลิเมตรขึ้นไป

โดยจะเห็นว่า ความเสียหายระดับสูงเกิดความเสียหายมากกว่าความเสียหายระดับกลาง 2 เท่า และมากกว่าความเสียหายระดับต่ำ 4 เท่า ในขณะที่ความเสียหายระดับกลางจะมีความเสียหายมากกว่าความเสียหายระดับต่ำ 2 เท่าเช่นกัน สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded รูปแบบของส่วนผสมที่เพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสียดตัวถาวรได้ดีที่สุดจะมีประสิทธิภาพดีกว่าส่วนผสมรูปแบบปกติ 2.10 เท่า ซึ่งเปรียบเทียบได้ว่าสามารถลดระดับความเสียหายของการเกิดร่องล้อลงได้ 1 ระดับ ขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded รูปแบบของส่วนผสมที่เพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานการเสียดตัวถาวรที่ดีที่สุดจะมีประสิทธิภาพดีกว่าส่วนผสมรูปแบบปกติ 3.95 เท่า ซึ่งเปรียบเทียบได้ว่าสามารถลดระดับความเสียหายของการเกิดร่องล้อลงได้ 2 ระดับ

5.2 การวิจารณ์ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพด้านการต้านทานการเสียดตัวถาวรของขนาดคละแบบ Gap หรือ SMA นั้นแย่กว่าขนาดคละแบบ Dense ในภาพรวม ซึ่งขัดแย้งกับจุดประสงค์ของการพัฒนา SMA ที่ต้องการให้มีความสามารถในการต้านทานการเกิดร่องล้อได้ดีกว่าส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามงานศึกษานี้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างขนาดคละได้ เนื่องมาจากการออกแบบส่วนผสม SMA สำหรับงานศึกษานี้ไม่ได้ใช้แอสฟัลต์แบบปรับปรุงคุณภาพด้วยโพลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงมากกว่าแอสฟัลต์โดยทั่วไปตามที่นิยมใช้ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ SMA ซึ่งเป็นข้อจำกัดในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองมีจุดประสงค์เพื่อต้องการควบคุมปัจจัยด้านคุณสมบัติของวัสดุให้เป็นประเภทเดียวกันเพื่อให้ผลการทดสอบสะท้อนถึงประสิทธิภาพของการแทนที่มวลรวมด้วยยางบดเท่านั้น ซึ่งข้อจำกัดนี้จึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาต่อยอดต่อไปในอนาคต

สำหรับผลการทดสอบ Wheel Tracking ของแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Dense Graded จะเห็นความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบของแต่ละรูปแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ไม่ชัดเจนและมีการเปลี่ยนแปลงของผลการทดสอบจากการผสมยางบดในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อเทียบกับส่วนผสมที่เป็นกลุ่มอ้างอิงหรือกลุ่มที่ไม่ผสมยางบดที่ไม่มากเท่ากับแอสฟัลต์คอนกรีตขนาดคละแบบ Gap Graded คาดว่ามีสาเหตุมาจากการทดสอบด้วย Wheel Tracking เป็นการทดสอบที่ควบคุมด้วยเวลาในการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างที่มีขนาดคละแบบ Dense Graded ทั้งหมดอยู่ในช่วงของการไหลชั้นที่ 2 ยังไม่ถึงจุดวิบัติจนกระทั่งหมดเวลาการทดสอบจึงเห็นความแตกต่างของผลการทดสอบที่ไม่เด่นชัดเท่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบ Gap Graded ที่แอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบ

ส่วนผสมบางแบบอยู่ในช่วงการไหลชั้นที่ 3 และส่วนผสมบางแบบอยู่ในการไหลชั้นที่ 2 จึงเห็นได้ถึง ความแตกต่างของการเติมยางบดในแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

โดยข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทดสอบมากขึ้น และสามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการศึกษาได้ดีขึ้นรวมไปถึงการศึกษาต่อยอดมากขึ้น ผู้วิจัยได้นำเสนอตัวอย่างแนวคิดในการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

- การทดสอบ Dynamic Modulus และ Dynamic Creep เป็นรูปแบบการทดสอบที่ดี มีความแม่นยำและความยืดหยุ่นในการทดสอบสูง โดยเป็นมาตรฐานการทดสอบด้าน แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใหม่ที่สุดในปัจจุบัน (ประกาศใช้ครั้งแรก ปี ค.ศ.2009) จึงควรหา แนวทางในการเตรียมตัวอย่างทดสอบให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ AASHTO TP79-09 เพื่อให้สามารถดำเนินการทดสอบ Dynamic Modulus ได้ ซึ่งค่า Dynamic Modulus และ Master Curve ที่ได้จากการทดสอบมีประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยขั้นสูงต่อไป เนื่องจากสามารถอธิบายและทำนายพฤติกรรมเชิงกลที่เป็นเหตุของความเสียหายแก่ผิว ทางได้เป็นอย่างดี จากแบบจำลองต่างๆของงานวิจัยในต่างประเทศ นอกจากนี้การ เตรียมตัวอย่างให้เป็นไปตามมาตรฐาน ยังส่งผลดีต่อการทดสอบ Dynamic Creep โดย สามารถควบคุมให้การทดสอบมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและสามารถแสดงศักยภาพการ ต้านทานการเสีรูปลถวารของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีเนื่องจากการทดสอบจนถึง จุดวิบัติของตัวอย่าง ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบ Wheel Tracking ที่ควบคุมที่เวลาใน การทดสอบแทน อย่างไรก็ตาม Wheel Tracking ยังมีจุดเด่นที่การทดสอบ Dynamic Creep ทดสอบไม่ได้ เช่น รูปแบบการให้แรงกระทำแก่ชิ้นตัวอย่างที่จำลองสภาวะจริงใน สนามมากกว่า และยังสามารถจำลองปัจจัยด้านความชื้นมาเกี่ยวข้องได้ เนื่องจากเครื่อง ทดสอบ Wheel Track บางรูปแบบมีลักษณะเฉพาะที่สามารถทดสอบโดยชิ้นตัวอย่าง จมอยู่ในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆได้ เป็นต้น ดังนั้นควรดำเนินการทดสอบทั้ง 3 รูปแบบ ควบคู่กันไป เพื่อให้งานวิจัยมีข้อมูลที่หลากหลายซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการศึกษามาก ยิ่งขึ้น
- ขั้นตอนมาตรฐานของการเตรียมตัวอย่างโดย Roller Compactor อาจจะใช้เทคนิคบาง ประการเพื่อควบคุมคุณภาพของชิ้นตัวอย่างให้สม่ำเสมอได้ดีด้วยการตัดชิ้นตัวอย่างรูป สี่เหลี่ยมขนาดตามต้องการจากการบดอัดผิวทางภาคสนาม หรือประยุกต์ใช้การบดอัด ตัวอย่างสำหรับงานทดสอบ Wheel Tracking ด้วย Gyrotory compactor ให้เป็น ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm หนา 5 เซนติเมตร แล้วประยุกต์ หาวิธีการยึดตัวอย่างเพื่อให้ติดตั้งลงในแบบได้ แล้วนำไปทดสอบด้วย Wheel Tracking ตามปกติ ซึ่งรูปแบบการเตรียมตัวอย่างลักษณะนี้มีการดำเนินงานจริงในหลายมาตรฐาน การทดสอบสำหรับเครื่อง wheel track รูปแบบอื่นๆ โดยการเตรียมตัวอย่างโดยการบด อัดด้วย Gyrotory compactor จะควบคุมการกระจายตัวของมวลรวมและควบคุม ความหนาแน่นให้สม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานได้ดีว่าการบดอัดตัวอย่างด้วย Roller Compactor

- เพิ่มจำนวนตัวอย่างหรือจำนวนครั้งการทดสอบให้มากเพียงพอต่อการทดสอบแต่ละประเภทเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล เนื่องจากมีจำนวนตัวอย่างที่มากเพียงพอจนสามารถนำผลที่ไม่เป็นไปตามแนวโน้มออกไปได้ หรือมีจำนวนมากพอที่จะสามารถใช้หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ผลการศึกษาได้
- เพื่อเป็นการต่อยอดให้เกิดองค์ความรู้ด้าน Crumb Rubber Modified ที่ครบถ้วนมากขึ้น การวิจัยและทดสอบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ wet process จึงเป็นสิ่งที่น่าจะต้องดำเนินการศึกษาในลำดับต่อไป ในขณะที่เดียวกันกระบวนการแบบ dry process ยังต้องการการพัฒนาและข้อมูลแวดล้อมอื่นๆอีกมากเพื่อให้การพัฒนากระบวนการผลิตเป็นไปอย่างสมบูรณ์จนสามารถเข้าสู่การทดสอบในแปลงทดสอบจนพัฒนาเป็นกระบวนการที่มีความแน่นอนและให้ผลลัพธ์ที่ดีเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างจริงในอนาคตต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก, จำนวนรถจดทะเบียน (สะสม) ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2532 – 2554. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://apps.dlt.go.th/statistics_web/vehicle.html [2555, 10 มีนาคม]
- [2] ฉันทวิน สวัสดิ์ศานต์ และคณะ, การสำรวจสภาพความเสียหายและหาสาเหตุของความเสียหายหลักของถนนลาดยางในประเทศไทย. 2551. รายงานฉบับที่ วพ.261 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
- [3] Pavement Interactive, Rutting. [Online]. 2008. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/rutting/> [2012, 12 March]
- [4] สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ สำนักบริหารบำรุงทาง กรมทางหลวง, คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง. 2550.
- [5] Freddy L. Roberts et al., Rutting. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2nd Edition. NAPA Education Foundation, 1996: 502-506.
- [6] John Read and David Whiteoak, Properties of asphalts. The Shell Bitumen Handbook, 5th Edition. Shell Bitumen, 2003: 340-343.
- [7] Freddy L. Roberts et al., Marshall Stability Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2nd Edition. NAPA Education Foundation, 1996: 284-285.
- [8] Pavement Interactive, HMA Performance Tests. [Online]. 2009. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/hma-performance-tests/> [2012, 12 March]
- [9] Pavement Interactive, Asphalt Mixture Performance Test. [Online]. 2010. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/asphalt-mixture-performance-test/> [2012, 12 March]
- [10] Pavement Interactive, Laboratory Wheel Tracking Devices. [Online]. 2011. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/laboratory-wheel-tracking-devices/> [2012, 12 March]
- [11] Pavement Interactive, Aggregate. [Online]. 2008. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/aggregate/> [2012, 20 March]
- [12] Freddy L. Roberts et al., Aggregates Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2nd Edition. NAPA Education Foundation, 1996: 121-123.

- [13] Pavement Interactive, Toughness and Abrasion Resistance. [Online]. 2008. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/aggregate/> [2012, 23 March]
- [14] Pavement Interactive, Los Angeles Abrasion. [Online]. 2011. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/los-angeles-abrasion/> [2012, 23 March]
- [15] Pavement Interactive, Durability and Soundness. [Online]. 2008. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/durability-and-soundness/> [2012, 23 March]
- [16] Pavement Interactive, Particle Shape and Surface Texture. [Online]. 2007. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/particle-shape-and-surface-texture/> [2012, 23 March]
- [17] Pavement Interactive, Flat and Elongated Particles. [Online]. 2011. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/flat-and-elongated-particles/> [2012, 23 March]
- [18] Pavement Interactive, Aggregate Specific Gravity. [Online]. 2007. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/aggregate-specific-gravity/> [2012, 23 March]
- [19] Pavement Interactive, Aggregate Specific Gravity. [Online]. 2007. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/bulk-specific-gravity/> [2012, 23 March]
- [20] Pavement Interactive, Cleanliness and Deleterious Materials. [Online]. 2007. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/aggregate/> [2012, 23 March]
- [21] Pavement Interactive, Moisture Content. [Online]. 2007. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/aggregate/> [2012, 23 March]
- [22] Pavement Interactive, Gradation and Size. [Online]. 2009. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/gradation-and-size/> [2012, 23 March]
- [23] Pavement Interactive, Gradation Test. [Online]. 2011. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/gradation-test/> [2012, 23 March]
- [24] Pavement Interactive, Dense-Graded. [Online]. 2009. Available from: <http://www.pavementinteractive.org/article/dense-graded-hma/> [2012, 23 March]

- [25] Pavement Interactive, Mix Types. [Online]. 2010. Available from:
<http://www.pavementinteractive.org/article/pavement-typesmix-types/>
[2012, 23 March]
- [26] Bensa Nukunya et al., Effect of Aggregate Structure on Rutting Potential of Dense-Graded Asphalt Mixtures. 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C., 2002.
- [27] National Asphalt Pavement Association., Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice. NAPA Education Foundation, 1998.
- [28] Pavement Interactive, Stone Matrix Asphalt. [Online]. 2009. Available from:
<http://www.pavementinteractive.org/article/stone-matrix-asphalt/>
[2012, 23 March]
- [29] Glen Keith Allen, Problems of Stone Mastic Asphalt Use In North Queensland. University of Southern Queensland. Queensland, 2006.
- [30] Pavement Interactive, Open-Graded. [Online]. 2009. Available from:
<http://www.pavementinteractive.org/article/open-graded-hma/>
[2012, 23 March]
- [31] Wikipedia, Permeable Paving. [Online]. 2012. Available from:
http://http://en.wikipedia.org/wiki/Permeable_paving [2012, 23 March]
- [32] Herrington, P.R., Reilly, S., Cook S., Porous Asphalt Durability Test. Transfund New Zealand Research Report 265, 2005.
- [33] Federal Highway Administration, Crumb Rubber Modifier (CRM) in Asphalt Pavement: Summary of Practices in Arizona, California and Florida. Report No. FHWA-SA-95-056. Washington, D.C., 1995.
- [34] Federal Highway Administration, Crumb Rubber Modifier Workshop Notes: Design Procedures and Construction Practices. Report No. FHWA-SA-93-011. Washington, D.C., 1993.
- [35] Freddy L. Roberts et al., Additive and Modifier in HMA. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2nd Edition. NAPA Education Foundation, 1996: 456 - 460.
- [36] A. T. Papagiannakis and T. J. Lougheed, A Review of Crumb Rubber Modified Asphalt Concrete Technology. Washington State Transportation Commission, 1995.
- [37] Douglas D. Carlson and Han Zhu, Asphalt-Rubber An Anchor to Crumb Rubber Markets. International Rubber Forum. Veracruz, Mexico, 1999.

- [38] Federal Highway Administration, State of the Practice-Design and Construction of Asphalt Paving Materials with Crumb Rubber Modifier. Report No. FHWA-SA-92-022. Washington, D.C., 1992.
- [39] Eshmaiel Ganjian et al., Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 2009: 1828 – 1836.
- [40] Mark S. Buncher, Evaluating the Effects of the Wet and Dry Processes for Including Crumb Rubber Modifier in Hot Mix Asphalt. Auburn University. Alanama, 1995.
- [41] Weidong Cao, Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 2007: 1011 – 1015.
- [42] F. Hernandez-Olivares et al., Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process. *International Journal of Pavement Engineering*, 2009: 277-288.
- [43] F. Moreno et al., Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes. *Construction and Building Materials*, 2011: 2323 – 2334.
- [44] F. Moreno et al., The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage. *Construction and Building Materials*, 2012: 466 – 474.
- [45] American Association of State Highway and Transport Officials. Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). AASHTO Designation: TP 79-09. Washington, D.C., 2009.
- [46] European Committee For Standardization. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – part 22: Wheel Tracking: BS-EN 12697-22. London, 2003.
- [47] กองวิเคราะห์และวิจัย กรมทางหลวง, แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete or Hot-Mix Asphalt). มาตรฐานที่ ทล.-ม. 408/2532. 2532
- [48] National Asphalt Pavement Association (NAPA). Designing and Constructing SMA Mixtures – State – of – the – Practice. Maryland, 1999.
- [49] National Cooperative Highway Research Program. A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. NCHRP Report 673. Washington, D.C., 2011.

- [50] European Committee For Standardization. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – part 33: Specimen prepared by roller kcompactor: BS-EN 12697-33. London, 2003.
- [51] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM C 127-12. Pennsylvania, 2012.
- [52] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. ASTM C 128-12. Pennsylvania, 2012.
- [53] American Association of State Highway and Transport Officials. Standard Method of Test for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures AASHTO TP 305-09. Washington, D.C., 2009.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิวารักษ์ อุ่นศิริไฉย เกิดวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2531 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม ปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

ระหว่างศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ผู้เขียนมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในเอกสารการประชุมวิชาการต่างๆ ได้แก่

Siwarak UNSIWILAI, Boonchai SANGPETNGAM. Calibration of Roughness Prediction for Asphalt Pavement. Case Study: Thailand's Department of Highways' Roads. Proceedings of the 10th International Symposium on USMCA, 2011.Chiang Mai, Thailand.

ศิวารักษ์ อุ่นศิริไฉย, บุญชัย แสงเพชรงาม. 2555. การสอบเทียบแบบจำลองทำนายดัชนีความขรุขระสากล ของถนนแบบผิวทางยืดหยุ่น กรณีศึกษา: ถนนผิวทางลาดยางในโครงข่ายของกรมทางหลวง. Proceedings of International Conference on Highway Engineering 2012, Bangkok, Thailand.

ศิวารักษ์ อุ่นศิริไฉย, บุญชัย แสงเพชรงาม. 2556. ผลของการผสมเศษยางบดในมวลรวม ที่มีต่อคุณสมบัติความต้านทานการยุบตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน. เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 18. เชียงใหม่.

