

ระยะเวลาที่เหมาะสมของการบ่มตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติการจากการออกแบบโดยวิธีซูเปอร์เพพ

ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์ และ กฤษณะ จันทโรชิต*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6683 7488 อีเมล: fengknj@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.09.001

รับเมื่อ 27 กุมภาพันธ์ 2563 แก้ไขเมื่อ 13 เมษายน 2563 ตอรับเมื่อ 15 เมษายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 8 กันยายน 2563

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยมีถนนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งหมดร้อยละ 94.48 ของถนนทั้งหมด ด้วยจำนวนที่มากและต้องการพัฒนาให้ผิวทางมีสมรรถนะที่ดีขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนการทดสอบต้องมีการบ่มตัวอย่างให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวอย่างในงานวิจัยที่ผ่านมาตั้งแต่ 3 ถึง 24 ชั่วโมง โดยผู้วิจัยส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาบ่มตัวอย่าง 24 ชั่วโมง ทำให้การใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการใช้เวลานาน มีผลให้การวางแผนการใช้งานเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองในการหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบ่มตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งผสมระหว่างหินปูนกับวัสดุเชื่อมประสาน AC 60-70 และ PMA ที่อุณหภูมิต่างๆ ผลการทดสอบระบุว่าระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวอย่างให้ได้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส คือ 3 ชั่วโมง 40 นาที การตรวจสอบความถูกต้องทำโดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบมอดุลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อมของการบ่มก่อนตัวอย่างระยะเวลา 3 ชั่วโมง 40 นาที เปรียบเทียบกับการบ่มก่อนตัวอย่างระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p -value มากกว่า 0.05) ดังนั้นระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อให้ได้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ถูกลดลงจาก 24 ชั่วโมงเป็น 3 ชั่วโมง 40 นาที ทำให้การใช้ห้องปฏิบัติการมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: อุณหภูมิ แอสฟัลต์คอนกรีต ระยะเวลาการบ่ม



The Optimum Duration for Curing Asphalt Concrete Specimens in the Laboratory with Superpave Method

Panatda Kasikitwiwat and Krissana Jantarachot*

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

* Corresponding Author, Tel. 08 6683 7488, E-mail: fengknj@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.09.001

Received 27 February 2020; Revised 13 April 2020; Accepted 15 April 2020; Published online: 8 September 2020

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Currently, 94.48 percent of road pavements in Thailand is asphalt pavement. An improvement of road surface needs material testing for engineering properties of asphalt concrete. However, there are limits on the number of laboratories and related equipment for the testing. Before testing for engineering properties, the specimens must be cured to get the specified temperature. The duration required for curing the specimens in the previous research is ranged from 3 to 24 hours depending on temperature levels. Most researchers spent 24 hours in curing the specimens to make sure that the temperature of the specimen was evenly dispersed during which the equipment were used for a long time. Therefore it caused an ineffective planning to use it in the laboratory. This research proposes the model to determine the suitable time for curing asphalt concrete specimens mixed with limestone and bitumen at various temperatures. The results indicate that the duration required to incubate the specimens to a temperature of 40°C is 3 hours and 40 minutes. The result of duration for curing the specimens was verified by comparing the engineering property results of 24 hours cure samples with the 220 minutes cure samples. The results show that they are not significantly different (p -value greater than 0.05). Therefore, the duration for curing asphalt concrete samples to get the 40°C temperature can be reduced from 24 hours to 3 hours and 40 minutes, thus improving laboratory efficiency without sacrificing its quality.

Keywords: Temperature, Asphalt Concrete, Curing Time

Please cite this article as: P. Kasikitwiwat and K. Jantarachot, "The optimum duration for curing asphalt concrete specimens in the laboratory with superpave method," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp. 47–60, Jan.–Mar. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

ปัจจุบันถนนเป็นส่วนสำคัญในการคมนาคมขนส่ง โดยถนนในประเทศไทยที่อยู่ในความดูแลและเป็นหน่วยงานหลักเกี่ยวกับงานทาง ได้แก่ กรมทางหลวงและกรมทางหลวงชนบท รวมทั้งสิ้น 99,800 กิโลเมตร ซึ่งมี 2 ประเภทหลักๆ คือ ผิวทางแกร่งตัว (Rigid Pavement) หรือผิวทางคอนกรีต และผิวทางหยุ่นตัว (Flexible Pavement) หรือผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งแบ่งเป็น ถนนคอนกรีตร้อยละ 4.49 และถนนแอสฟัลต์คอนกรีตร้อยละ 94.48 และส่วนที่เหลือจะเป็นถนนลูกรัง ซึ่งโดยส่วนใหญ่ในประเทศไทยจะเป็นถนนที่มีผิวทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต [1]

สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะประกอบด้วยมวลรวมซึ่งจะเป็นหินผสมกับวัสดุเชื่อมประสานซึ่งเป็นวัสดุหลัก [2] คือแอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งมีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยตรงที่อุณหภูมิต่ำจะมีสภาพเป็นของแข็งและจะแตกร้าวได้ [3]–[5] สำหรับในสภาพอุณหภูมิปกติของประเทศไทยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะเป็นวัสดุแข็งของแข็งมีความหนืดสูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวัสดุจะกลายเป็นของเหลวและความหนืดจะลดลงจะส่งผลให้เกิดร่องล้อหรือการเปลี่ยนรูปร่างแบบถาวรได้ง่ายขึ้น [6]–[8] จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจะมีผลโดยตรงกับพฤติกรรมของผิวทาง [9]–[11]

ในการทดสอบและวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต เช่น โมดูลัสการยึดหยุ่น กำลังรับแรงดึงทางอ้อม ความล้าและการเปลี่ยนรูปร่างถาวร เป็นต้น จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตให้ได้ตามกำหนด ซึ่งระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างที่จะทำการทดสอบโดยงานวิจัยที่ผ่านมาใช้ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างก่อนการทดสอบมีตั้งแต่ 3 ชั่วโมงขึ้นไป [12]–[14], 12 ชั่วโมง [15] และ 24 ชั่วโมง [16]–[19] ผู้วิจัยส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง 24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิเท่ากันทั้งก้อน ทำให้การทำงานวิจัยใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการเป็นระยะเวลานานมีผลทำให้การวางแผนการใช้งานเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะห้องปฏิบัติการที่มีการใช้งานร่วมกันมาก ดังนั้นการทราบระยะเวลาที่น้อยที่สุดที่จะทำให้อุณหภูมิตัวอย่างเท่ากันทั้งก้อนจึงเป็น

ประโยชน์สำหรับการทำงานวิจัยที่จำเป็นต้องทดสอบตัวอย่างจำนวนมากสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตหลากหลายประเภท ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพื่อหาแบบจำลองในการหาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบ่มตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งผสมระหว่างหินปูนกับวัสดุเชื่อมประสาน AC 60-70 และ PMA ที่อุณหภูมิต่างๆ

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะเวลาที่น้อยที่สุดสำหรับการบ่มก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตให้ได้อุณหภูมิเท่ากันทั้งก้อนสำหรับอุณหภูมิ 5, 10, 15, 20, 25, 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการทดสอบคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเพื่อเปรียบเทียบระหว่างก้อนตัวอย่างที่ใช้ระยะเวลาการบ่มที่ได้จากแบบจำลองกับก้อนตัวอย่างที่บ่มโดยใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การออกแบบส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่างในการทดสอบโดยวิธีซูเปอร์เพฟ

สำหรับการบดอัดในห้องปฏิบัติการทำได้ด้วยการใช้เครื่องบดอัดโรตารีซูเปอร์เพฟ (Superpave Gyrotory Compactor; SGC) วิธีการบดอัดวัสดุผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เพฟ [20], [21] จะใช้เครื่องบดอัดโรตารีซูเปอร์เพฟ ดังรูปที่ 1 ขั้นตอนประกอบด้วย 1) ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุผสมรวม เพื่อจัดสัดส่วนขนาดผลของหินที่เป็นไปตามข้อกำหนดของซูเปอร์เพฟและมาตรฐานงานทาง 2) คำนวณหาค่าร้อยละของแอสฟัลต์เริ่มต้น (P_{be}) จากค่าความถ่วงจำเพาะของหินและขนาดใหญ่สุดที่ระบุ (Nominal Maximum Size) 3) ทำการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ค่าร้อยละของแอสฟัลต์เริ่มต้นที่จำนวนรอบสูงสุด (N_{max}) จำนวน 3 ก้อน โดยจำนวนรอบขึ้นอยู่กับปริมาณการจราจรและอุณหภูมิอากาศสูงเฉลี่ย พร้อมทั้งหาค่าความถ่วงจำเพาะเชิงทฤษฎีค่าสูงสุด (G_{mm}) ที่ปริมาณค่าร้อยละของแอสฟัลต์เริ่มต้น 4) คำนวณหาค่าร้อยละของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพที่ควรใช้จริง (P_{be}) และสัดส่วนฝุ่น



รูปที่ 1 เครื่องบดอัดโรตารีชูเปอร์เพฟ

5) ทำการบดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ปริมาณค่าร้อยละของแอสฟัลต์ที่ใช้จริง (P_{bi} ที่ประเมิน) และค่าร้อยละ ± 0.5 ที่จำนวนรอบสูงสุดและเลือกค่าร้อยละแอสฟัลต์ที่เหมาะสม ตามเกณฑ์ของชูเปอร์เพฟ (ช่องว่างอากาศร้อยละ 4 และอื่นๆ) 6) บดอัดก้อนตัวอย่างโดยใช้ ค่าร้อยละของแอสฟัลต์ที่ใช้จริงที่จำนวนรอบสูงสุดตรวจสอบคุณสมบัติ Volumetric ตามเกณฑ์ชูเปอร์เพฟ ($\%G_{mm@N_{initial}} < \text{ร้อยละ } 89$, $\%G_{mm@N_{maximum}} < \text{ร้อยละ } 98$) โดยค่าปริมาตรของช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (VMA) และช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (VFA) ที่จำนวนรอบออกแบบ (N_{des}) และความหนาแน่นของส่วนผสมที่จำนวนรอบเริ่มต้น (N_{in}) และจำนวนรอบสูงสุด 7) บดอัดส่วนผสมด้วยเครื่องบดอัดโรตารีชูเปอร์เพฟโดยใช้แรงกดต่อก้อนตัวอย่างคงที่ 600 กิโลปาสคาลฐานของเครื่องหมุนด้วยอัตราเร็วคงที่ 30 รอบต่อนาที ตำแหน่งการบดอัดก้อนตัวอย่างทำมุม 1.25 องศาตลอดช่วงการบดอัด สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วัสดุเชื่อมประสาน AC 60/70 (นิยมใช้ในประเทศไทย) และพอลิเมอร์โมดิฟายด์แอสฟัลต์ (PMA) [22] โดยอุณหภูมิของมวลรวมที่ใช้ผสมคือ 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสาน AC60-70 คือ 160 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของวัสดุเชื่อมประสาน PMA คือ 170 องศาเซลเซียส สำหรับอุณหภูมิของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตก่อนเข้าเครื่องบดอัดด้วยเครื่องบดอัดโรตารีคือ 165–170 องศาเซลเซียส 8) นำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเข้าเครื่องบดอัดโรตารีชูเปอร์เพฟ กำหนดจำนวนรอบการหมุน

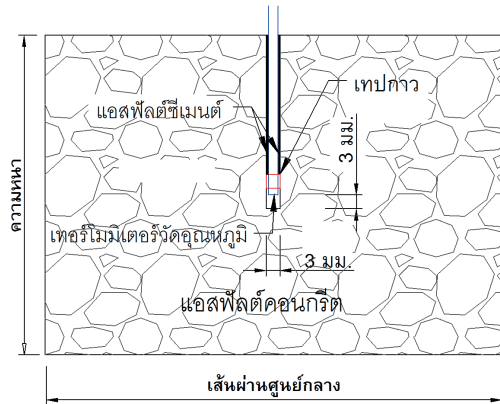
จำนวนรอบเริ่มต้น 9 รอบ จำนวนรอบออกแบบ 135 รอบ และจำนวนรอบสูงสุด 220 รอบ สำหรับอุณหภูมิอากาศสูงเฉลี่ย (Average Design High Air Temperature) ที่ 44 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำหนักบรรทุกทุกเพลาดเดี่ยวสมมูล (Equivalent Single Axle Load, ESAL) 10-30 ล้านเที่ยว (9) หาคความถ่วงจำเพาะและคำนวณช่องว่างอากาศของก้อนตัวอย่าง เกณฑ์การออกแบบส่วนผสมวีซีชูเปอร์เพฟ คือ ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวมมากกว่าร้อยละ 14 ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์อยู่ในช่วงร้อยละ 65–75 ช่องว่างอากาศมีค่าเท่ากับร้อยละ 4 ในส่วนผสมอัดแน่น [23] ที่จำนวนรอบออกแบบ

2.2 การหาระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

การเตรียมก้อนตัวอย่างเพื่อหาระยะเวลาการบ่มทำได้โดยการเจาะก้อนตัวอย่างทั้งหมด 3 ก้อนต่อ 1 ประเภท (ซึ่งงานวิจัยมีทั้งหมด 4 ประเภท) ด้วยสว่านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของก้อนตัวอย่างที่ระยะความลึกครึ่งหนึ่งของก้อนตัวอย่างบวก 3 มิลลิเมตร เสียบเทอร์โมมิเตอร์ลงไปใ้ก้อนตัวอย่างโดยปลายของเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิมีช่องว่าง 3 มิลลิเมตร และทำการอุดช่องว่างระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตกับสายวัดเทอร์โมมิเตอร์ด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ ตามรูปที่ 2 หลังจากนั้นนำตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิ โดยปรับตู้ควบคุมอุณหภูมิให้เริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส และลดเพิ่มอุณหภูมิไปยังระดับ 5, 10, 15, 20, 25, 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียสทั้งหมด 10 ค่าของอุณหภูมิ (ทำการทดสอบทั้งหมด 4 ประเภท)

2.3 การทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบมอดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม

การตรวจสอบความถูกต้องโดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและมอดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างหินปูนกับวัสดุเชื่อมประสาน AC 60-70 และ PMA โดยทดสอบวัสดุเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิด



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิในก้อนตัวอย่าง

และหิน 2 ขนาดคละซึ่งมีขนาดคละในช่วงขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง (Upper Limit และ Lower Limit) เพื่อเปรียบเทียบก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยระยะเวลา 3 ชั่วโมง 40 นาที กับก้อนตัวอย่างที่บ่มด้วยระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผู้วิจัยเตรียมตัวอย่างทั้งหมด 48 ก้อน สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวทาง [24] การทดสอบมีวิธีการดังนี้

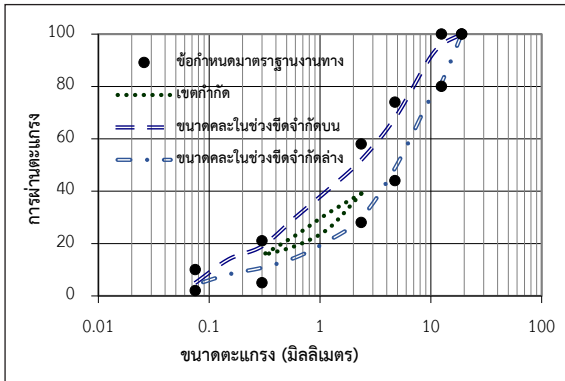
1) วิธีการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength; ITS) เพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุแอสฟัลต์ค้อนกรีตโดยใช้มาตรฐาน ASTM D 6931 ทำการให้น้ำหนักแรงกด (Compression Load) เป็นแบบอัตราคงที่ (Static) โดยน้ำหนักที่กระทำในแนวขนานเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างน้ำหนักกดผ่านแท่งกดมีด้านสัมผัสผิวระนาบเป็นส่วนใหญ่มีขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร โดยก้อนตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 มิลลิเมตร

2) วิธีการทดสอบมอดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Resilient Modulus; MR) พิจารณาถึงคุณสมบัติยืดหยุ่นโดยสมบูรณ์ (Elastic Material) เมื่อได้รับแรงกระทำและถอนแรงกระทำออกจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมโดยทันที ผิวทางมีพฤติกรรมแบบ Visco Elastic Material จะเกิดการคืนตัวแต่ไม่สมบูรณ์ในทันทีทันใด มีระยะเวลาเพิ่มเติมสำหรับให้วัสดุคืนตัวอย่างสมบูรณ์ การทดสอบทำการให้แรงกระทำซ้ำๆ (Repeated Load) แก่วัสดุเพื่อหาค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นจากแรงกระทำในแต่ละรอบหารด้วยค่าความเครียดจากการคืนตัวในแต่ละรอบผลการทดสอบแสดงถึงความต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อถูกแรงกระทำเช่นเดียวกับค่ามอดูลัสยืดหยุ่น การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM D 4123-82 และ BS DD 213:1993 โดยการให้น้ำหนักกดในลักษณะกระทำซ้ำ 60 ครั้ง จนกระทั่งค่าการคืนตัวค่อนข้างคงที่และทดสอบอีก 5 ครั้ง โดยมีการควบคุมการขยายตัวด้านข้างของก้อนตัวอย่าง ให้มีค่าใกล้เคียงกับ 5 ไมโครเมตร มีช่วงระยะเวลาการให้น้ำหนัก (Target Rise Time) เท่ากับ 0.1 วินาที และช่วงระยะเวลาในแต่ละรอบการกระทำของน้ำหนักเท่ากับ 0.8 วินาที รูปแบบของแรงกระทำ (Loading Wave Shape) กำหนดให้เป็นรูป Haversine [25] ซึ่งตัวอย่างจะทำการทดสอบ 2 ครั้ง สำหรับ 1 ตัวอย่าง โดยห่างกัน 90 องศา และค่าที่ได้ต้องมีความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 แล้วนำค่ามาเฉลี่ย

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินปูน

คุณสมบัติของหินปูนในงานวิจัยนี้ใช้สัดส่วนผสม และขนาดคละตามเกณฑ์ข้อกำหนดมาตรฐานงานทางสำหรับผิวทางชั้นบนขนาด 12.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 และมีผลการทดสอบคุณสมบัติของหินปูนดังตารางที่ 1 ซึ่งขนาดคละของหินปูนมีสัดส่วนผสมและขนาดคละไม่ผ่านเขตจำกัด (Restricted Zone) และคุณสมบัติทางกายภาพในงานวิจัยนี้ผ่านข้อกำหนดมาตรฐานงานทางและวิธีซูเปอร์เพพ [26] โดยวัสดุรวมรวมที่มีขนาดใหญ่สุดที่ระบุเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร สำหรับขนาดคละจะมี 2 แบบ คือ ขนาดคละในช่วงขีดจำกัดบน



รูปที่ 3 การผ่านตะแกรงของหินปูนที่ใช้ในการวิจัย [27]

และขนาดตะแกรงในช่วงขีดจำกัดล่าง ดังรูปที่ 3 เป็นไปตามมาตรฐานงานทางและซูเปอร์เฟฟสำหรับวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้ในการผสมคือ ชนิด AC 60-70 และ PMA

การออกแบบส่วนผสม ใช้เกณฑ์ในการออกแบบที่ปริมาณน้ำหนักรวมทุกเฟสได้รวมมูลเท่ากับ 10-30 ล้านเที่ยว ค่าอุณหภูมิอากาศสูงเฉลี่ย 44 องศาเซลเซียส และขนาดหินใหญ่สุดที่ระบุเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร ปริมาณจรรยา และอุณหภูมิอากาศที่แตกต่างกันจะส่งผลให้เกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบปริมาณร้อยละของแอสฟัลต์เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 4.69 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ปริมาณแอสฟัลต์เริ่มต้นเท่ากันทั้ง 2 ส่วนผสม คือ ขนาดตะแกรงในช่วงขีดจำกัดบน และขีดจำกัดล่าง เมื่อבודัดก่อนตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินปูน [27]

คุณสมบัติ	Bin 1			Bin 2	Bin 3	รวม	ข้อกำหนด
	ผ่าน #200	ค้าง #200	รวม				
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (G_A)	2.769	2.745	2.749	2.746	2.733	2.743	-
ความถ่วงจำเพาะรวม (G_p)		2.719	2.728	2.703	2.684	2.707	-
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)		0.74		0.58	0.57		-
ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมละเอียด (ร้อยละ)			45.9				> 45
การสึกหรอ (ร้อยละ)					32.55		< 40
ความเป็นเหลี่ยมมุมของมวลรวมหยาบ (ร้อยละ)				100	100		> 90
ความแบนและความยาวของอนุภาค (ร้อยละ)				8	3		<10
มวลผสมเทียบเป็นทราย (ร้อยละ)			52				> 50
การดูดซึมน้ำของแอสฟัลต์ (ร้อยละ)	AC 60-70 = 0.236					PMA = 0.237	

แอสฟัลต์คอนกรีตจะได้ผลดังตารางที่ 2 สำหรับปริมาณร้อยละของแอสฟัลต์ที่ใช้จริงที่เหมาะสมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบขนาดตะแกรงในช่วงขีดจำกัดบนและช่วงขีดจำกัดล่างคือร้อยละ 4.54 และ 4.75 โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตตามลำดับ

3.2 ผลการออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีซูเปอร์เฟฟ

ช่องว่างระหว่างอนุภาคมวลรวมและช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ของขนาดตะแกรงในช่วงขีดจำกัดบนมีค่าน้อยกว่าขนาดตะแกรงแบบในช่วงขีดจำกัดล่าง จึงทำให้ปริมาณค่าร้อยละของแอสฟัลต์ที่ใช้จริงที่เหมาะสมของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าน้อยกว่าในช่วงขีดจำกัดล่าง และตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าช่องว่างอากาศประมาณร้อยละ 4 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดตามวิธีซูเปอร์เฟฟ ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแสดงดังตารางที่ 2

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มกับอุณหภูมิเป้าหมายของก้อนตัวอย่าง

การทดลองเริ่มโดยปรับอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างให้เป็น 30 องศาเซลเซียส จากนั้นลดหรือเพิ่มอุณหภูมิไปยังระดับ 5, 10, 15, 20, 25, 40, 45, 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-8 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการออกแบบร้อยละของวัสดุเชื่อมประสานโดยวิธีซูเปอร์เฟฟ [27]

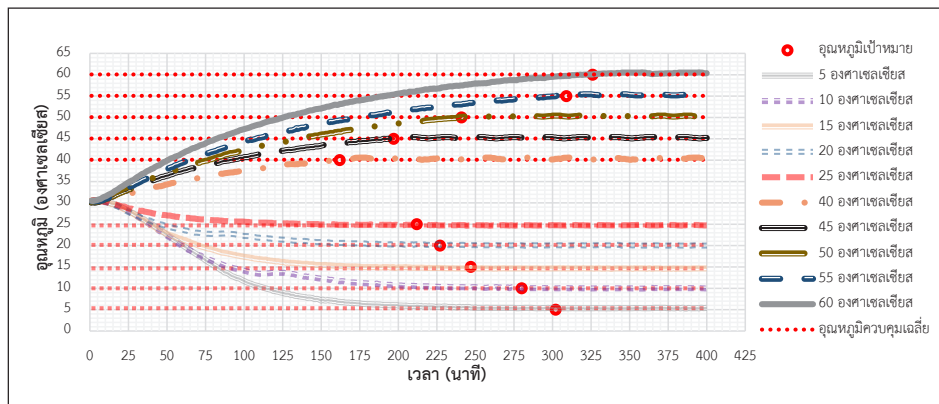
คุณสมบัติ	PMA		AC 60-70		ข้อกำหนด
	Upper1	Lower2	Upper3	Lower4	
P_{bi} ที่ประเมิน (ร้อยละ)	4.54	4.75	4.54	4.75	-
ช่องว่างอากาศ (ร้อยละ)	4.03	3.98	4	4.05	4
ช่องว่างระหว่างอนุภาคของมวลรวม (ร้อยละ)	14.73	14.67	14.72	14.79	>14
ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (ร้อยละ)	71.61	72.75	72.78	72.95	65-75
สัดส่วนฝุ่น	0.99	1.19	0.99	1.19	0.6-1.2
% G_{mm} @ N_{ini}	86.79	85.18	86.56	84.93	< 89
% G_{mm} @ N_{max}	97.29	97.44	97.25	97.78	< 98

* ¹PMA Upper คือแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน PMA กับหินปูนขนาดคละในช่วงขีดจำกัดบน

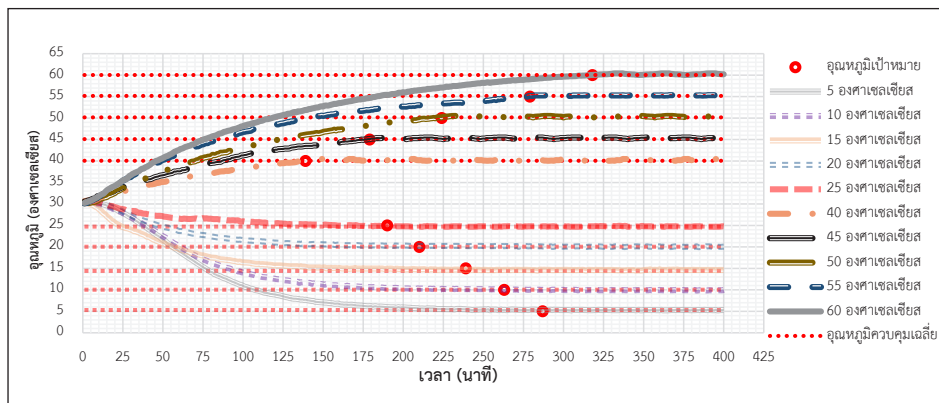
* ²PMA Lower คือแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน PMA กับหินปูนขนาดคละในช่วงขีดจำกัดล่าง

* ³AC 60-70 Upper คือแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน AC 60-70 กับหินปูนขนาดคละในช่วงขีดจำกัดบน

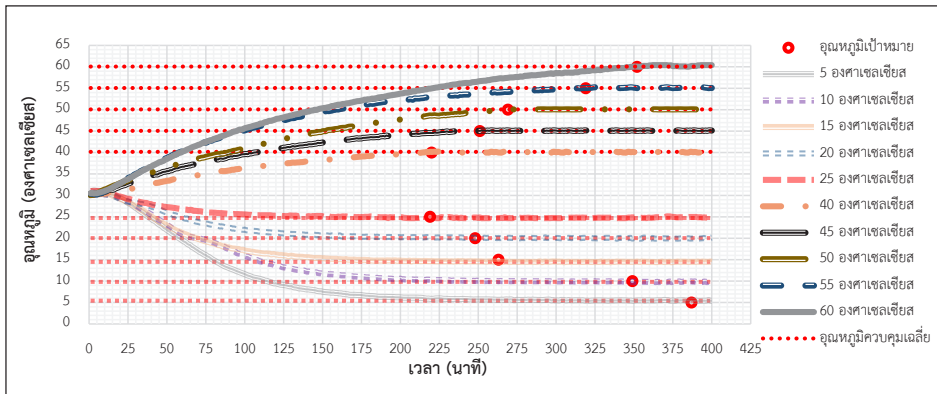
* ⁴AC 60-70 Lower คือแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน AC 60-70 กับหินปูนขนาดคละในช่วงขีดจำกัดล่าง



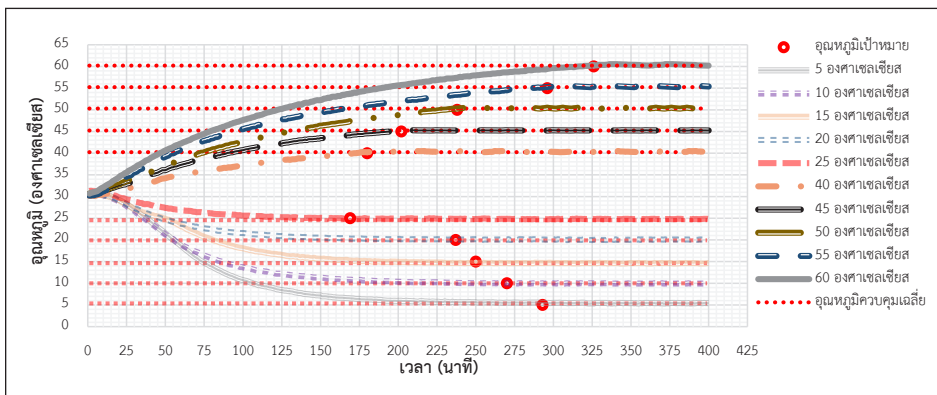
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มและอุณหภูมิก่อนตัวอย่างของ PMA Upper



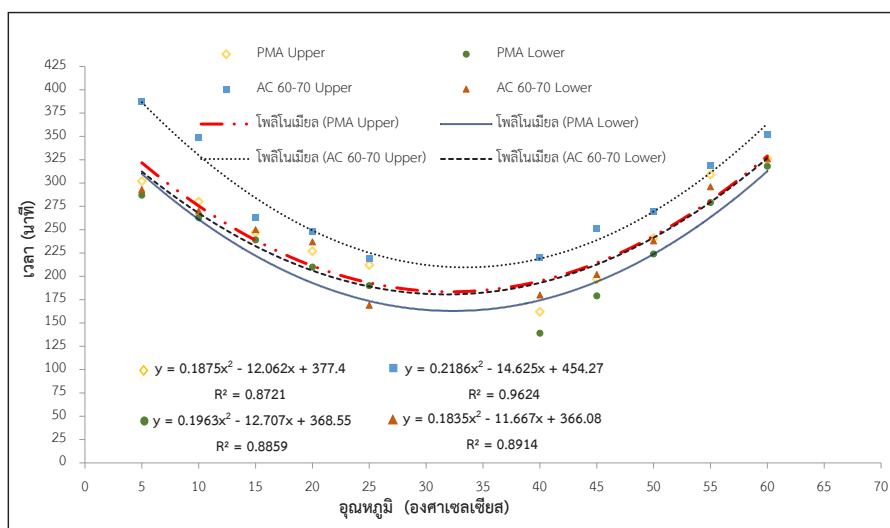
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มและอุณหภูมิก่อนตัวอย่างของ PMA Lower



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มและอุณหภูมิก้อนตัวอย่างของ AC 60-70 Upper



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการบ่มและอุณหภูมิก้อนตัวอย่างของ AC 60-70 Lower



รูปที่ 8 แบบจำลองการหาระยะเวลาการบ่มที่อุณหภูมิเป้าหมายต่างๆ

ตารางที่ 3 ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแอสฟัลต์คอนกรีต
ลดและเพิ่มไปยังอุณหภูมิระดับต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (นาที)			
	PMA		AC 60-70	
	Upper	Lower	Upper	Lower
60	326	318	352	326
55	309	279	319	296
50	241	224	269	238
45	197	179	251	202
40	162	139	220	180
25	212	190	219	169
20	227	210	248	237
15	247	239	263	250
10	280	263	349	270
5	302	287	387	293

การพัฒนาแบบจำลองการทำนายระยะเวลาการบ่ม
ก่อนตัวอย่างเพื่อให้ได้อุณหภูมิเป้าหมายของผิวทางแสดง
ให้เห็นว่า คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของผิวทางที่
แตกต่างกันมีผลต่อระยะเวลาในการลด เพิ่มความร้อนแก่ก้อน
ตัวอย่างเพื่อให้ได้อุณหภูมิเป้าหมาย ดังนั้นแบบจำลองจึงถูก
พัฒนาสำหรับ 4 รูปแบบของแอสฟัลต์คอนกรีต 1) แอสฟัลต์
คอนกรีตที่ผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน PMA กับขนาดคละ
ในช่วงขีดจำกัดบน 2) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่าง
วัสดุเชื่อมประสาน PMA กับขนาดคละในช่วงขีดจำกัดล่าง
3) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน AC
60-70 กับขนาดคละในช่วงขีดจำกัดบน 4) แอสฟัลต์คอนกรีต
ที่ผสมระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน AC 60-70 กับขนาดคละ
ในช่วงขีดจำกัดล่าง ดังสมการที่ (1)-(4)

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อม

ประเภท	ระยะเวลา ในการบ่มอุณหภูมิ	ลำดับที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความหนา (มม.)	แรงกดสูงสุด (กิโลนิวตัน)	ค่ากำลังรับแรงดึงทางอ้อม (เมกะปาสคาล)	p-value
PMA Upper	24 ชั่วโมง	1	99.8	67.4	5.480	0.511	0.306
		2	101.4	65.4	5.569	0.534	
		3	100.6	66.4	5.489	0.523	
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	100.0	66.7	5.807	0.555	
		2	99.9	66.2	5.408	0.521	
		3	100.0	66.7	5.430	0.518	
PMA Lower	24 ชั่วโมง	1	99.8	67.8	4.343	0.408	0.856
		2	100.0	66.6	4.491	0.429	
		3	99.9	67.2	4.417	0.419	
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	99.9	67.4	4.382	0.415	
		2	99.9	67.3	4.185	0.396	
		3	99.9	65.6	4.849	0.471	
AC 60/70 Upper	24 ชั่วโมง	1	100.0	66.8	4.334	0.413	0.677
		2	99.7	67.4	3.684	0.349	
		3	99.8	67.1	4.009	0.381	
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	101.4	65.7	4.249	0.406	
		2	101.4	65.6	4.558	0.436	
		3	101.4	65.7	3.720	0.356	
AC 60/70 Lower	24 ชั่วโมง	1	100.3	67.2	2.587	0.245	0.929
		2	99.9	67.9	2.494	0.234	
		3	100.1	67.5	2.850	0.269	
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	101.3	65.7	2.899	0.277	
		2	99.9	67.6	2.820	0.266	
		3	99.9	66.0	2.521	0.244	



ตารางที่ 5 ผลการทดสอบมอดูลัสคืนตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม

ประเภท	ระยะเวลาในการบ่มอุณหภูมิ	ลำดับที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความหนา (มม.)	ค่ามอดูลัสคืนตัว (เมกะปาสคาล)	ความต่าง (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยมอดูลัสคืนตัว (เมกะปาสคาล)		p-value
PMA Upper	24 ชั่วโมง	1	99.8	67.4	630 588	6.67	609	699	0.793
		2	99.9	67.3	724 696	3.87	710		
		3	99.8	66.7	794 760	4.28	777		
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	99.8	66.20	605 628	3.66	617	692	
		2	100.0	66.70	743 733	1.35	738		
		3	100.0	66.70	689 752	8.38	721		
PMA Lower	24 ชั่วโมง	1	99.9	65.60	738 713	3.39	726	701	0.750
		2	100.0	66.60	677 638	5.76	658		
		3	99.8	67.80	733 707	3.55	720		
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	99.8	67.80	819 785	4.15	802	707	
		2	100.0	66.60	714 683	4.34	699		
		3	99.9	67.37	611 631	3.17	621		
AC 60-70 Upper	24 ชั่วโมง	1	99.9	66.80	743 682	8.21	713	699	0.237
		2	101.4	65.60	733 667	9.00	700		
		3	99.7	67.40	697 674	3.30	686		
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	99.7	67.43	750 758	1.06	754	678	
		2	99.9	67.40	650 604	7.08	627		
		3	99.9	65.70	658 649	1.37	654		
AC 60-70 Lower	24 ชั่วโมง	1	99.9	67.80	782 715	8.57	749	712	0.719
		2	101.0	65.40	684 622	9.06	653		
		3	100.2	67.10	771 698	9.47	735		
	3 ชั่วโมง 40 นาที	1	101.0	65.35	657 690	4.78	674	704	
		2	99.9	66	715 750	4.67	733		
		3	99.9	65.7	711 701	1.41	706		

*PMA Upper

$$T = 0.1875(t_{targ})^2 - 12.062(t_{targ}) + 377.40, R^2 = 0.872 \quad (1)$$

*PMA Lower

$$T = 0.1963(t_{targ})^2 - 12.707(t_{targ}) + 368.55, R^2 = 0.885 \quad (2)$$

*AC 60-70 Upper

$$T = 0.2186(t_{targ})^2 - 14.625(t_{targ}) + 454.27, R^2 = 0.962 \quad (3)$$

*AC 60-70 Lower

$$T = 0.1835(t_{targ})^2 - 11.667(t_{targ}) + 366.08, R^2 = 0.891 \quad (4)$$

โดย T คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มก้อนตัวอย่างมีหน่วยเป็นนาที

t_{targ} คือ อุณหภูมิเป้าหมายมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

3.4 การตรวจสอบความถูกต้องของคุณสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีต

การตรวจสอบแบบจำลองใช้วิธีทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบมอดูลัสคืบตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม โดยเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต 2 แบบ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แบบที่ 1 คือ ระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างก่อนการทดสอบ 24 ชั่วโมง และแบบที่ 2 คือ ระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างก่อนการทดสอบที่ได้จากงานวิจัย

ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4, 5 เมื่อนำผลการทดสอบทั้ง 2 แบบ ไปประเมินด้วย t-test ซึ่งแสดงค่าที่ยอมรับของการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของกลุ่มที่วิเคราะห์ร่วมกัน 2 กลุ่ม ผลการเปรียบเทียบแสดงค่า p -value มากกว่า 0.05 [28] จึงสรุปได้ว่าค่ายอมรับสมมติฐานหลักและค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการศึกษาได้แบบจำลองสำหรับการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบ่มแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับอุณหภูมิเป้าหมายระดับต่างๆ เพื่อจุดประสงค์ในการลดระยะเวลาการทำงานในห้องปฏิบัติการ โดยข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาใช้

ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างก่อนการทดสอบมีตั้งแต่ 3 ชั่วโมงขึ้นไป [12]-[14], 12 ชั่วโมง [15] และ 24 ชั่วโมง [16]-[19] และผู้วิจัยส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในการบ่มตัวอย่าง 24 ชั่วโมง ผลการศึกษาสำหรับอุณหภูมิเป้าหมาย 40 องศาเซลเซียส ได้ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มก้อนตัวอย่างคือ 194.9, 174.4, 219.0, 193.0 นาทีตามลำดับ (สำหรับ PMA Upper, PMA Lower, AC 60-70 Upper, AC 60-70 Lower) ผู้วิจัยทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการทดสอบกำลังรับแรงดึงทางอ้อมและการทดสอบมอดูลัสคืบตัวแบบให้แรงดึงทางอ้อม โดยทดสอบเปรียบเทียบก้อนตัวอย่างที่บ่มโดยใช้ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 40 นาที กับก้อนตัวอย่างที่บ่มโดยใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p -value มากกว่า 0.05)

4. สรุป

ผลการวิจัยนี้ นำเสนอแบบจำลองสำหรับการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการบ่มแอสฟัลต์คอนกรีตสำหรับอุณหภูมิเป้าหมายระดับต่างๆ เพื่อจุดประสงค์ในการลดระยะเวลาการทำงานในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้การใช้ห้องปฏิบัติการเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของแอสฟัลต์คอนกรีตจะขึ้นอยู่กับวัสดุเชื่อมประสานและขนาดคละ โดยวัสดุเชื่อมประสาน AC 60-70 จะใช้ระยะเวลาในการบ่มก้อนตัวอย่างนานกว่าวัสดุเชื่อมประสาน PMA และก้อนตัวอย่างที่มีขนาดคละในช่วงขีดจำกัดบน ใช้ระยะเวลาในการบ่มนานกว่าก้อนตัวอย่างที่มีขนาดคละในช่วงขีดจำกัดล่าง ระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการบ่มก้อนตัวอย่างให้ได้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวทางในประเทศไทย) คือ 3 ชั่วโมง 40 นาที ซึ่งลดลงจาก 24 ชั่วโมง ทำให้การวางแผนใช้ห้องปฏิบัติการมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือจำนวนตัวอย่างและระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ทำให้งานวิจัยนี้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เฉพาะที่อุณหภูมิของผิวทางเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส

งานวิจัยในขั้นต่อไปจะทำการทดสอบ คุณสมบัติทาง



วิศวกรรมอื่นๆ คือ การทดสอบความล้า การต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบถาวร การต้านทานการเกิดร่องล้อ โดยระยะเวลาการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการขั้นต่อไปจะสามารถลดลงได้ เนื่องจากการลดระยะเวลาในการบ่มตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Information Technology and Communication Center, "Length of road network in Thailand by category of road," Office of the Permanent Secretary, Ministry of Transport, Bangkok, Thailand, 2018 (in Thai).
- [2] Z. Hong-liang, S. Man-man, Z. Shi-feng, Z. Yong-qing, and Z. Zeng-ping, "High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt," *Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 323–332, 2016.
- [3] M. Pszczota, J. Judycki, and D. Ryś, "Evaluation of pavement temperatures in Poland during winter conditions," *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 738–747, 2016.
- [4] W. Witayakul, *Asphalt Concrete Technology*. Bangkok: Kasetsart University Press, 2006 (in Thai).
- [5] X. Gong, P. Romero, Z. Donga, and D. Scott Sudbury, "The effect of freeze-thaw cycle on the low-temperature properties of asphalt fine aggregate matrix utilizing bending beam rheometer," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 125, pp. 101–107, 2016.
- [6] U. Sievers and W. Zdankowski, "A numerical simulation scheme for the albedo of city street canyons," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 33, pp. 245–257, 1985.
- [7] J. P. Montávez, J. Jimenez, and A. Sarsa, "A Monte Carlo model of the nocturnal surface temperatures in urban canyons," *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 96, pp. 433–452, 2000.
- [8] D. Van Thanh and C. Pei Feng, "Study on marshall, and rutting test of SMA at abnormally high temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1337–1341, 2013.
- [9] Y. Qin, "Pavement surface maximum temperature increases linearly with solar absorption and reciprocal thermal inertial," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 97, pp. 391–399, 2016.
- [10] Y. Qin and J. Hiller, "Modeling the temperature and stress distributions in rigid pavements: Impact of solar radiation absorption and heat history development," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1361–1371, 2011.
- [11] Jacob E. Hiller, Jeffery, and R. Roesler, "Simplified nonlinear temperature curling analysis for jointed concrete pavement," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, no. 7, pp. 654–663, 2010.
- [12] C. Phromsorn, S. Anuwethsirkiat, P. Silarom, and W. Katenuti, "Properties on indirect tensile strength and resilient modulus of asphalt concrete utilized in Thailand," Department of Highway, Ministry of Transport, Bangkok, Thailand, Report no. RD 204, 2003 (in Thai).
- [13] C. Phromsorn, T. Phaikratok, S. Anuwethsirkiat, P. Silarom, and N. Noimkan, "Evaluation of asphalt concrete mixture properties utilized in Thailand



- by using Superpave criteria,” Department of Highway, Ministry of Transport, Bangkok, Thailand, Report no. RD 205, 2003 (in Thai).
- [14] R. Muniandy and E. Aburkaba, “The effect of type and particle size of industrial wastes filler on Indirect Tensile Stiffness and Fatigue performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 11, pp. 297–308, 2011.
- [15] T. Udomsinprasert, “Application of asphalt concrete mixture using AC 40-50 in ttuck route,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2012 (in Thai).
- [16] K. Jantarachot, “Permanent deformation resistance properties of lab-made asphalt concrete mixtures using granite aggregates,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2008 (in Thai).
- [17] N. Anantachaiyapong, “Permanent deformation resistance properties of lab-made asphalt concrete mixtures using lime stone aggregates,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2009 (in Thai).
- [18] N. Angsuphankosol, “Comparison of rutting resistance of asphalt mixtures using 3 types of asphalt binders by wheel tracker,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2010 (in Thai).
- [19] W. Raihuai, “Fatigue and permanent deformation resistance properties of lab-made asphalt concrete mixtures using basalt aggregates,” M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 2009 (in Thai).
- [20] R. West, J. R. Willis, and M. Marasteanu, “*Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content*,” Transportation Research Board, Washington, DC, NCHRP Report. 752, 2013.
- [21] D. Seward, J. Hinrichsen, and J. Ries, “Structural analysis of aggregate blends using strategic highway research program gyratory compactor,” *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1545, no. 1, pp. 80–88, 1996.
- [22] Y. Yildirim, “Polymer modified asphalt binders,” *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 1, pp. 66–72, 2007.
- [23] R. J. Cominsky, G. A. Huber, T. W. Kennedy, and M. Anderson, *The Superpave Mix Design Manual for New Contraction and Overlays*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, 1994.
- [24] P. Phupathum, “Standard temperature of Department of Highways Department of Thailand,” Department of Highway, Ministry of Transport, Bangkok, Thailand, Report no. RD158, 1995 (in Thai).
- [25] T. Svasdisant and K. Jantarachot, “Compare of engineering properties of asphalt concrete materials uses AC 60/70, AC 40/50 and polymer polymer modified asphalt,” Seminar Department of Highways, Ministry of Transport, Bangkok, Thailand, 2009 (in Thai).
- [26] F. L. Roberts, P. S. Kandhal, E. R. Brown,



- D-Y. Lee, and T. W. Kennedy, *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture design, and Construction*, Maryland: NAPA Research and Education Foundation, 1996.
- [27] K. Jantarachot, "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," *Kasetsart engineering journal*, vol. 25, no. 95, pp. 11-22, 2016 (in Thai).
- [28] L. Lea Williams and K. Quave, "Chapter 7 Comparing two groups: t-tests," *Quantitative Anthropology A Workbook*, Elsevier Inc., 2019, pp. 89-104.