



สมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ Physical Properties of Asphalt Concrete by Marshall Test at Different Temperatures

นิรชร นกแก้ว^{1*} และ ดำรงค์ ปาละกุล²

Nirachorn Nokkaew^{1*} and Damrong Parakul²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก
ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

² ส่วนออกแบบและตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์ สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม
2/486 ถ.ศรีอยุธยา แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, 39 Moo1, Rangsit-Nakhonnayok Road, Klong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110
Thailand

² Bituminous Surface Branch, Bureau of Materials, Analysis and Inspection, Department of Highways,
Ministry of Transport, 2/486 Ayuthaya Road, Phayathai, Bangkok 10400 Thailand

*Corresponding author: nirachorn.n@en.rmutt.ac.th
Telephone Number 02-549-4699, Fax. Number 02-549-3412

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยกำหนดอุณหภูมิการบดทับเท่ากับ 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส ใช้หินปูน 1 แหล่ง เกล็ดชั้น Wearing Course ขนาด 12.5 มิลลิเมตร อัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เท่ากับ 45 : 15 : 20 : 20 โดยมวลของวัสดุรวม ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60-70 เท่ากับร้อยละ 5 ของวัสดุรวม และออกแบบให้มีค่าช่องว่างอากาศใกล้เคียงหรือเท่ากับร้อยละ 4 ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิที่พอยอมรับได้ในการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในสนามอยู่ในช่วงระหว่าง 110 ถึง 180 องศาเซลเซียส ได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.381 ถึง 2.388 กรัมต่อมิลลิเมตร ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 1,790 ถึง 3,200 ปอนด์ ค่าการไหลเท่ากับ 13.8 ถึง 13.2 ค่าช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4.5 ถึง 4.3 ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุรวมเท่ากับร้อยละ 15.1 ถึง 14.9 ค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 70.1 ถึง 71.2 และค่าดัชนีความแข็งแรงเท่ากับร้อยละ 75.5 ถึง 76.6 สมบัตินี้สอดคล้องตามมาตรฐานของกรมทางหลวง

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต, วิธีมาร์แชลล์, ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

ABSTRACT

This article aims to study the physical properties of asphalt concrete by Marshall Test at different temperatures. The compaction temperature was 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 and 220°C. The experimental design detailed in this study used one limestone aggregate source, a nominal size of 12.5 mm (wearing course), mix proportion asphalt concrete 45 : 15 : 20 : 20 by mass of aggregate, grade 60-70 asphalt content (5% by mass of aggregate) and air void 4% by mass of mix. The study

indicated that the acceptable temperature for asphalt concrete compaction in the field were between 110 to 180°C. Moreover, a density, stability, flow, air voids, voids in mineral aggregate and voids filled with bitumen were 2.381 to 2.388 gm/ml, 1,790 to 3,200 lbs, 13.8 to 13.2, 4.5 to 4.3%, 15.1 to 14.9% and 70.1 to 71.2%, respectively. Finally, the strength index was 75.5 to 76.6%. The values of such properties were in accordance with the requirements of the Department of Highways.

Keywords: asphalt concrete, marshall test, asphalt concrete mix design

1. บทนำ

การดำเนินการก่อสร้างปูส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องทำการบดทับในขณะที่ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตร้อนอยู่ โดยมีอุณหภูมิระหว่าง 120-150 องศาเซลเซียส เมื่อบดทับแล้วจะต้องได้ชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความแน่น ความเรียบสม่ำเสมอ ได้ระดับและความลาดตามแบบ ไม่มีรอยแตก รอยเคลื่อนตัว เป็นแอ่ง รอยคลื่น รอยล้อรถบด หรือความเสียหายของผิวชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตอื่น ๆ [1] แต่ในบางครั้งการดำเนินการก่อสร้างปูผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น มักพบอุปสรรคอยู่เสมอ เช่น ฝนตก ระยะเวลาบรรทุกไกล อากาศเย็น เครื่องจักรในสนามเสีย ไม่สามารถทำการบดทับได้ทันที จึงเป็นสาเหตุให้ส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส เมื่อบดทับที่อุณหภูมิต่ำกว่าข้อกำหนดจะทำให้สมบัติส่วนแอสฟัลต์คอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความหนาแน่น ความเรียบสม่ำเสมอ การเชื่อมยึดติดกันระหว่างชั้นผิวทางและชั้นพื้นทางไม่ยึดติดกัน ทำให้เกิดการเคลื่อนตัว (Slip) ของชั้นทางและสาเหตุอื่น ๆ นวพล พรหมจริย์ [2] ได้ศึกษาผลกระทบของสภาพภูมิอากาศต่อพฤติกรรมของทางลาดยาง โดยหาความผันแปรตามฤดูกาลของความแข็งแรงโครงสร้างทางและสมบัติของวัสดุในชั้นทาง ได้แก่ อีลาสติคโมดูลัสของแอสฟัลต์คอนกรีต โมดูลัสชั้นพื้นทางและโมดูลัสกั้นตัวของดินคันทางมีความผันแปรตามฤดูกาลอันเนื่องมาจากอุณหภูมิและความชื้น J. Antonio, R.G. and María, C. [3] ได้ศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการโค้งตัวของผิวทางยึดหยุ่นบนถนนที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เป็นวิธีการหาปัจจัยที่ใช้สำหรับปรับอุณหภูมิของผิวทางสำหรับการโค้งตัวของผิวทาง Flavio, V.S. and Leandro, S.C. [4] ได้ศึกษาการ

จำลองเชิงตัวเลขผลกระทบโดยรวมของความแปรปรวนของอุณหภูมิและน้ำหนัทางกลที่มีผลตอบสนองทางกลของโครงสร้างแอสฟัลต์ ผลที่ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญของการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและ thermo-viscoelasticity ในการออกแบบถนนแอสฟัลต์ Dehnad, M.H., Khodaii, A. and Nejad, F.M. [5] ได้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันประกอบด้วยชนิดของมวลรวม การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์และการก่อสร้าง สภาพการจราจรและสภาพแวดล้อมที่ขึ้นอยู่กับความไวของความชื้นของส่วนผสมแอสฟัลต์ ผลการทดสอบอัตราส่วนของการคืบ (Creep) โมดูลัสยืดหยุ่นสามารถเป็นตัวชี้วัดที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความไวต่อความชื้นที่อุณหภูมิสูง Jimnez, F.P., Martinez, A.H., Miro, R., Barrera, D.H. and Zamorano, L.A. [6] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบโมดูลัสความแข็งและความหนาแน่นของตัวอย่าง SGC และค้อนมาร์แชลล์ที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ส่วนผสมในการศึกษาจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเล็กน้อยส่งผลกระทบต่อสมบัติปริมาตรของส่วนผสมอย่างเป็นนัยสำคัญในค่าโมดูลัสความแข็ง (Stiffness Modulus) ด้วย

ดังนั้นการศึกษานี้จะออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตโดยมีค่าช่องว่างอากาศใกล้เคียงหรือเท่ากับร้อยละ 4 ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตเดียวกันที่มีอุณหภูมิผสมต่างกัน เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินการก่อสร้างปูส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตไว้เป็นแนวทางในการพิจารณาโดยใช้ดุลยพินิจของช่างควบคุมงาน นำไปกำหนดช่วงอุณหภูมิแอสฟัลต์คอนกรีตที่พอยอมรับได้ เพื่อให้ได้งานผิวทางที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้นและทำให้ลดค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมต่อการดำเนินการก่อสร้างปูส่วนผสมแอสฟัลต์

คอนกรีต เช่น ปริมาณการขุดหรือส่วนผสมแอสฟัลต์ คอนกรีตที่มีคุณภาพไม่ได้ตามเกณฑ์กำหนดของงานลดลง นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิต เช่น ค่าวัสดุรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ ค่าน้ำมันเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตและการขนส่ง รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ อาทิเช่น พลังงานที่ใช้ในการขนส่งวัสดุรวมผสมจากโรงงานผสม (Plant) แหล่งผลิตตามธรรมชาติ พลังงานที่ใช้ลำเลียงวัสดุผิวทางที่ใช้เกิดความเสียหายจากกระบวนการผลิตและการดำเนินการก่อสร้างปูส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตพลังงานที่ใช้ในการระเบิดภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อผลิตวัสดุรวมเป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

2.1.1 วัสดุรวมใช้หินปูน (Limestone) จากโรงโม่หิน 1 แห่งคือ โรงโม่หินชุมพรการศึลา ตั้งอยู่ที่ 141 ม.4 ถ.เพชรเกษม ต.ขุนกระโทก อ.เมือง จ.ชุมพร ของโครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 4 สายชุมพร-ระนอง (ตอน 1) จ.ระนอง

2.1.2 แอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้เกรด 60-70 ตามมาตรฐานวิธีการทดลอง [7, 8]

2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

2.2.1 เก็บตัวอย่างวัสดุรวมหินปูนจากถังหินร้อน (Hot Bin) ที่ได้จากการทำงานของโรงงานผสมทั้ง 4 ถัง (4 Bins)

2.2.2หาสมบัติของวัสดุรวมจากถังหินร้อน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ค่าความดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ค่ามวลผสมเทียบเป็นทราย (Sand Equivalent) ค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) ค่าดัชนีความยาว (Elongation Index) ค่าการสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ค่าความคงทน (Soundness) โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเฟส

จำนวน 5 รอบ ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.204/2516 [7, 8] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุรวมจากถังหินร้อน

Description	Total
Bulk Specific Gravity	2.672
Apparent Specific Gravity	2.711
Effective Specific Gravity	2.689
Water Absorption (%)	-
Flakiness Index (%)	16
Elongation Index (%)	41
Asphalt Absorption (%)	0.24
Los Angeles Abrasion (%)	25.2
Soundness (% Wt. Loss), - Aggregate 3/4"	1.4
Aggregate - Fine	3.5
Sand Equivalent (%), - Fine Aggregate	60
- Hot Bin 1	72

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

หาขนาดกะของวัสดุรวม ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.204/2516 [7, 8] ดังตารางที่ 2 และให้มวลรวมผสมมีขนาดกะของวัสดุรวมอยู่ในเกณฑ์กำหนดขนาดกะของวัสดุรวม สำหรับชั้น Wearing Course ขนาด 12.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408/2532 [1] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ขนาดกะของวัสดุรวมหินปูน

Sieve Size	% Passing			
	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin4
1"				
3/4"				100
1/2"			100	13.7
3/8"		100	42.6	2.3
#4	100	28.0	1.2	0.7
#8	81.7	1.3	0.7	
#16	54.1	0.9		
#30	34.6			
#50	22.8			
#100	16.5			
#200	12.9			

ตารางที่ 3 ขนาดตะของวัสดุมวลรวมที่มีผลต่อสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต

ขนาดที่ใช้เรียก มิลลิเมตร	12.5
(นิ้ว)	(1/2)
สำหรับชั้นทาง	Wearing Course
ความหนา มิลลิเมตร	40 - 70
ขนาดตะแกรง	ปริมาณผ่านตะแกรง ร้อยละโดยมวล
1"	
3/4"	100
1/2"	80 - 100
3/8"	-
#4	44 - 74
#8	28 - 58
#16	-
#30	-
#50	5 - 21
#100	-
#200	2 - 10

ทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ (Marshall Test) ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 [7, 8] และใช้เกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Wearing Course ขนาด 12.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408/2532 [1]

การเตรียมก้อนตัวอย่างตามวิธีมาร์แชลล์ เพื่อหาขนาดตะของที่เหมาะสมทั้ง 8 อัตราส่วนผสม เพื่อให้ได้ช่องว่างอากาศเท่ากับร้อยละ 4 ดังตารางที่ 4 โดยใช้ปริมาณแอสฟัลต์เท่ากับร้อยละ 5 โดยมวลของวัสดุมวลรวม และเตรียมตัวอย่างของอัตราส่วนผสมอย่างน้อย 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

ชั้นทาง	
รายการ	Wearing Course
Blows	75
Stability Min N	8006
lb	(1800)
Flow 0.25 mm (0.01 in.)	8 - 16
Percent Air Voids	3 - 5
Percent Voids in Mineral Aggregate (VMA) Min.	14
Stability/Flow Min.	
N/0.25 mm	712
(lb/0.01 in.)	(160)
Percent Strength Index (Min.)	75

การบดทับก้อนตัวอย่างที่อัตราส่วนผสม (Mix Proportion) เดียวกัน ดังตารางที่ 5 และรูปที่ 1 โดยบดทับด้านละ 75 ครั้ง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เท่ากับ 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 และ 220 องศาเซลเซียส ตัวอย่างของอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตผสมที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ T เป็นสัญลักษณ์ของอัตราส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างกันจำนวน 8 อัตราส่วนผสมคือ T80, T100, T120, T140, T160, T180, T200 และ T220 เมื่อก้อนตัวอย่างเย็นลงแล้ว จึงคั่นก้อนตัวอย่างออกจากแบบ (Mold) นำมาหาค่าความหนาแน่น (Density) และนำไปทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) แล้ววิเคราะห์สมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีต คือ ช่องว่างอากาศ (Air Voids) ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids filled with Bitumen, VFB) ค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล และทดสอบหาสมบัติดัชนีความแข็งแรง (Strength Index)

จากรูปที่ 1 นี้ แสดงถึงขนาดตะของวัสดุมวลรวมขนาด 12.5 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาที่ตะแกรงใด ๆ ก็ตาม เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับชั้น Wearing Course ของวัสดุมวลรวมการเรียงขนาดตะของมวลรวมค่อนข้างหาย

ตารางที่ 5 การกำหนดอัตราส่วนผสมเดียวกันของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ

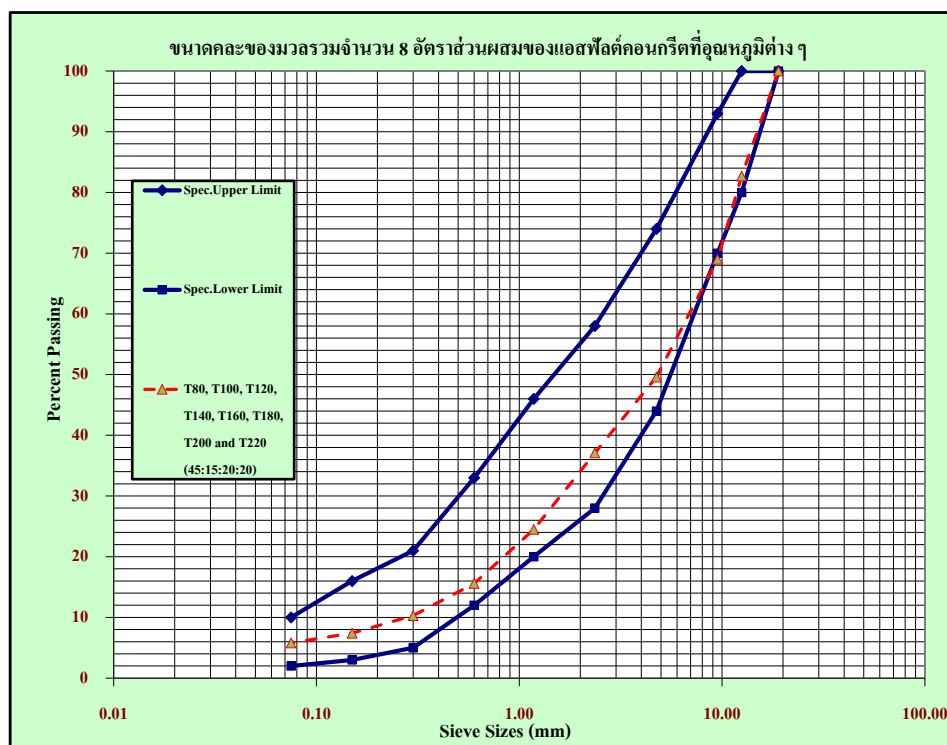
Sieve Sizes		Combined (% Passing)								
		T80	T100	T120	T140	T160	T180	T200	T220	Desired
3/4"		100	100	100	100	100	100	100	100	100
1/2"		82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	82.7	80 - 100
3/8"		69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	-
#4		49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	49.6	44 - 74
#8		37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	37.1	28 - 58
#16		24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	24.5	-
#30		15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	-
#50		10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	5 - 21
#100		7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	-
#200		5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	2 - 10
Mix Proporti on	Bin 1	45	45	45	45	45	45	45	45	
	Bin 2	15	15	15	15	15	15	15	15	
	Bin 3	20	20	20	20	20	20	20	20	
	Bin 4	20	20	20	20	20	20	20	20	

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 สมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ

แสดงถึงค่าความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างวัสดุผสมรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์

เสถียรภาพ ค่าการไหล และดัชนีความแข็งแรง ตามลำดับ ดังตารางที่ 6 สามารถนำมา Plot กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่าง ๆ กับสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 ค่า ดังรูปที่ 2-8

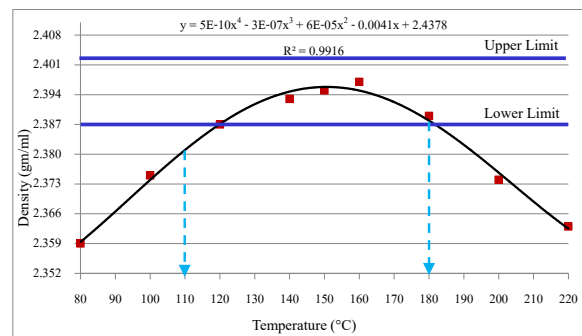


รูปที่ 1 ขนาดผลของวัสดุผสมรวมจำนวน 8 อัตราส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 6 ผลการทดลองสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Description	T80	T100	T120	T140	T160	T180	T200	T220	Tolerant Limit
Density (gm/ml)	2.359	2.375	2.387	2.393	2.397	2.389	2.374	2.363	2.387 - 2.403
Air Voids (%)	5.4	4.8	4.3	4.1	4.0	4.2	4.9	5.3	3.3 - 4.7
VMA (%)	15.9	15.3	14.9	14.7	14.6	14.8	15.4	15.8	> 14
VFB (%)	66.0	68.6	71.1	72.1	72.6	71.6	68.2	66.5	68 - 78
Stability (lbs)	1470	1682	2190	2550	2750	3400	3580	3380	> 1900
Flow (0.01 in.)	16	14	13	12	14	14	13	14	10 - 12
Strength Index	68.8	74.3	76.3	76.6	76.5	75.5	74.4	73.6	> 75

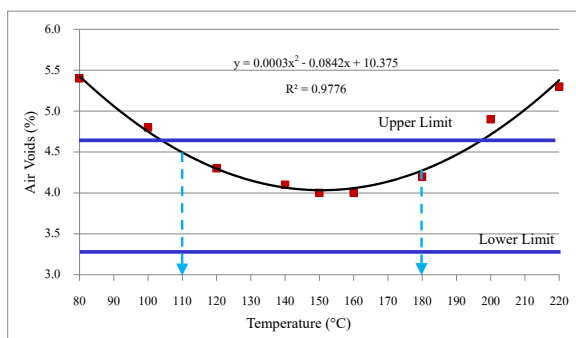
พิจารณาจากรูปที่ 2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสมการ $y = 5E-10x^4 - 3E-07x^3 + 6E-05x^2 - 0.0041x + 2.4378$ (เมื่อ y = ความหนาแน่น และ x = อุณหภูมิต่าง ๆ) และ $R^2 = 0.9916$ ซึ่งมีค่าสูงมาก แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นจากอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สามารถอธิบายได้ว่า ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบดทับตามข้อกำหนดเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส [1] จะได้ความหนาแน่นสูงสุด เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง ฉะนั้นการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในขณะที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์ต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิในการบดทับมากขึ้นจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์จะสูงสุด มีผลทำให้แนวโน้มของความหนาแน่นสูงสุดเช่นกัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเกินกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้การขยายตัวของแอสฟัลต์มีมากขึ้น ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมมีมากขึ้น ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด จึงทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

พิจารณาจากรูปที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสมการ $y = 0.0003x^2 - 0.0842x + 10.375$ (เมื่อ y = ช่องว่างอากาศ และ x = อุณหภูมิต่าง ๆ) และ $R^2 = 0.9776$ ซึ่งมีค่าสูงมาก แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของช่องว่างอากาศจากอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สามารถอธิบายได้ว่า อุณหภูมิในการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตต่ำ จะทำให้ปริมาตรช่องว่างอากาศมาก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบดทับตามข้อกำหนดเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส นั้น [1] จะได้ช่องว่างอากาศต่ำสุดซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของข้อกำหนดของชั้นทาง Wearing Course เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดช่องว่างของอากาศที่มีค่าปริมาตรมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ จะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์ลดลงจึงทำให้ปริมาตรช่องว่างอากาศเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบดทับมากขึ้นจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุ

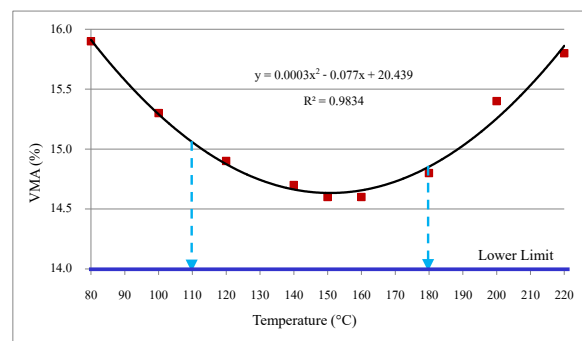
รวมกับแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสม แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์จะมีค่าสูงสุด ทำให้แนวโน้มของช่องว่างอากาศต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของข้อกำหนด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเกินกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้การขยายตัวของแอสฟัลต์มากขึ้นทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมรวมมาก ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ทำให้เกิดปริมาตรช่องว่างอากาศเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

พิจารณาจากรูปที่ 4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างระหว่างวัสดุรวมและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสมการ $y = 0.0003x^2 - 0.077x + 20.439$ (เมื่อ y = ช่องว่างระหว่างวัสดุรวม และ x = อุณหภูมิต่าง ๆ) และ $R^2 = 0.9834$ ซึ่งมีค่าสูงมาก แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของช่องว่างระหว่างวัสดุรวมจากอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำขณะบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตจะทำให้เกิดปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุรวมมาก แต่เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบดทับตามข้อกำหนดเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส [1] จะได้ช่องว่างระหว่างวัสดุรวมต่ำสุดแต่อยู่ในเกณฑ์ของข้อกำหนด เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างวัสดุรวมที่มีค่าปริมาตรมากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้แรงยึดเกาะ

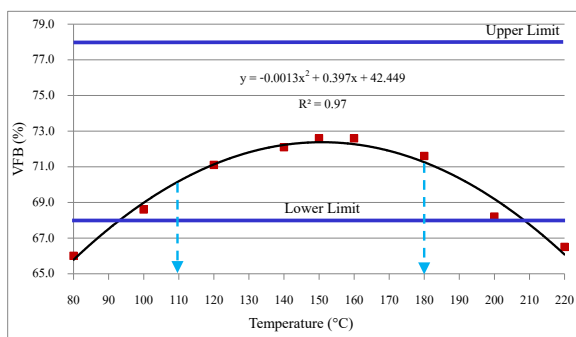
ระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์ลดลงจึงทำให้ปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุรวมเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบดทับมากขึ้นจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์จะมีค่าสูงสุด ทำให้แนวโน้มของช่องว่างระหว่างวัสดุรวมต่ำสุดเช่นกันซึ่งอยู่ในเกณฑ์ของข้อกำหนด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเกินกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้การขยายตัวของแอสฟัลต์มากขึ้นทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมรวมมาก ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ทำให้เกิดปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุรวมเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างระหว่างวัสดุรวมและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

พิจารณาจากรูปที่ 5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์และอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสมการ $y = -0.0013x^2 + 0.397x + 42.449$ (เมื่อ y = ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ และ x = อุณหภูมิต่าง ๆ) และ $R^2 = 0.9700$ ซึ่งมีค่าสูงมาก แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์จากอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สามารถอธิบายได้ว่า ค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ของแอสฟัลต์คอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบดทับตามข้อกำหนดเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส [1] จะได้ค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีค่าสูงสุด เมื่อ

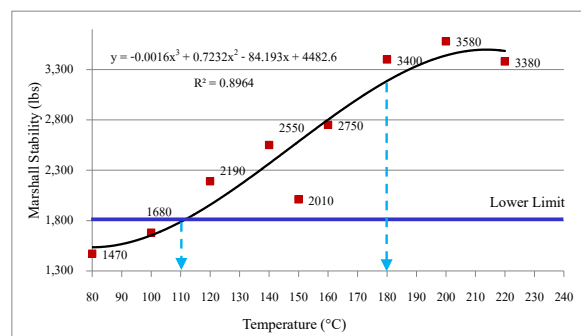
อุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีค่าลดลงตามลำดับ การบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำ จะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ลดลง และปริมาตรช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ลดลงเนื่องจากแอสฟัลต์มีการขยายตัวต่ำ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบดทับมากขึ้นจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากแอสฟัลต์มีการขยายตัวมากขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์จะมีค่าสูงสุดมีผลทำให้แนวโน้มของช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์สูงสุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเกินกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้การขยายตัวของแอสฟัลต์มีมากทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวมทำให้ค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ลดลง ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจมีผลทำให้ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดขาดคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นมีผลต่อค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เช่นกัน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์และอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

พิจารณาจากรูปที่ 6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสมการ $y = -0.0016x^3 + 0.7232x^2 - 84.193x + 4482.6$ (เมื่อ y = ค่าเสถียรภาพ และ x = อุณหภูมิต่าง ๆ) และ $R^2 = 0.8964$ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าเสถียรภาพจากอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สามารถอธิบายได้ว่า ค่า

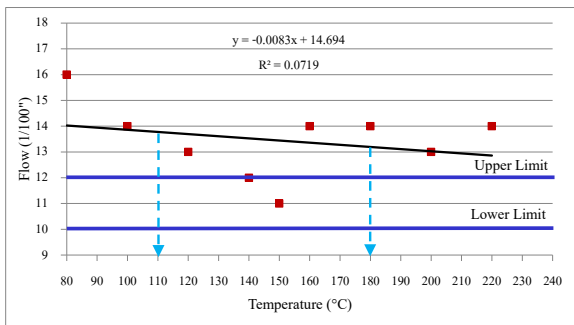
เสถียรภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการบดทับตามข้อกำหนดเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส [1] เส้นแนวโน้มของค่าเสถียรภาพจะมีค่ามากกว่า 2,010 ปอนด์ และเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้เสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส ค่าเสถียรภาพมีแนวโน้มที่จะลดลง การบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์ลดลง การเพิ่มอุณหภูมิในการบดทับมากขึ้นจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมกับแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มอยู่ในช่วง 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส ค่าเสถียรภาพยังคงมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขยายตัวของแอสฟัลต์ยังอยู่ในสภาวะที่มีแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมที่สภาวะเหมาะสมจึงทำให้ค่าเสถียรภาพมีค่ามาก แต่เมื่ออุณหภูมิเกินกว่า 200 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุมวลรวมมีมากทำให้แรงยึดเกาะน้อยลง ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจมีผลทำให้ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด จึงทำให้ค่าเสถียรภาพลดลง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

พิจารณาจากรูปที่ 7 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสมการ $y = -0.0083x + 14.694$ (เมื่อ y = ค่าการไหล และ x = อุณหภูมิต่าง ๆ) และ $R^2 = 0.0719$ ซึ่งมีค่าต่ำ แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าการไหลจาก

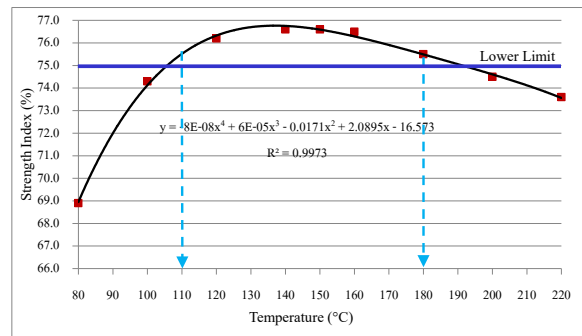
อุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันน้อยมาก สามารถอธิบายได้ว่า การบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์มีการยึดเหนี่ยวในสภาวะหนึ่ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบดทับมากขึ้น จะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์เข้าสู่สภาพการยึดเหนี่ยวที่เหมาะสมจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มเกินกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้การขยายตัวของแอสฟัลต์มีมากทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมมีผลทำให้แนวโน้มของค่าการไหลลดลง ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจมีผลทำให้ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด จึงทำให้ค่าการไหลลดลง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

พิจารณาจากรูปที่ 8 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความแข็งแรงและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีสมการ $y = 8E-08x^4 + 6E-05x^3 - 0.0171x^2 + 2.0895x - 16.573$ (เมื่อ y = ค่าดัชนีความแข็งแรง และ x = อุณหภูมิต่าง ๆ) และ $R^2 = 0.9973$ ซึ่งมีค่าสูงมาก แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงจากอุณหภูมิต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง สามารถอธิบายได้ว่า ดัชนีความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบดทับตามข้อกำหนดเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส [1] จะได้ค่าดัชนีความแข็งแรงสูงสุดเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงมีค่าลดลงตามลำดับ การบดทับแอสฟัลต์

คอนกรีตในขณะที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบดทับมากขึ้นจะทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์เพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดวัสดุรวมกับแอสฟัลต์จะมีค่าสูงสุด มีผลทำให้แนวโน้มของดัชนีความแข็งแรงสูงสุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเกินกว่า 150 องศาเซลเซียส จะทำให้การขยายตัวของแอสฟัลต์มีมากทำให้เกิดระยะห่างระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมมีมากขึ้น ประกอบกับอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจมีผลทำให้ค่าเพนิเทรชันของแอสฟัลต์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด จึงทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความแข็งแรงและอุณหภูมิต่าง ๆ ของแอสฟัลต์คอนกรีต

3.2 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดยพิจารณาเลือกใช้อุณหภูมิที่พอยอมรับได้ในการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในสนามควรอยู่ในช่วงระหว่าง 110 ถึง 180 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อกำหนดการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในสนามอุณหภูมิต้องไม่ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส นั้น [1] จากผลการศึกษาสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 ค่า พอยอมรับได้ ในอุณหภูมิที่ 110 องศาเซลเซียส และไม่ควรมีอุณหภูมิเกิน 180 องศาเซลเซียส ซึ่งสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 7 ค่าคือ ความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างวัสดุรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ เสถียรภาพ ค่าการไหล และค่าดัชนีความแข็งแรง พบว่า

1. ค่าความหนาแน่นมีค่าอยู่ในช่วง 2.381 ถึง 2.388 กรัมต่อมิลลิกรัม ดังรูปที่ 2
2. ค่าช่องว่างอากาศมีค่าในช่วงร้อยละ 4.5 ถึง 4.3 ดังรูปที่ 3
3. ค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมมีค่าในช่วงร้อยละ 15.1 ถึง 14.9 ดังรูปที่ 4
4. ค่าช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีค่าในช่วงร้อยละ 70.1 ถึง 71.2 ดังรูปที่ 5
5. ค่าเสถียรภาพมีค่าในช่วง 1,810 ถึง 3,200 ปอนด์ ดังรูปที่ 6
6. ค่าการไหลมีค่าในช่วง 13.8 ถึง 13.2 ดังรูปที่ 7
7. ค่าดัชนีความแข็งแรงมีค่าในช่วงร้อยละ 75.5 ถึง 76.6 ดังรูปที่ 8

4. สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยเลือกใช้อุณหภูมิในการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อหาสมบัติทั้ง 7 ค่าคือ ความหนาแน่น ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ เสถียรภาพ ค่าการไหล และดัชนีความแข็งแรง สมบัติดังกล่าวมีค่าอยู่ในเกณฑ์ของข้อกำหนดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง จึงทำให้สามารถกำหนดอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดที่พอยอมรับได้ในการบดทับแอสฟัลต์คอนกรีตในสนามระหว่าง 110 ถึง 180 องศาเซลเซียส ข้อมูลนี้ใช้เฉพาะกรณีวัสดุมวลรวมหินปูน จากโรงโม่หินชุมพรการศึลา ตั้งอยู่ที่ 141 ม.4 ถ.เพชรเกษม ต.ขุนกระหิง อ.เมือง จ.ชุมพร ของ

โครงการก่อสร้างทางหลวงหมายเลข 4 สายชุมพร-ระนอง (ตอน 1) จ.ระนอง เท่านั้น

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ควรมีการวิจัยสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้วัสดุมวลรวมจากแหล่งอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้นและใช้วัสดุมวลรวมที่ต่างชนิดกัน เช่น หินบะซอลท์ หินแกรนิต เพื่อนำผลการวิจัยมาเปรียบเทียบไว้เป็นแนวทางแนะนำต่อช่างควบคุมงานเพื่อให้เกิดมั่นใจและความคล่องตัวในการปฏิบัติงานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตให้สะดวกรวดเร็วขึ้น

5.2 หลังจากได้ออกแบบ Job Mix Formula แล้วเสร็จ ควรทำการทดลองสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยทุกครั้ง เพื่อเก็บเป็นข้อมูลในการปรับปรุงแก้ไขอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด

5.3 มีการติดตามผลการปฏิบัติงานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตในระหว่างดำเนินการก่อสร้างเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าข้อกำหนด 120 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาแต่ละสายทางต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งในการวิจัยเรื่องการศึกษาคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557 ผ่านการพิจารณาโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักวิเคราะห์และพัฒนางานทาง กรมทางหลวง. มาตรฐานงานทาง. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ, 2539.
- [2] นวพล พรหมจริย์. ผลกระทบของความผันแปรตามฤดูกาลที่มีต่อการออกแบบและประเมินทางลาดยาง ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [3] Antonio, J.R.G. and María, C. Analysis of the temperature influence on flexible pavement deflection. *Construction and Building Materials*, 2011; 25: 3530-3539.

- [4] Flavio, V.S. and Leandro, S.C. Effect of temperature on the mechanical response of thermo-viscoelastic asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 2012; 30: 574-582.
- [5] Dehnad, M.H., Khodaii, A. and Nejad, F.M. Moisture sensitivity of asphalt mixtures under different load frequencies and temperatures. *Construction and Building Materials*, 2013; 48: 707-707.
- [6] Jimnez, F.P., Martinez, A.H., Miro, R., Barrera, D.H. and Zamorano, L.A. Effect of compaction temperature and procedure on the design of asphalt mixtures using Marshall and gyratory compactors. *Construction and Building Materials*, 2014; 65: 264-269.
- [7] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง. มาตรฐานวิธีการทดลอง. โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์, กรุงเทพฯ, 2543.
- [8] นรชน นกแก้ว. การทดสอบวัสดุการทาง. ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, 2559.