การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตระหว่างวัสดุมวลรวมตามข้อกำหนดขอบบนและขอบล่างที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60–70 และ PMA

The Comparative Study of Asphalt Concrete Engineering Properties between Top limit and Low limit Criteria of Aggregate Mixed with Asphalt Cement AC 60-70 and PMA

กฤษณะ จันทโชติ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
E-mail : fengknj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันถนนในประเทศไทยประมาณร้อยละ 90 เป็นถนนแอสฟัลต์คอนกรีต และวิธีการออกแบบนั้นได้มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบโดยใช้วิธีซูเปอร์เพฟ ซึ่งในวิธีการดังกล่าวมีข้อกำหนดของวัสดุมวลรวมรวมไปถึงตัวเชื่อมประสาน โดยงานวิจัยนี้ได้ทดสอบมวลรวมหินปูนที่ใช้ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานงานทาง และข้อกำหนดซูเปอร์เพฟ หลังจากนั้นได้คำนวณปริมาณแอสฟัลต์ที่ได้จากการออกแบบปริมาณยางเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 4.69 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตพบว่า ปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมของส่วนผสมทั้งขอบบนและขอบล่างของวัสดุมวลรวมคือ ร้อยละ 4.54 และ 4.75 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต จากผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (ITS) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับแอสฟัลต์ชนิด PMA จะมีค่าความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมากกว่าส่วนผสมที่ผสมกับยางแอสฟัลต์ AC 60-70 และวัสดุขอบล่างสำหรับ AC 60-70 และ PMA จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมน้อยกว่าขอบบนอยู่ 0.351 และ 0.334 MPa ตามลำดับ สำหรับโมดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม (MR) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับยาง PMA จะมีค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับยางแอสฟัลต์ AC 60-70 และวัสดุขอบล่างสำหรับ AC 60-70 และ PMA จะมีค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำน้อยกว่าขอบบน 795 และ 828 MPa ตามลำดับ

คำสำคัญ

แอสฟัลต์คอนกรีต ซูเปอร์เพฟ กำลังรับแรงดึงทางอ้อม โมดูลัสคืนตัว

Abstract

Currently, approximately 90 percent of the roadway in Thailand is asphalt concrete and designed base on the researches using Superpave method. The specification of aggregate and bituminous-binder is necessary for this approach carried out by selecting of limestone aggregates which meets the Highway standards and Superpave specifications, then calculated an initial

amount of rubber tires as 4.69 percent by weight of the mixture. It was found that the proper rubber tires values of the Top limit and Low limit of aggregate are 4.54 and 4.75 percent by weight of the mixture, respectively. The testing results in this research presented the Indirect Tensile Strength (ITS) value and Indirect Tensile Resilient Modulus (MR) of the asphalt concrete mixed with polymer modified asphalt (PMA) is higher than the asphalt concrete mixed with asphalt AC 60-70. The ITS value of low limit aggregate is lower than the top limit aggregate as 0.351 and 0.334 MPa for the AC 60-70 and PMA admixture, respectively. And the MR value of low limit aggregate is also lower than the top limit aggregate as 795 MPa for AC 60-70 and 828 MPa for PMA.

Key words

asphalt concrete, superpave, indirect tensile strength (ITS), indirect tensile resilient modulus (MR)

1. บทนำ

ในปัจจุบันถนนมีบทบาทและความสำคัญอย่างยิ่งในการเดินทาง การติดต่อ การขนส่ง การแลกเปลี่ยนทางวัฒนธรรม และอื่นๆ อีกมาก ในปัจจุบันถนนมีความสะดวกสบายเพิ่มมากขึ้น และยังมีโครงข่ายถนนที่เชื่อมต่อภูมิภาคต่างๆ และครอบคลุมทั่วประเทศ ทำให้ถนนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่คนส่วนมากใช้ในการเดินทาง โดยถนนในประเทศไทยมีความยาวรวมทั้งสิ้น 50,836 กิโลเมตร ซึ่งแบ่งเป็นถนนลูกรังร้อยละ 0.36 ถนนคอนกรีตร้อยละ 8.22 และถนนแอสฟัลต์คอนกรีตร้อยละ 91.42

ถนนแอสฟัลต์คอนกรีต (asphalt concrete pavement) เป็นโครงสร้างทางที่มีต้นทุนในการก่อสร้างที่ต่ำกว่าโครงสร้างทางแบบแข็ง คือ ถนนคอนกรีต (concrete pavement) และภายหลังการปูผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเสร็จก็สามารถเปิดให้บริการได้ในทันที โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ชั้นพื้นทาง (base course) และชั้นรองพื้นทาง (subbase course) แต่ส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นส่วนที่รับน้ำหนักการจราจรโดยตรง และทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำซึมลงไปทำลายชั้นโครงสร้างที่อยู่ต่ำกว่าได้ ธันวิน สวัสดิศานต์ และ กฤษณะ จันทรโชติ [1] เป็นระยะเวลามากกว่าหนึ่งทศวรรษที่กรมทางหลวงได้เปลี่ยนมาใช้แอสฟัลต์เกรด 60/70 จากเดิมที่ใช้แอสฟัลต์เกรด 80/100 โดยการเปลี่ยนเกรดยางแอสฟัลต์ในครั้งนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และกำลังรับน้ำหนักของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการเพิ่มความหนืดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาวิจัยและเก็บรวบรวมสภาพความเสียหายของถนนลาดยางในประเทศไทยมากกว่า 270 แห่ง โดยสำนักวิจัยและพัฒนางานทางพบว่าความเสียหายหลักของถนนลาดยางในปัจจุบันยังคงเป็นการเกิดร่องล้อที่มีมากถึงร้อยละ 67 ของถนนที่มีความเสียหายทั้งหมดที่สำรวจ โดยผู้ใช้รถใช้ถนนโดยทั่วไปสามารถสังเกตเห็นร่องล้อได้โดยง่ายในบริเวณทางแยกและทางลาดชัน ซึ่งสาเหตุของการเกิดร่องล้อนั้นอาจเกิดจากโครงสร้างทางโดยรวมมีความแข็งแรงและความหนาไม่เพียงพอ หรืออาจเกิดจากวัสดุโครงสร้างทางที่ไม่แข็งแรง เช่น วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตอ่อนเกินไป จึงเกิดเป็นร่องล้อได้ง่าย

การออกแบบส่วนผสมในปัจจุบันมี 2 วิธีได้แก่ วิธีมาร์แชลล์และซูเปอร์เพฟ บุญพล มีไชโย [2] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์

กับวิธีซูเปอร์เพฟระดับ 1 สำหรับในการออกแบบโดยวิธีซูเปอร์เพฟระดับ 1 ออกแบบที่น้ำหนักบรรทุกเพลาเดี่ยวสมมูลมาตรฐาน 1-3 ล้านเที่ยว ที่อุณหภูมิอากาศสูงสุดโดยเฉลี่ย 39-40°C ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่ากับวิธีมาร์แชลล์ สำหรับอุณหภูมิอากาศสูงสุดโดยเฉลี่ย 41-42°C และ 43-44°C ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยกว่าวิธีมาร์แชลล์ และความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบโดยวิธีซูเปอร์เพฟระดับ 1 มีค่ามากกว่าวิธีมาร์แชลล์ โดยสามารถหาค่าคงที่ของความสัมพันธ์ที่สามารถนำไปแปลงค่าจากวิธีมาร์แชลล์ไปเป็นวิธีซูเปอร์เพฟระดับ 1 ได้ 3 ด้านคือ ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และปริมาณช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ ดังนั้นการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟระดับ 1 จะทำให้ได้ความหนาแน่นที่สูงขึ้น ให้การบดอัดที่แน่นอน และส่วนผสมใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์น้อยลงกว่าวิธีมาร์แชลล์ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายของวัสดุก่อสร้างถนน Hall K. et all [3] ศึกษาถึงผลกระทบของขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการบดอัดที่มีผลต่อคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตพบว่า การบดอัดแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง unmodified และ rubber-modified โดยใช้วัสดุผสม 2,000 กรัม จะมีคุณสมบัติแตกต่างกันกับวัสดุผสม 3,500 ,5,000 และ 6,000 กรัมซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน และ densification curve ของก้อนตัวอย่างขนาดเล็กยังมีระยะ offset ไปในทิศทางที่ความหนาแน่นต่ำกว่า densification curve ของก้อนตัวอย่างขนาดใหญ่ และคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างขนาดเล็กจะแตกต่างจากคุณสมบัติของก้อนตัวอย่างขนาดใหญ่ โดยในการออกแบบก้อนตัวอย่างขนาดเล็กจะมีค่าแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ค่า VMA, VFA สูงกว่าก้อนตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่

ชยธันว์ พรหมศร และ คณะ [4] กล่าวถึงการออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟมีข้อดีทั้งในด้านทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นมาโดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้งานจริง และเทคโนโลยีสมัยใหม่ของอุปกรณ์เครื่องมือที่มารองรับความต้องการในการพัฒนาที่เกิดขึ้น ปัจจุบันทั่วโลกริเริ่มให้ความสนใจการออกแบบดังกล่าวเช่นกัน ซึ่งในสหรัฐอเมริกาก็ได้มีผู้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์กับวิธีซูเปอร์เพฟว่า มีความแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งผลจากการศึกษาสรุปว่าวิธีการออกแบบวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟทำให้วัสดุผสมที่มีคุณภาพดีขึ้น และประหยัดค่าก่อสร้างมากขึ้นด้วย

ทวิช ชอบพานิช [5] เปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 เกรด 40/50 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานซูเปอร์เพฟ พบว่า ผลการทดสอบค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์ซีเมนต์จากการหาค่าสัมพันธ์ของ $G^*/Sin\delta$ กับอุณหภูมิ พบว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 มีค่าต้านทานการเกิดร่องล้อต่ำที่สุด และแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 40/50 มีความต้านทานการเกิดร่องสูงที่สุด เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ แต่ PMA จะมีความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงที่สุด เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ dynamic creep test ของแอสฟัลต์คอนกรีตจากกรมทางหลวง ผลการทดสอบค่าความต้านทานการแตกร้าว เนื่องจากความล้าของแอสฟัลต์ซีเมนต์จากการหาความสัมพันธ์ของ $G^*Sin\delta$ พบว่า PMA มีค่าความต้านการแตกร้าวเนื่องจากความล้าสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ indirect tensile fatigue test ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้ PMA จากกรมทางหลวง

นภัสรพี อนันตชัยพงศ์ และ ร.อ.พิพัฒน์ สอนวงษ์ [6] เปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์ชนิดโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์กับชนิดแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70 และ AC 40/50 โดยวิธีทดสอบซูเปอร์เพฟ

สำหรับการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวที่ 5 อุณหภูมิพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 40/50 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA สำหรับอุณหภูมิ 5-35 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่า ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 60/70 จะมีค่าโมดูลัสคืนตัวต่ำสุด

วิธีซูเปอร์เพฟเป็นวิธีที่ออกแบบโดยให้ความสำคัญ 3 ประการที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันคือ 1) ข้อกำหนดตัวเชื่อมประสานประเภทแอสฟัลต์ 2) การออกแบบส่วนผสมเชิงปริมาตรและระบบการวิเคราะห์ 3) การทดสอบเชิงวิเคราะห์ของส่วนผสมและระบบคาดคะเนสมรรถนะร่วมกับข้อมูลทางด้านภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่ [7] โดยทั่วไปมาตรฐานงานทางจะกำหนดร้อยละการผ่านตะแกรงในแต่ละขนาดของวัสดุมวลรวม โดยจะมีช่วงของขนาดวัสดุมวลรวมในแต่ละตะแกรง ที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และ PMA ซึ่งงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงแนวทางในการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมตามมาตรฐานงานทางและผลทดสอบทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

1. เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีซูเปอร์เพฟ *ขอบบน (top limit) และ *ขอบล่าง (low limit) ของหินปูนที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และ โพลิเมอร์โมดิฟายด์-แอสฟัลต์ (polymer modified asphalt, PMA)

2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์ผลการทดสอบทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และ โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (polymer modified asphalt, PMA)

*หมายเหตุ*ขอบบน (top limit) *ขอบล่าง (low limit) คือขนาดคละที่มีค่าใกล้เคียงกับข้อกำหนดของมาตรฐานงานทางในการกำหนดร้อยละการผ่านตะแกรงตามขนาดใหญ่สุดที่ระบุ

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย ดำเนินการตั้งแต่การออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟซึ่งจะมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบส่วนผสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟ

ปี ค.ศ. 1987 โครงการ SHRP (The Strategic Highway Research Program) ได้เริ่มพัฒนาข้อกำหนดของวัสดุแอสฟัลต์ขึ้นมาใหม่ เรียกว่า ซูเปอร์เพฟ ซึ่งเป็นการรวบรวมข้อกำหนดการเลือกวัสดุ วิธีการทดสอบวัสดุ วิธีการออกแบบและควบคุมคุณภาพการก่อสร้างถนนที่มีผิวชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมุ่งเน้นคุณภาพในการใช้งานในสนามเป็นหลัก สิ่งที่สำคัญ 2 ประการ ในระบบซูเปอร์เพฟ คือ การบดอัดในห้องปฏิบัติการ และการทดสอบสมรรถนะของถนน [7]

การบดอัดในห้องปฏิบัติการทำได้ด้วยการใช้เครื่องบดอัดไจราตอรี่ซูเปอร์เพฟ ที่เรียกกันย่อๆว่า SGC (Superpave Gyratory Compactor) วิธีการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในวิธีซูเปอร์เพฟนั้นจะใช้เครื่อง SGC ดังภาพที่ 1 ซึ่งใช้ในการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยสามารถใช้บดอัดวัสดุผสมเพื่อให้ได้ก้อนตัวอย่าง 2 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. และ 150 มม.จำนวนรอบของการบดอัดขึ้นอยู่กับระดับปริมาณการจราจร และอุณหภูมิอากาศสูงสุดเฉลี่ย วัสดุผสมที่ใช้รองรับปริมาณการจราจร และอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นสูง ดังนั้นการบดอัดในห้องปฏิบัติการควรสามารถบดอัดก้อนตัวอย่างให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นได้ตามต้องการ ซึ่งการเพิ่มความหนาแน่นนี้ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนรอบของการบดอัดพื้นฐานของเครื่อง SGC นั้นมาจากเครื่องบดอัดแบบหมุนเทคซัส

(Texas gyratory compactor) ซึ่งถูกดัดแปลงเพื่อใช้กับทฤษฎีบดอัดแบบหมุนฝรั่งเศส (French gyratory compactor) เครื่องบดอัดแบบหมุนเทคซัสที่ถูกดัดแปลงนี้บดอัดก้อนตัวอย่างได้เสมือนจริงตรงตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ได้สำเร็จ จากเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างมีขนาด 6 นิ้ว จึงเหมาะสมที่จะใช้บรรจุส่วนผสมที่มีขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดได้ถึง 50 มม. ผู้วิจัยของ SHRP จึงได้ดัดแปลงเครื่องบดอัดแบบหมุนเทคซัส โดยทำมุมการหมุนให้ต่ำลง ลดความเร็วของการหมุนให้ช้าลง และเพิ่มความสามารถในการบันทึกความสูงของก้อนตัวอย่างให้ตรงกับเวลาที่เกิดขึ้นจริง และสามารถออกแบบร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยวิธีซูเปอร์เพฟ Seward D. et all [8] พิจารณาถึงความสามารถของเครื่อง gyratory compactor และวิเคราะห์หาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆของวัสดุมวลรวมพบว่า การบดอัดวัสดุมวลรวมเพียงอย่างเดียว โดยไม่ต้องผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ก็จะสามารถทำนายค่าองศาของการขัดเหลี่ยมประสานกันของวัสดุมวลรวมหยาบ ค่า VMA และค่าปริมาณแอสฟัลต์ได้อย่างถูกต้อง และวิธีนี้ใช้ได้กับวัสดุมวลรวมที่เป็นเกรดเปิดเกรดแน่น ขั้นตอนการออกแบบจะเริ่มจากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุมวลรวม หลังจากนั้นก็จะจัดสัดส่วนของหินที่เป็นไปตามข้อกำหนด (ซูเปอร์เพฟและมาตรฐานงานทาง) ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดคละของมวลรวม คำนวณหาร้อยละของแอสฟัลต์-เริ่มต้น (P_{bi}) จากความถ่วงจำเพาะของหินและขนาดใหญ่สุดที่ระบุ (Nominal maximum size) และทำการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ P_{bi} ที่จำนวนรอบสูงสุด ($N_{maximum}$) คือการบดอัดก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต 3 ก้อนที่จำนวนรอบสูงสุด โดยจำนวนรอบนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรกับอุณหภูมิอากาศสูงพร้อมทั้งหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ซึ่งจะต้องหาค่าต่ำสุดที่ปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้น (P_{bi}) และหลังจากนั้น คำนวณหาค่าร้อยละของแอสฟัลต์ประสิทธิผลที่ควรใช้จริง (P_{be}) และคำนวณสัดส่วนฝุ่นหลังจากนั้นทำการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์-ประสิทธิผล (P_{be}) และร้อยละ ± 0.5 ของแอสฟัลต์ประสิทธิผล (P_{be}) ที่จำนวนรอบสูงสุด ($N_{maximum}$) และเลือกค่าร้อยละแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามเกณฑ์ของซูเปอร์เพฟ (Air void 4% และอื่นๆ) ทำการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้แอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่จำนวนรอบสูงสุด ($N_{maximum}$) ตรวจสอบคุณสมบัติ Volumetric ตามเกณฑ์ซูเปอร์เพฟ % Gmm @ Ninitial<89 %, % Gmm @ Nmaximum<98 % โดยค่าปริมาตรของ VMA และ VFA ที่ N_{des} และความหนาแน่นของส่วนผสมที่ N_{ini} และ N_{max}

ภาพที่ 1 เครื่องบดอัดไจราตอรี่ซูเปอร์เพฟ

3.2 การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

วิธีการทดลองบดอัดส่วนผสมด้วยเครื่องบดอัดไจราตอรี่ซูเปอร์เพฟ (Superpave Gyratory Compactor, SGC) นำอัตราส่วนผสมของมวลรวมที่เหมาะสมมาบดอัดด้วยเครื่องไจราตอรี่ซูเปอร์เพฟ ให้ได้ก้อนตัวอย่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูงประมาณ 70 มม. โดยการบดอัดใช้แรงกดต่อก้อนตัวอย่างคงที่ 600 กิโลปาสคาล ฐานของเครื่องหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ 30 รอบต่อนาที ตำแหน่งการบดอัดก้อนตัวอย่างทำมุม 1.25 องศา ตลอดช่วงการบด

อัด สำหรับขั้นตอนการออกแบบวิธีนี้ ออกแบบโดยใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) และอุณหภูมิของมวลรวมที่ใช้ผสมคือ 180 ºC สำหรับอุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และ โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) เท่ากับ 160 ºC และ 170 ºC ตามลำดับ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมก่อนที่จะบดอัดด้วยเครื่องบดอัดไจราตอรี่คือ 165-170 ºC เพื่อออกแบบ และหาปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมที่ได้ค่าช่องว่างอากาศ (air voids) ร้อยละ 4 ในส่วนผสมอัดแน่น (percent air void) Strategic Highway Research Program [9] ได้กล่าวว่า จำนวนรอบการหมุนมากที่สุด (N_{max}) จำนวน 220 รอบ การหมุนออกแบบ (N_{des}) จำนวน 135 รอบ การหมุนเริ่มต้น (N_{ini}) จำนวน 9 รอบ เกณฑ์การออกแบบปริมาตรส่วนผสมวิธีซูเปอร์เพฟ (VMA, VFA และ สัดส่วนฝุ่น) คือเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 4 ที่จำนวนรอบการหมุนออกแบบ (N_{des}) สำหรับอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงคือ 44 ºC และบดอัดโดยวิธีซูเปอร์เพฟ

4. ผลการศึกษา

4.1 การทดสอบคุณสมบัติของหินปูน

คุณสมบัติของหินปูนในงานวิจัยนี้ใช้สัดส่วนผสมและขนาดคละตามเกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น wearing course ขนาด 12.5 มม. ดังภาพที่ 2 และมีผลการทดสอบคุณสมบัติของผลการทดสอบหินปูน ดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาการจัดขนาดคละของหินปูนพบว่าสัดส่วนผสมและขนาดคละไม่ผ่านเขตจำกัด (restricted zone) ของมาตรฐานซูเปอร์เพฟดังภาพที่ 2 สำหรับการทดสอบการหาเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดตามข้อกำหนดซูเปอร์เพฟ โดยผลการทดสอบจากตารางที่ 1 แสดงว่า หินปูนในงานวิจัยนี้ผ่านข้อกำหนดมาตรฐานงานทาง และวิธีซูเปอร์เพฟ โดยใช้วัสดุมวลรวมที่มีขนาดใหญ่สุดที่ระบุ (nominal maximum size) เท่ากับ 12.5 มม. Collins R. et all [10] มีแนวคิดที่ว่าการแตกหักของมวลรวมในขณะบดอัดด้วยเครื่อง SGC อาจทำให้ขนาดคละของมวลรวมเปลี่ยนไป และอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงปริมาตร จากการศึกษาโดยเปรียบเทียบการบดอัดเครื่อง SGC กับเครื่อง Astec vibratory compactor พบว่าการแตกหักของวัสดุมวลรวมของส่วนผสมไม่มีความแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของปริมาณวัสดุที่มีขนาด 0.075 มม. เนื่องจากการแตกหักของมวลรวมขณะบดอัดไม่มีผลมากนักต่อค่าสัดส่วนฝุ่น (dust proportion) และเมื่อต้องการออกแบบวัสดุมวลรวมผสมที่มีค่าการสึกหรอสูง ควรออกแบบขนาดคละให้อยู่ใต้พื้นที่ถูกจำกัดเพื่อป้องกันการแตกหักของมวลรวม ขณะทำการบดอัดวัสดุมวลรวมจะเป็นหินปูนซึ่งได้ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ โดยผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 1 ผลการทดสอบผ่านตามข้อกำหนดมาตรฐานงานทางและวิธีซูเปอร์เพฟ สำหรับสัดส่วนผสมจะมี 2 แบบ คือ ขอบบน และขอบล่างดังภาพที่ 2 ซึ่งจะเป็นการจัดขนาดคละเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้ โดยจะเห็นได้ว่าการจัดขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐานงานทางและซูเปอร์เพฟ

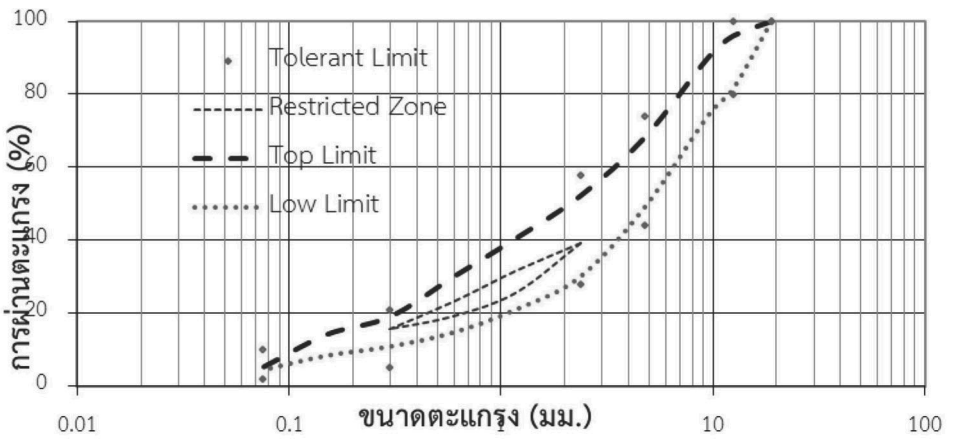
4.2 ผลการออกแบบแอสฟัลต์ซีเมนต์

การออกแบบส่วนผสมเฉพาะงาน (JMF) ของวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในงานวิจัยนี้ตามวิธีซูเปอร์เพฟ การออกแบบ JMF ใช้เกณฑ์ในการออกแบบที่ปริมาณน้ำหนักบรรทุกเพลาเดี่ยวสมมูล (Equivalent Single Axle Load, ESAL) 10-30 ล้านเที่ยว ค่าอุณหภูมิอากาศสูงสุดเฉลี่ย 44 ºC และขนาดหินใหญ่สุดที่ระบุ (nominal maximum aggregate size) เท่ากับ 12.5 มม. โดยปริมาณจราจรและอุณหภูมิอากาศที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบตามวิธีซูเปอร์เพฟจะแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 4.69 โดยน้ำหนัก

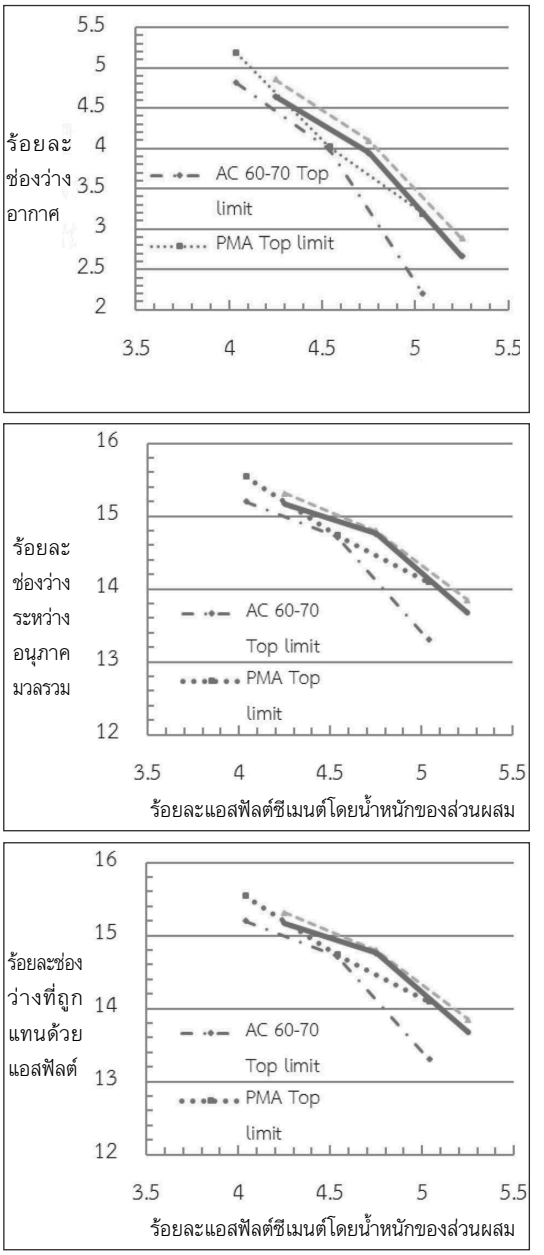
ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีค่าปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้นเท่ากันทั้ง 2 ส่วนผสมคือ ขอบบนและ ขอบล่าง เมื่อบดทับก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตจะได้ผลดังตารางที่ 3 สำหรับปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (P_{be}) ที่เหมาะสมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งขอบบนและขอบล่าง คือร้อยละ 4.54 และ 4.75 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานงานทาง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหินปูน

Properties	Bin 1		total	Bin 2	Bin 3	total	Desired
	Passing #200	Retained #200					
Apparent specific gravity	2.769	2.745	2.749	2.746	2.733	2.743	-
Bulk specific gravity	-	2.719	2.728	2.703	2.684	2.707	-
% Water absorption		0.74		0.58	0.57		-
Uncompacted voids content of fine aggregate (%)			45.9				> 45
Abrasion test of coarse aggregate by los Angeles Machine (%)					33.56		< 40
Determining fractured particles in coarse aggregates (%)				100	100		> 90
Flat of Elongated particles in coarse Aggregate (%)					8	3	<10
Sand equivalent (%)			53.2				> 50
Asphalt absorption (%)		AC 60-70 =	0.236		PMA =	0.237	



ภาพที่ 2 การจัดขนาดคละของหินปูนขอบบนและขอบล่าง



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมและช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ กับปริมาณแอสฟัลต์-ประสิทธิผล (Adjust P_{be}) ที่มีความคลาดเคลื่อนร้อยละ ± 0.5 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ของขอบบนและขอบล่าง

ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ถูกต้องของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC60/70 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) และจากข้อมูลที่ได้เตรียมตัวอย่าง ที่การหมุนออกแบบ (N_{des}) จำนวน 135 รอบ ซึ่งตัวอย่างเป็นไปตามตารางที่ 3

จะเห็นได้ว่า ค่าช่องว่างอากาศมีค่าประมาณร้อยละ 4 ส่วนช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมและช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์จะเห็นได้ว่า ขอบบนมีค่าน้อยกว่าขอบล่าง จึงทำให้ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (P_{be}) ที่เหมาะสมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต มีค่าน้อยกว่าขอบล่าง ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดตามวิธีซูเปอร์เพฟ และจากการเตรียมตัวอย่างตามจะได้ค่าดังภาพที่ 3 และ ตารางที่ 3

4.3 ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS)

การทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมเป็นการทดสอบเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต โดยการทดสอบจะใช้มาตรฐาน ASTM D 6931 ซึ่งจะทดสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวทาง [11] และค่าที่ได้เป็นดังตารางที่ 4 ซึ่งค่า ITS ที่ได้จากวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีค่ามากกว่า AC 60-70 เพราะแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีการเชื่อมประสานกับวัสดุมวลรวมได้ดีกว่า จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมมีค่ามากกว่า AC 60-70 และขอบบนมีค่า ITS มากกว่าขอบล่าง เมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเดียวกัน

ตารางที่ 2 การบดอัด P_{bi} ของปริมาณแอสฟัลต์ร้อยละ 4.69 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

จำนวนรอบการบดอัด	ขอบบน (AV %)		ขอบล่าง (AV %)	
	AC 60-70	PMA	AC 60-70	PMA
9	13.00	13.06	15.17	15.14
135	3.70	3.76	4.23	4.29
220	2.35	2.70	2.36	2.82
P_{be} (%)	4.53	4.56	4.74	4.76
Adjust (P_{be} (%))	4.53		4.75	

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

คุณสมบัติ	AC 60-70		PMA		ข้อกำหนด	หมายเหตุ
	ขอบบน	ขอบล่าง	ขอบบน	ขอบล่าง		
P_{be} (%)	4.54	4.75	4.54	4.75	-	โดยน้ำหนักของส่วนผสม
ช่องว่างอากาศ (% Va)	3.98	4.09	4.01	3.95	4 %	ข้อกำหนดซูเปอร์เพฟ
ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม (% VMA)	14.72	14.79	14.74	14.76	>14 %	ขนาดใหญ่กว่าที่ระบุขนาด 12.5 มม.
ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (% VFA)	72.73	72.96	71.62	72.76	65-75 %	ESALs 10-30 ล้านเที่ยว
สัดส่วนฝุ่น	0.99	1.19	0.99	1.19	0.6-1.2	ข้อกำหนดซูเปอร์เพฟ
% Gmm @ Nini	86.57	84.83	86.74	85.29	<89 %	ESALs 10-30 ล้านเที่ยวและ
% Gmm @ Nmax	97.26	97.68	97.24	97.55	<98 %	อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูง 44 °C

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Strength

ITS (40 °C)	ขอบบน (MPa)		ขอบล่าง (MPa)	
	AC 60-70	PMA	AC 60-70	PMA
1	0.818	0.906	0.185	0.586
2	0.624	0.734	0.553	0.604
3	0.577	0.941	0.228	0.390
ค่าเฉลี่ย	0.673	0.861	0.322	0.527

4.4 ค่าโมดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus, MR)

สำหรับการทดสอบวิธีนี้คำนึงถึงคุณสมบัติยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์ (elastic material) เมื่อได้รับแรงกระทำและถอนแรงกระทำออก จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมโดยทันที ในขณะที่วัสดุโครงสร้างทางซึ่งมีพฤติกรรมแบบ Visco-elastic material จะเกิดการคืนตัว แต่ไม่สมบูรณ์ในทันทีทันใด จะต้องใช้เวลาเพิ่มเติมเพื่อให้วัสดุคืนตัวอย่างสมบูรณ์ เมื่อให้แรงกระทำซ้ำๆ (repeated load) แก่วัสดุ และนำค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นจากแรงกระทำในแต่ละรอบหารด้วยค่าความเครียดจากการคืนตัวในแต่ละรอบ โดยค่า MR ที่ได้จากการทดสอบจะแสดงถึงความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ เมื่อถูกแรงกระทำเช่นเดียวกับค่า Elastic Modulus ดังนั้นค่า MR จึงแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ และถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของถนน เพื่อคำนวณหาค่าการเคลื่อนตัว และพฤติกรรมอื่นๆของโครงสร้างทางเมื่อถูกแรงกระทำ การทดสอบจะใช้มาตรฐาน ASTM D 4123-82 และ BS DD 213: 1993 โดยการให้น้ำหนักกดในลักษณะกระทำซ้ำ และควบคุมการขยายตัวด้านข้างของก้อนตัวอย่าง (horizontal displacement control) ให้มีค่าใกล้เคียงกับ 5 μm มีช่วงเวลาการให้น้ำหนัก (loading pulse width) เท่ากับ 0.1 วินาที และช่วงเวลา (pulse repetition period) เท่ากับ 1 วินาที รูปแบบของแรงกระทำ (loading wave shape) กำหนดให้เป็นรูป Haversine [6] ซึ่งในตารางที่ 5 แสดงค่า MR ที่ได้ของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีค่ามากกว่า AC 60-70 เพราะแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีการยืดหยุ่นได้ดีกว่าจึงทำให้โมดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อมมีค่ามากกว่า AC 60-70 และขอบบนมีค่า MR มากกว่าขอบล่างเมื่อเทียบกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดเดียวกัน

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบ Indirect Tensile Resilient Modulus

MR (40 °C)	ขอบบน (MPa)		ขอบล่าง (MPa)	
	AC 60-70	PMA	AC 60-70	PMA
1	1090	1105	225	430
2	1059	1824	313	544
3	1121	1069	346	541
ค่าเฉลี่ย	1090	1333	294	505

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบงานวิจัยนี้โดยใช้วัสดุมวลรวมคือหินปูนโดยการจัดขนาดคละออกเป็น 2 แบบคือขอบบนและขอบล่างที่ผสมกับยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และ PMA เพื่อเตรียมก้อนตัวอย่างแอสฟัสต์คอนกรีตและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรม พบว่า

1. จากการทดสอบมวลรวมหินปูนที่ใช้ผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานงานทางและข้อกำหนดซูเปอร์เพฟ

2. ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้สำหรับส่วนผสม 2 แบบ พบว่า ขอบล่างใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.75 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และขอบบนใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อยละ 4.54 โดยน้ำหนัก

ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งมีปริมาณที่น้อยกว่า เพราะส่วนผสมขอบบนโดยรวมมีปริมาณวัสดุมวลรวมละเอียดมากกว่าซึ่งทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวม และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์น้อยกว่าขอบล่าง และสำหรับการผสมที่ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์จำนวนมากก็ทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น

3. การทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมสำหรับส่วนผสมที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีค่าความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตมากกว่าส่วนผสมที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และวัสดุขอบล่างสำหรับ AC 60-70 และ PMA จะมีค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมน้อยกว่าขอบบนอยู่ 0.351 และ 0.334 MPa ตามลำดับ

4. ค่าโมดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อมสำหรับส่วนผสมที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำมากกว่าส่วนผสมที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 และวัสดุขอบล่างสำหรับ AC 60-70 และ PMA จะมีค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำน้อยกว่าขอบบนอยู่ 795 และ 828 MPa ตามลำดับ

6. ข้อเสนอแนะ

1. การผสมสำหรับส่วนผสมขอบบนสัดส่วนผสมนั้นมีปริมาณฝุ่นมากทำให้ยากแก่การผสม และใช้เวลาในการผสมนานยิ่งขึ้นกว่าส่วนผสมขอบล่าง

2. ควรมีการทดสอบ Dynamic Creep Test, Rutting และ Fatigue เพิ่มเติมซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ถึงสมรรถนะในการรับน้ำหนักบรรทุกจราจรที่เสมือนจริงเพิ่มขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ธันวิน สวัสดิศานต์ และกฤษณะ จันทรโชติ. 2552. การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีต ที่ใช้ยางแอสฟัลต์เกรด 60/70เกรด 40/50 และยางโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์. สัมมนาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์และตรวจสอบปี 2552 กรมทางหลวง

[2] บุญพล มีไชโย. 2546. ความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์กับวิธีซูเปอร์เพฟระดับ1. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[3] Hall, K., Dandu, S and Gowda, G. 2014. Effect of Specimen Size on Compaction and Volumetric Properties in Gyratory Compacted Hot-Mix Asphalt Concrete Specimens. . Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board

[4] ชยธันว์ พรหมศร ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก เศกชัย อนุเวชศิริเกียตรติ พรชัย ศิลารมณ์ และณรงค์ชัย นุ่มกรรณ์. 2546. การประเมินคุณสมบัติของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้งานอยู่ในประเทศไทยโดยใช้ข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟ. วพ. 205 สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง

[5] ทวิช ชอบพานิช. 2552. การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70, เกรด 40/50 และโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานซูเปอร์เพฟ.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[6] นภัสรพี อนันตชัยพงศ์ และร.อ.พิพัฒน์ สอนวงษ์. 2552. การเปรียบเทียบค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุผสมแอสฟัลต์ชนิดโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์กับชนิดแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 และ AC 40/50 โดยวิธีทดสอบซูเปอร์เพฟ. วิศวกรรมสาร มก .ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 พฤศจิกายน 2552 - มกราคม 2553

[7] วัชรินทร์ วิทยกุล. 2549. เทคโนโลยียางมะตอย. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

[8] Seward, D. Hinrichsen, J and Ries, J 2014. Structural Analysis of Aggregate Blends Using Strategic Highway Research Program Gyratory Compactor. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board

[9] Strategic Highway Research Program. 1994. The Superpave Mix Design Manual For New Contraction and Overlays. Report SHRP-A-407 National Research Council Washiington, DC.

[10] Collins, R. Watson, D. Johnson, A and Wu, Y. 2014. Effect of Aggregate Degradation on Specimens Compacted by Superpave Gyratory Compactor. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.

[11] ประสิทธิ์ ภู่ประทุม. 2539. อุณหภูมิมาตรฐานของถนนกรมทางหลวง.รายงานฉบับที่ วพ.158 ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง