



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 และชนิดโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์

A Comparative of permanent deformation of asphalt concrete mixed with AC 60-70 and polymer modified asphalt binder

กฤษณะ จันทรโชติ*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Krissana Jantarachot*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Nakhon Pathom 73140

* Corresponding author.

E-mail: fengknj@ku.ac.th; Telephone: 086-683-7488

วันที่รับบทความ 16 กรกฎาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 1 กันยายน 2563; วันที่ตอบรับบทความ 15 ตุลาคม 2563

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจรบนถนนส่งผลให้เกิดน้ำหนักรบรรทุกกระทำซ้ำมากขึ้นและทำให้ถนนเกิดความเสียหาย โดยความเสียหายเกี่ยวกับผิวทางที่เกิดจากน้ำหนักรบรรทุกกระทำซ้ำส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของผิวทาง การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อหาการเปลี่ยนรูปแบบถาวรนั้นสามารถทำได้โดยการทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ งานวิจัยนี้เปรียบเทียบค่าการยุบตัวถาวรและความเครียดสะสมที่เกิดขึ้นของแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 และชนิดโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์กับหินปูนที่มีขนาดคละ 2 แบบ คือ แบบข้อกำหนดบนและแบบข้อกำหนดล่าง โดยทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์และขนาดคละของวัสดุผสมรวม โดยแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิดโพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์จะมีค่าการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่าแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 และก่อนตัวอย่างที่มีขนาดคละแบบข้อกำหนดบนจะมีค่าการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่าก่อนตัวอย่างที่มีขนาดคละแบบข้อกำหนดล่าง

คำสำคัญ

แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 โพลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ หินปูน การเปลี่ยนรูปแบบถาวร

Abstract

Nowadays, the increasing amount of traffic on the road can result in more repeating loading and is a cause of the pavement distresses. The surface distresses caused by the repeated load produce permanent deformation of surface pavements. The test for engineering property on asphalt concrete for finding the permanent deformation can be processed by doing the dynamic creep test in the repeating loading manner. The present study then compared the permanent deformation and the accumulating strain of asphalt concrete mixed with the AC 60-70 binder and polymer modified asphalt binder with limestone which consisted of two types namely Upper Limit gradation and Lower Limit gradation by testing the asphalt concrete at the temperature 40°C. The results showed that the resistance of the permanent deformation of asphalt concrete was depended on the type of asphalt binder and the gradation of aggregate. Then, the asphalt binder mixed with the polymer modified asphalt binder had higher permanent deformation resistance

than asphalt concrete mixed with the AC 60-70 binder. Finally, the specimen with Upper Limit gradation had higher permanent deformation resistance than Lower Limit gradation.

Keywords

AC 60-70; polymer modified asphalt; limestone; permanent deformation

1. คำนำ

สำหรับประเทศไทย การคมนาคมขนส่งทางบกส่วนใหญ่จะใช้นถนนเป็นเส้นทางหลัก โดยถนนทั้งหมดจะประกอบด้วยถนนแอสฟัลต์คอนกรีต 94,580 กิโลเมตร จาก 99,881 กิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 94.7 ของถนนทั้งหมดที่อยู่ในความดูแลของกรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบทซึ่งเป็นหน่วยงานหลักในความรับผิดชอบในส่วนงานถนน [1]

โดยทั่วไปผิวทางแอสฟัลต์ส่วนใหญ่จะถูกสร้างขึ้นใน 20 ปีที่ผ่านมา ในขณะที่ปริมาณการจราจรก็เพิ่มขึ้นอย่างมากและน้ำหนักบรรทุกที่ลากหลายที่กระทำบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและทำให้เกิดความเสียหายขึ้น คือ การแตกร้าวเนื่องจากความล้าและการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรซึ่งส่งผลให้เกิดร่องล้อ สำหรับการเกิดร่องล้อนั้นมี 2 ลักษณะ คือ โครงสร้างชั้นทางด้านล่างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไม่แข็งแรงจึงเกิดร่องล้อขึ้นและผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไม่แข็งแรงจึงเกิดร่องล้อขึ้น [2-3] โดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อนแสดงให้เห็นร่องล้อที่เกิดขึ้น และจึงกลายเป็นหนึ่งความกังวลที่จะต้องให้ความสำคัญและพบว่าหลังจากเปิดการจราจรจะพบการเกิดร่องลึกในพื้นที่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่สร้างขึ้นใหม่ ปัจจุบันที่มีอิทธิพลต่อการเกิดร่องล้อมีหลายอย่าง เช่น ชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ ส่วนผสม ปริมาณการจราจร อุณหภูมิและค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของผิวทางก่อนการใช้งาน ดังนั้นความสามารถด้านทานการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาในการออกแบบส่วนผสมคือส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต [4-5]

ความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดส่วนผสมร้อนจะเป็นจุดเริ่มต้นที่จะนำไปสู่การเกิดร่องล้อซึ่งเป็นความเสียหายที่ต้องให้ความสำคัญเกี่ยวกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต [6-7] การเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรของผิวทางเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตและประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูง [8] เนื่องจากการจราจรของรถบรรทุกและแรงดัน

ลมยางที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นปัญหาหลักที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรอย่างรุนแรงหรือรื้อถล้อ และพบว่าการเกิดร่องล้อจะเกิดขึ้นในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นหลัก ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องจำแนกลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตและต้องระบุส่วนผสมให้ได้แบบข้อกำหนดตามมาตรฐานงานทางก่อนที่จะมีการก่อสร้างถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต [9] ร่องล้อเป็นหนึ่งในปัญหาหลักของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ลักษณะการเกิดจะเป็นแนวยาวตามทางล้อของน้ำหนักบรรทุก [10] การเกิดร่องล้อเป็นการสะสมของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและความผิดปกติของการรับแรงเฉือนของแอสฟัลต์คอนกรีต [11] ร่องล้อมีผลกระทบสำคัญต่อประสิทธิภาพของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ยิ่งไปกว่านั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อไปในชั้นโครงสร้างถนน [12] ดังนั้นการเกิดร่องล้อไม่เพียงแต่ลดอายุการใช้งานของถนน และอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้ทางถนนอีกด้วย [7]

คุณสมบัติส่วนผสมต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความต้านทานการเกิดร่องล้อของแอสฟัลต์คอนกรีต [13] และในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยได้มุ่งเน้นการพัฒนาทางเกี่ยวกับด้านวิศวกรรมผิวทางและวัสดุเกี่ยวกับโครงสร้างถนนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น [14-21] การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะออกแบบโครงสร้างถนนและงานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรนั้นสามารถทดสอบได้หลายแบบ คือ ทดสอบการคืบแบบคงที่ (Static Creep Test), โมดูลัสแบบกระทำซ้ำ (Dynamic Modulus Test) และการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test) [22-23] สำหรับการวิจัยก่อนหน้านี้สรุปว่าการทดสอบที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงของแอสฟัลต์คอนกรีตเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรคือการทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำจึงถือเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการประเมินความต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวร [24]

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตหรือการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยส่วนผสมระหว่างวัสดุผสมรวมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ สำหรับวัสดุผสมรวมนั้นจะใช้หินปูนซึ่งใช้ในการก่อสร้างถนนในประเทศไทยสำหรับงานวิจัยนี้ออกแบบสัดส่วนผสมของวัสดุผสมรวมขนาดคละ 2 แบบ คือ แบบข้อกำหนดบน (Upper Limit) และแบบข้อกำหนดล่าง (Lower Limit) ในส่วนของแอสฟัลต์ซีเมนต์ 2 ชนิด คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 คือ วัสดุเชื่อมประสานมีสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ ส่วนประกอบหลัก คือ บิทูเมน (Bitumen) ที่อุณหภูมิต่ำจะมีสถานะเป็นของแข็งมีความหนืดสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้องจะเป็นวัสดุกึ่งของแข็งและเมื่อให้ความร้อนเพื่อทำให้อุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น ความหนืดจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเป็นของเหลว การให้ความร้อนนั้นเป็นวิธีการทำให้อยู่ในสถานะของเหลวชั่วคราวก่อนนำไปใช้งานต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิของแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดลงที่อุณหภูมิห้องก็จะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์กลับคืนสู่สภาพปกติ และแอสฟัลต์ซีเมนต์อีกชนิด ได้แก่ โพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (polymer modified asphalt, PMA) คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ได้ปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยการผสมสารโพลีเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องผสมชนิดแรงเฉือน เพื่อให้โพลีเมอร์กระจายตัวและสามารถคงสภาพอยู่ได้ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยทำการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

2. วิธีการวิจัย

2.1 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนสำหรับงานวิจัยนี้จะออกแบบโดยใช้ระบบซูเปอร์เพฟ สำหรับการบดอัดในห้องปฏิบัติการทำได้ด้วยการใช้เครื่องบดอัดโรตารีซูเปอร์เพฟ (Superpave Gyratory Compactor, SGC) วิธีการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ [25] จะใช้เครื่องดังรูปที่ 1 ขั้นตอนโดยการออกแบบจะเริ่มด้วยการจัดสัดส่วนขนาดคละของวัสดุผสมรวมคือ หินปูนที่ใช้ในงานวิจัย สำหรับขนาดใหญ่สุดที่ระบุ (Nominal Maximum Size) เท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 2) ใช้ขนาดคละ 2 แบบ

ซึ่งได้ออกแบบสัดส่วนผสมให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อกำหนดขนาดคละมวลรวมมาตรฐานงานทางของกรมทางหลวง ประเทศไทย (มท.-ล. 408/2532) และข้อกำหนดระบบซูเปอร์เพฟ ได้แก่ แบบข้อกำหนดบน (Upper Limit) และแบบข้อกำหนดล่าง (Lower Limit) หลังจากนั้นคำนวณหาค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์เริ่มต้น (Percentage of Initial Trial Asphalt Binder, P_{bi}) จากความถ่วงจำเพาะของหินปูนและขนาดใหญ่สุดที่ระบุและบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์เริ่มต้นที่จำนวนรอบการหมุนบดอัดสูงสุด (N_{max}) 3 ก่อน การบดอัดส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างหินปูนกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทยและโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ ซึ่งเป็นแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่สามารถต้านทานการร่อนล้อได้ดี [26-27] ดังรูปที่ 3 และสำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 คือ 160 องศาเซลเซียส และชนิดโพลีเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ คือ 170 ผสมกับหินปูน สำหรับอุณหภูมิของวัสดุผสมรวมเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส ขั้นตอนการหาสูตรส่วนผสมใช้งาน (Job Mix Formula, JMF) ดังรูปที่ 4 โดยอุณหภูมิอากาศสูงเฉลี่ย (Average Design High Air Temperature) 44 องศาเซลเซียส, ปริมาณน้ำหนักบรรทุกทุกเพลาคือ 10-30 ล้านเที่ยว ทำให้ได้จำนวนรอบการหมุนบดอัดเริ่มต้น (N_{ini}) 9 รอบ, จำนวนรอบการหมุนบดอัดออกแบบ (N_{des}) 135 รอบ และจำนวนรอบการหมุนบดอัดสูงสุด 220 รอบ



รูปที่ 1 เครื่องบดอัดโรตารีซูเปอร์เพฟ



รูปที่ 2 วัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3 แอสฟัลต์ซีเมนต์ ชนิด PMA

2.2 การทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีต

สำหรับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบถาวรที่เกิดขึ้นในส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีต ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะทำการบ่มอุณหภูมิตัวอย่าง 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงค่าอุณหภูมิ 80 Percentile ของอุณหภูมิมาตรฐานของถนน [28] ก่อนการทดสอบผู้วิจัยได้วัดอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางในก้อนตัวอย่างและตรวจสอบเวลาที่อุณหภูมิเท่ากันทั้งก้อนพบว่าต้องใช้เวลาบ่มอุณหภูมิไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง 40 นาที [29] จึงสามารถทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมได้ สำหรับการทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวร โดยแรงที่กระทำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต 100 กิโลปาสกาล ลักษณะการให้น้ำหนักแบบการคืบ โดยให้น้ำหนักกระทำซ้ำ (Dynamic Creep Test) การสิ้นสุดการทดสอบคือ 3,600 รอบ และนำค่าการยุบตัวถาวรหรือการเปลี่ยนรูปแบบถาวรและความเครียดสะสม (Accumulated

Strain, ϵ_p) คือ ผลรวมสะสมของความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นภายในแอสฟัลต์คอนกรีตเมื่อได้รับแรงกระทำซ้ำสามารถหาได้จากสมการ (1) สำหรับการติดตั้งตัวอย่างเพื่อทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ดังรูปที่ 5 โดยก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ทดสอบมี 4 ประเภท คือ

- แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA กับหินปูนแบบข้อกำหนดบน (PMA Upper)
- แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA กับหินปูนแบบข้อกำหนดล่าง (PMA Lower)
- แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 กับหินปูนแบบข้อกำหนดบน (AC 60-70 Upper)
- แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 กับหินปูนแบบข้อกำหนดล่าง (AC 60-70 Lower)

$$\epsilon_p = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (1)$$

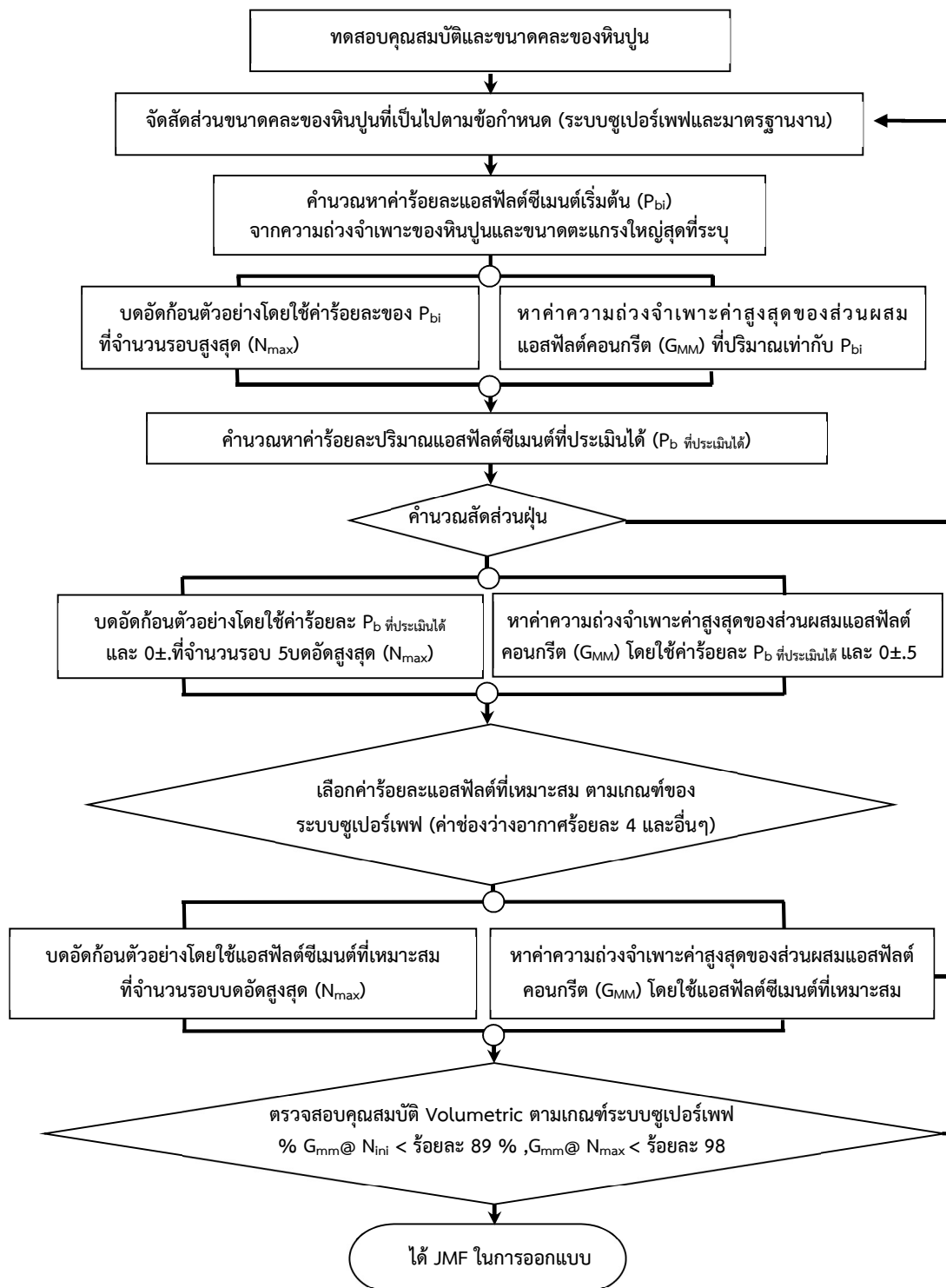
เมื่อ Δh คือ ระยะการเปลี่ยนรูปแบบถาวรตามแนวแกนของก้อนตัวอย่างตั้งแต่ครั้งแรกที่ได้รับแรงกระทำมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

h_0 คือ ความสูงเริ่มต้นของตัวอย่างที่ทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินปูน

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุมวลรวมที่ใช้ในงานวิจัย ดังตารางที่ 1 และการกระจายอนุภาคดังรูปที่ 6 สำหรับสัดส่วนผสมของวัสดุมวลรวมสำหรับงานวิจัยนี้มี 2 แบบ คือ แบบข้อกำหนดบน (Upper Limit) และแบบข้อกำหนดล่าง (Lower Limit) ทั้ง 2 แบบจะใช้ข้อกำหนดที่ไม่ผ่านเขตจำกัด (Restricted Zone) ของระบบซูเปอร์เพฟ ถ้าขนาดคละของวัสดุมวลรวมเข้าไปในเขตจำกัดจะทำให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตบดอัดยากและความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปแบบถาวรลดลง สำหรับขนาดใหญ่สุดที่ระบุเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร และขนาดคละของวัสดุมวลรวมเป็นไปตามข้อกำหนดระบบซูเปอร์เพฟและข้อกำหนดกรมทางหลวงประเทศไทย



รูปที่ 4 การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในงานวิจัย

3.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์

สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ ชนิด AC 60-70 และชนิด PMA ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้วิธีการ

มาตรฐานทดสอบ ดังตารางที่ 2 และเป็นไปตามข้อกำหนดกรมทางหลวง ประเทศไทย

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินปูน [30]

คุณสมบัติ	Bin 1		Bin 2		Bin 3		รวม	เกณฑ์	มาตรฐานการทดสอบ
	ผ่าน #200	ค้าง #200	ผ่าน	ค้าง	ผ่าน	ค้าง			
ความวงจําเพาะ (G _m)	2.769	2.745	2.749	2.746	2.733	2.743	-	-	ASTM C 127, 128
ความถ่วงจําเพาะรวม (G _s)		2.719	2.728	2.703	2.684	2.707	-	-	
การดูดซึมนํ้า (ร้อยละ)	0.74		0.58		0.5		-	-	
ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด (ร้อยละ)	45.9						>45	AASHTO TP 33	
ค่าสมมูลของทราย (ร้อยละ)	73						>50	ASTM D 2419	
ค่าการสึกหรอ (ร้อยละ)					32.55		<40	ASTM C 131	
ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ (ร้อยละ)				100	100		>90	ASTM D 5821	
ดัชนีความแบน (ร้อยละ)					25		<30	BS 812	
ดัชนีความยาว (ร้อยละ)					18		<30	BS 812	
ความแบนและความยาวของอนุภาค (ร้อยละ)				8	3		<10	ASTM D 479	
ความคงทนของวัสดุมวลรวมละเอียด = 2.90							<9	ASTM C 88	
รวมโดยใช้โซเดียมซิลิเฟต (ร้อยละ)									

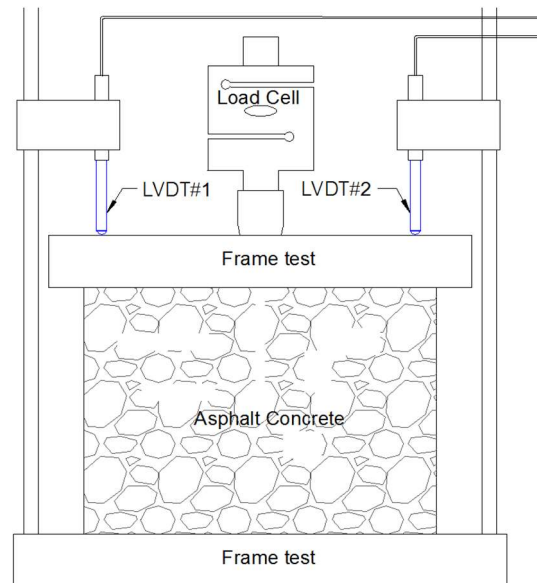


รูปที่ 5 ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างการที่ใช้ทดสอบในงานวิจัย

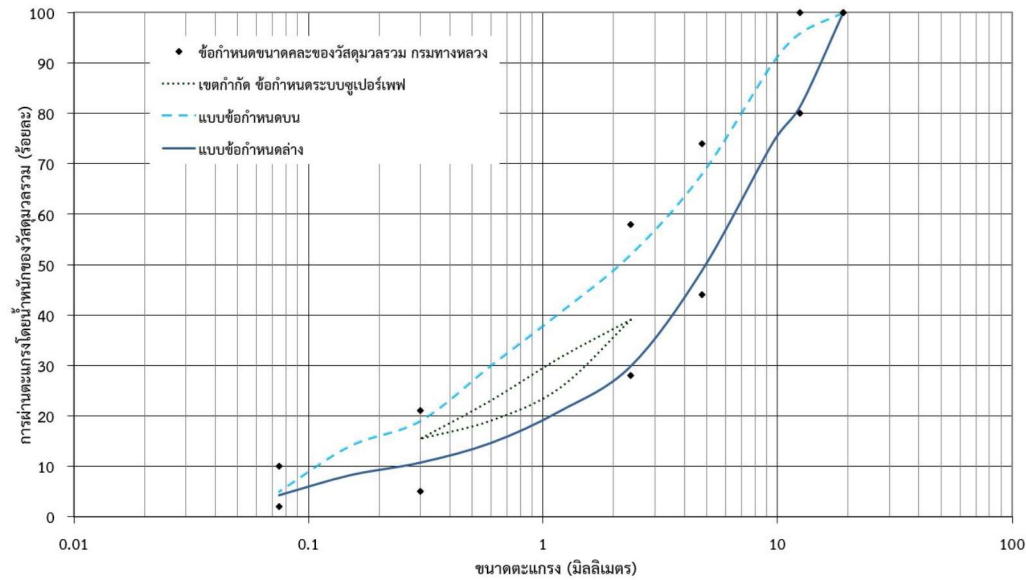
ผลการออกแบบปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์ 2 ชนิดและวัสดุมวลรวม 2 ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ของขนาดกะแบบข้อกำหนดฉบับมีค่าน้อยกว่าขนาดกะแบบข้อกำหนดกลาง จึงทำให้ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ประเมินได้ (P_b ที่ประเมิน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

คุณสมบัติ	แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด		มาตรฐานการทดสอบ
	AC 60-70 (เกณฑ์)	PMA (เกณฑ์)	
ความถ่วงจําเพาะ (25 องศาเซลเซียส)	1.02 (-)	1.02 (-)	ASTM D 70
เพนิเทรชัน (25 องศาเซลเซียส), (0.1 มม.)	67 (60-70)	61 (60-70)	ASTM D 5
จุดอ่อนตัว, (องศาเซลเซียส)	46.2 (>46)	71.1 (>70)	ASTM D 36
ความหนืด (135 องศาเซลเซียส, 20 รอบต่อนาที, แกน 21), (พอยส์)	394 (-)	1220 (1100)	ASTM D 4402
ความยืดดึง (25 องศาเซลเซียส, (ชม.))	>100 (100)	>100 (100)	ASTM D 113
การดูดซึมแอสฟัลต์ (ร้อยละ)	0.236 (-)	0.237 (-)	



ได้) ที่เหมาะสมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าน้อยกว่าขนาดกะแบบข้อกำหนดกลาง สำหรับช่องว่างอากาศที่ได้ประมาณร้อยละ 4 และช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวมซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของระบบซูเปอร์เพพ ในส่วนผลการออกแบบค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 6 การกระจายอนุภาคของหินปูนที่ใช้ในงานวิจัย [30]

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบค่าร้อยละของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยระบบซูเปอร์เฟฟ [30]

คุณสมบัติ	PMA		AC 60-70		ข้อกำหนด	หมายเหตุ
	Upper ¹	Lower ²	Upper ³	Lower ⁴		
P _b ที่ประเมินได้ (ร้อยละ)	54.4	75.4	54.4	75.4	-	โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
ช่องว่างอากาศ (ร้อยละ)	03.4	98.3	00.4	05.4	4	ข้อกำหนดระบบซูเปอร์เฟฟ
ช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวม (ร้อยละ)	73.14	67.14	72.14	79.14	>14	ขนาดใหญ่สุดที่ระบุ 12.5 มิลลิเมตร
ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (ร้อยละ)	61.71	75.72	78.72	95.72	65-75	ESALs 10-30 ล้านเที่ยว
สัดส่วนฝุ่น	0.99	1.19	0.99	1.19	0.6-1.2	ข้อกำหนดระบบซูเปอร์เฟฟ
% G _{mm} @ N _{ini}	86.79	85.18	86.56	84.93	<89	ESALs 10-30 ล้านเที่ยว และอุณหภูมิ
% G _{mm} @ N _{max}	97.29	97.44	97.25	97.78	<98	อากาศสูงเฉลี่ย 44 องศาเซลเซียส

* ¹PMA Upper คือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA กับหินปูนแบบข้อกำหนดบน

* ²PMA Lower คือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA กับหินปูนแบบข้อกำหนดล่าง

* ³AC 60-70 Upper คือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 กับหินปูนแบบข้อกำหนดบน

* ⁴AC 60-70 Lower คือ แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 กับหินปูนแบบข้อกำหนดล่าง

3.3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวร

การทดสอบการคืบแบบให้น้ำหนักกระทำซ้ำ แบบ Dynamic Creep test ในระหว่างการทดสอบขึ้นงานหรือแอสฟัลต์คอนกรีตจะถูกแรงกระทำซ้ำ ซึ่งการประยุกต์ใช้จะให้แรงโดยจะเกิดลักษณะความเค้นตามแนวแกน (Axial Stress) ขึ้น และจะนำค่าความเครียดตามแนวแกน (Axial Strain) มาวิเคราะห์เพื่อวัดความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปแบบถาวร สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้จะจำลองน้ำหนักความเค้นตามแนวแกนคือ 100 กิโลปาสกาล จำนวนรอบสูงสุดในการทดสอบ 3,600 รอบ ก่อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมด 4 ประเภท (ทั้งหมด 12 ก้อน) และผลดังตารางที่ 4

จากผลการทดสอบพบว่า การต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดบนมีการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดล่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.035 มิลลิเมตร และมีค่าความเครียดสะสมเฉลี่ยน้อยกว่า 432 microstrain

ในทำนองเดียวกันการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60 - 70 ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดบนมีการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60 - 70 ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดล่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.220 มิลลิเมตรและมีค่าความเครียดสะสมน้อยกว่า 3,066 microstrain

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของงานวิจัย

Type	No.	Δh	Average Δh	Accumulated strain	Average Accumulated strain	Accumulated strain per cycle	Average Accumulated strain per cycle
		(mm)	(mm)	(micro strain)	(micro strain)	(micro strain)	(micro strain)
PMA Upper	1	0.11		1,662		0.462	
	2	0.13	0.120	1,933	1,864	0.537	0.518
	3	0.12		1,998		0.555	
PMA Lower	1	0.17		2,503		0.695	
	2	0.16	0.155	2,354	2,296	0.654	0.638
	3	0.14		2,031		0.564	
AC 60-70 Upper	1	0.21		3,180		0.883	
	2	0.15	0.210	2,245	3,180	0.624	0.883
	3	0.27		4,116		1.143	
AC 60-70 Lower	1	0.48		6,840		1.900	
	2	0.36	0.430	5,259	6,246	1.461	1.735
	3	0.45		6,639		1.844	

สำหรับการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดบนมีการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60 - 70 ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดบนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.090 มิลลิเมตรและมีค่าความเครียดสะสมน้อยกว่า 1,316 microstrain และในทำนองเดียวกันการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์

ชนิด PMA ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดล่างมีการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด AC 60-70 ผสมกับหินปูนแบบข้อกำหนดล่างเฉลี่ยอยู่ที่ 0.275 มิลลิเมตรและมีค่าความเครียดสะสมน้อยกว่า 3,950 microstrain

4. สรุป

สำหรับการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นสาเหตุที่ทำให้ผิวทางไม่แข็งแรงซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดร่องล้อขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวแบบถาวรและความเครียดสะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้จากแอสฟัลต์ซีเมนต์ 2 ชนิด (AC 60-70 และ PMA) และหินปูน ขนาดคละ 22 ขนาดคละ (แบบข้อกำหนดบนและแบบข้อกำหนดล่าง)

ผลการศึกษาพบว่า การต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตขึ้นอยู่กับชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์และขนาดคละของวัสดุผสมรวม แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA มีค่าการยุบตัวถาวรมาน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมกับแอสฟัลต์คอนกรีตชนิด AC 60-70 สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมกับขนาดคละแบบข้อกำหนดบนจะมีค่าการยุบตัวถาวรมาน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมกับขนาดคละแบบข้อกำหนดล่าง

สำหรับงานวิจัยนี้การเลือกใช้งานวัสดุผสมสำหรับการต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นควรเลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ชนิด PMA และหินปูนแบบข้อกำหนดบน

สำหรับงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการทดสอบจำนวนรอบสูงสุด 3,600 รอบ ซึ่งผู้ที่สนใจอาจจะทดสอบที่จำนวนรอบสูงสุดที่มากขึ้น

เพื่อให้แน่ใจสำหรับการเลือกใช้ชนิดของแอสฟัลต์ซีเมนต์และสัดส่วนขนาดคละของวัสดุผสมรวมที่เหมาะสมกับสมรรถนะของผิวทางควรมีการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพิ่มเติม เช่น การต้านทานการเกิดร่องล้อ การต้านทานการเกิดความล้า และการต้านทานความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความชื้น เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร. Length of Road Network in Thailand 2009 to 2020. สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม, กระทรวงคมนาคม. 2020.
- [2] วชิรินทร์ วิทย์กุล. เทคโนโลยียางมะตอย. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2003, 253-255.
- [3] สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, สำนักบริหารบำรุงทาง. คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง. กรมทางหลวง ประเทศไทย. 2007.
- [4] Fwa TF, Tan SA, Zhu LY. Rutting prediction of asphalt pavement layer using c- u model. *Journal of Transport Engineering*. 2004, 130(5):675-683.
- [5] Sureyya T, Halit O, Atakan A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*. 2007, 21(2): 328-337.
- [6] Dong Z, Xiaoming H, Yongli Z. Algorithms for generating three- dimensional aggregates and asphalt mixture samples by the discrete- element method. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2012, 27: 111-117.
- [7] Tao X, Xiaoming H. Investigation into causes of in- place rutting in asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2012, 28: 525-530.
- [8] Jiupeng Z, Jianzhong P, Zengping Z. Development and validation of viscoelastic- damage model for three- phase permanent deformation of dense asphalt mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013, 24(7): 842-850.
- [9] Jacob U, Mordechai P. A comprehensive viscoelasto- plastic characterization of sand- asphalt compressive and tensile cyclic loading. *Journal of Test and Evaluation*. 1985, 13(1): 49- 56
- [10] Zhi S, Wing GW. Nonlinear properties analysis on rutting behaviour of bituminous materials with different air void contents. *Construction and Building Materials*. 2009, 23: 3492-3498
- [11] Amy LS. Characterization of transverse profile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 199, 1655: 185- 191.
- [12] Safwan AK, Tamer MB. Rutting parameters for asphalt concrete for different aggregate structures. *International Journal of Pavement Engineering*. 2011, 12(1): 13-23.
- [13] Xiaoming H, Yuqing Z. A new creep test method for asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. 2010, 11(4): 969-991.
- [14] Quantao L, Alvaro G, Erik S, Martin VDV. Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. 2011, 25: 3746-3752.
- [15] Alvaro G, Erik S, Martin VDV, Gerbert VB. Optimization of composition and mixing process of a self- healing porous asphalt, *Construction and Building Materials*. 2012, 30: 3746-3752.
- [16] Rubio MC, Moreno F, Martínez-Echevarría MJ, Martínez G, Vázquez JM. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half- warm mix asphalt, *Journal of Cleaner Production*. 2013, 41: 1-6.
- [17] Pérez-Martínez M, Moreno-Navarro F, Martín- Marín J, Ríos- Losada C, Rubio- Gámez MC. Analysis of cleaner technologies based on waxes and surfactant additives in road construction, *Journal of Cleaner Production*. 2014, 65: 374-379.
- [18] Moreno- Navarro F, Iglesias G, Gámez MCR. Development of mechanomutable asphalt binders for the construction of smart

- pavements, *Materials and Design*. 2015, 84: 100–109.
- [19] Jiwang J, Fujian N, Lei G, Shenxin L. Developing an optional multiple repeated load test to evaluate permanent deformation of asphalt mixtures based on axle load spectrum. *Construction and Building Materials*. 2016, 122: 254–263.
- [20] Yaofei L, Ke Z, Peilong L, Jianhua Y, Xiangbing X. Performance evaluation of stone mastic asphalt mixture with different high viscosity modified asphalt based on laboratory tests. *Construction and Building Materials*. 2019, 225: 214–222.
- [21] Lidija R, Mojca Ravnika T, Marjan T. Increasing the rate of reclaimed asphalt in asphalt mixture by using alternative rejuvenator produced by tire pyrolysis. *Construction and Building Materials*. 2020, 232: 117117.
- [22] Witczak MW, Kaloush K, Pellinen T, El-Basyouny M, Quintus HV. *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*, Transportation Research Board, Washington. DC, 2002.
- [23] Moghaddam TB, Soltani M, Karim MR. Experimental characterization of rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads, *Construction and Building Materials*. 2020, 65: 487–494.
- [24] K. E. Kaloush, M. W. Witczak, Tertiary flow characteristics of asphalt mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 2002, 71: 248–280.
- [25] Thomas H, John D'A, John B. *Superpave Asphalt Mixture Design Workshop*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. 2002.
- [26] Filippo M. Fiber/Polymeric compound for high modulus Polymer Modified Asphalt (PMA). *Social and Behavioral Sciences*. 2013, 104: 39–48.
- [27] Jian-Shiuh C, Jung WT, Cheng-Te L, Evaluation of a highly-modified asphalt binder for field performance. *Construction and Building Materials*. 2018, 171: 539–545.
- [28] ประสิทธิ์ ภู่อประทุม. อุณหภูมิมาตรฐานของถนนกรมทางหลวง. รายงานฉบับที่ วพ.158 ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม. 1996.
- [29] ปณิตดา กลกิจวิวัฒน์, ฤกษ์ จันทโรตติ. ระยะเวลาที่เหมาะสมของการบ่มตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการจากการออกแบบโดยวิธีซูเปอร์เพฟ. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. 2020, DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.09.001.
- [30] ฤกษ์ จันทโรตติ. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตระหว่างวัสดุมวลรวมแบบข้อกำหนดขอบบนและขอบล่างที่ผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์. *วิศวกรรมสาร มก.* 2016, 11-22.