



สมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน

ประสพโชค ชื่นศิริ และ นิรชร นกแก้ว*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9054 9529 อีเมล: nirachorn.n@en.rmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.003

รับเมื่อ 19 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 17 สิงหาคม 2563 ตอรับเมื่อ 16 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 2 พฤศจิกายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน โดยใช้มวลรวมหินปูนจำนวน 1 แหล่ง อัตราส่วนผสมของหินร้อนเท่ากับ 44 : 22 : 18 : 16 โดยมวลของมวลรวม แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้เกรด 60-70 ปริมาณของขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน (PPW) เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยมวลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และลดปริมาณร้อยละการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ลงตามปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 5.00, 4.75, 4.50, 4.25 และ 4.00 โดยมวลของมวลรวม ตามลำดับเตรียมก่อนตัวอย่างโดยใช้วิธีมาร์แชลล์และเกณฑ์ชั้น Wearing Course ขนาด 12.5 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบสมบัติด้านความหนาแน่น เสถียรภาพ ค่าการไหล ช่องว่างอากาศ ช่องว่างระหว่างมวลรวม ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ ดัชนีความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่ามอดุลัสคืนตัว ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบพลวัต และความล้าจากแรงดึงทางอ้อม ผลการทดสอบพบว่า เมื่อใช้ปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 5 และปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 4.75 สมบัติดังกล่าวของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยที่ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมเท่ากับ 790 กิโลปาสกาล ค่ามอดุลัสคืนตัวเท่ากับ 1,012 เมกะปาสกาล ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบพลวัตอยู่ในช่วง 6,144 ถึง 16,606 ไมโครสเตรน และความล้าจากแรงดึงทางอ้อมเท่ากับ 2,131 รอบ

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต ขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม ค่ามอดุลัสคืนตัว ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบพลวัต



Research Article

Engineering Properties of Asphalt Concrete Mixed with Polyethylene Plastic Waste

Prasopchok Chuensiri and Nirachorn Nokkaew*

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9054 9529, E-mail: nirachorn.n@en.rmutt.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.003

Received 19 July 2020; Revised 17 August 2020; Accepted 16 September 2020; Published online: 2 November 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research studied the engineering properties of asphalt concrete mixed with Polyethylene Plastic Waste (PPW) using one limestone aggregate source. The mixing proportion of hot bin was 44 : 22 : 18 : 16 by the mass of aggregate and the asphalt cement used grade 60-70. The amount of PPW used was equal to 0, 5, 10, 15, and 20 percent by mass of asphalt cement. The percentage of asphalt cement decreased by quantity of PPW equal to 5.00, 4.75, 4.50, 4.25, and 4.00 by mass of aggregate, respectively. The specimens were prepared using Marshall method and the 12.5 mm Wearing Course criteria by testing their properties for density, stability, flow, air voids, voids in mineral aggregate, voids filled with bitumen, and strength index. In addition, the specimen properties for indirect tensile strength, resilient modulus, dynamic creep, and indirect tensile fatigue were investigated. The test results showed that when using PPW equal to 5 percent and asphalt cement equal to 4.75 percent, the engineering properties of asphalt concrete mixed with polyethylene plastic waste were within acceptable criteria. Correspondingly, the indirect tensile strength equal to 790 kPa, resilient modulus equal to 1,012 MPa, dynamic creep equal to 6,144 to 16,606 microstrain, and indirect tensile fatigue equal to 2,131 pulses were shown.

Keywords: Asphalt Concrete, Polyethylene Plastic Waste, Indirect Tensile Strength, Resilient Modulus, Dynamic Creep

Please cite this article as: P. Chuensiri and N. Nokkaew, "Engineering properties of asphalt concrete mixed with polyethylene plastic waste," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 724-734, Jul.-Sep. 2022 (in Thai).



1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลาสติกภายในประเทศจำนวนมาก ข้อมูลจากกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมใน พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีขยะปริมาณมากถึง 27 ล้านตัน เป็นขยะพลาสติก 2 ล้านตัน และผู้บริโภคใช้ถุงพลาสติก 4.5 หมื่นล้านใบต่อปี เทียบกับข้อมูลของโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติที่ระบุว่าแต่ละปีทั่วโลกมีการใช้ถุงพลาสติกมากถึง 5 แสนล้านใบ และครึ่งหนึ่งเป็นพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง แต่ละปีมีขยะจากทั่วโลกไหลลงสู่ทะเลกว่า 13 ล้านตัน และกว่าครึ่งหนึ่งหรือราว 8 ล้านตัน เป็นขยะพลาสติกที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง โดยประเทศไทยเป็นอันดับ 6 ของโลก ที่มีการทิ้งขยะพลาสติกลงสู่ทะเลมากที่สุด 1.03 ล้านตัน และพบปัญหาขยะลอยในแม่น้ำ ลำคลอง โดยเฉพาะปัญหาขยะพลาสติกลงสู่ท้องทะเลส่งผลกระทบต่อแหล่งปะการังและสัตว์ทะเล [1] โดยปริมาณขยะพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกๆ ปี ถุงพลาสติกส่วนใหญ่นั้นทำมาจากวัสดุพอลิเอทิลีน (Polyethylene) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า PE มีสมบัติที่ดีมากในการนำมาขึ้นรูปทรงใหม่รวมไปถึงปรับขนาดตามความต้องการได้ง่ายและยังมีความคงทนสูง จึงทำให้ถุงพลาสติกเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในการบรรจุสิ่งของ แต่อย่างไรก็ตาม ถุงพลาสติกโดยส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาติเป็นเวลานาน เมื่อกลายเป็นขยะจะเป็นขยะที่เลื้อยจากกระบวนการคัดแยกไม่สามารถนำมาเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycling Processes) ทำให้ต้องกำจัดโดยการฝังกลบ (Landfills) ซึ่งสิ้นเปลืองงบประมาณ วิกฤติขยะพลาสติกยังเป็นปัญหารุนแรงต้องเร่งแก้ไขอย่างจริงจัง นำไปสู่การเดินหน้าทำแผนการจัดการขยะให้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งได้มีนโยบายเร่งด่วนของรัฐบาลให้กระทรวงคมนาคมพิจารณากำหนดแนวทางการนำขยะพลาสติกมาใช้ในการสร้างถนน โดยให้ในรูปแบบโครงการต้นแบบถนนพลาสติกไร้เชื้อเพลิงตามหลักการ “เศรษฐกิจหมุนเวียน” หรือ “Circular Economy” ของภาคเอกชนมาต่อยอด และปรับใช้กับการดำเนินโครงการต่างๆ ของกระทรวงคมนาคมให้เหมาะสมต่อไป [2] Sultana และคณะ [3] ศึกษาการใช้ขยะพลาสติก เช่น โพรพิลีน (PP)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ ผสมกับแอสฟัลต์เกรด 80/100 ทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์พบว่าค่าแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าที่ดีขึ้น Moghaddam และคณะ [4] พบว่า ปริมาณขุดพลาสติกบดย่อยมีผลต่อเสถียรภาพค่าการไหล ความถ่วงจำเพาะ และค่าความแข็ง ส่วนผสมที่มีขุดพลาสติกบดย่อยมีความทนทานต่อความล้าสูงกว่าส่วนผสมธรรมดาอย่างมีนัยสำคัญ Jan และคณะ [5] พบว่า การผสมด้วยพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต (PET) มีผลกระทบอย่างมากต่อสมบัติของแอสฟัลต์ Sojobi และคณะ [6] การรีไซเคิลขุดพลาสติก PET ใช้ในการก่อสร้างถนนลาดยาง ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60/70 กระบวนการผสมแบบแห้งที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นโมดิฟายด์แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกให้มากขึ้น วุฒินันท์ และคณะ [7] การใช้ขยะถุงพลาสติกขนาดประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ผสมลงในแอสฟัลต์คอนกรีตพบว่า ปริมาณขยะถุงพลาสติกที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำให้ค่าเสถียรภาพ ดัชนีความแข็งแรง ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีต เวชสวรรค์ และคณะ [8] พบว่า ขยะถุงพลาสติกสามารถเพิ่มค่าความเสถียรภาพของถนนแอสฟัลติกคอนกรีตได้สูงกว่าถนนแอสฟัลติกคอนกรีตธรรมดา Ahmad และคณะ [9] พบว่า การใช้ขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ในการก่อสร้างถนน สามารถปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของส่วนผสมโมดิฟายด์แอสฟัลต์เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับผิวทาง Ali และคณะ [10] การนำขยะพลาสติกใช้ในการก่อสร้างผิวทางยืดหยุ่น ขยะพลาสติกขนาด 2.76-4 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพเพิ่มเสถียรภาพและความสามารถในการกันน้ำ Awad และคณะ [11] พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของการใช้ขยะพลาสติกเท่ากับร้อยละ 4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตกับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติก รายงานว่า การใช้ขยะพลาสติกมีผลในเชิงบวกอย่างมากต่อคุณสมบัติของส่วนผสมร้อน Mohamed และคณะ [12] พบว่า การใช้พลาสติกในแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ เพื่อหาค่าเสถียรภาพ ค่าการไหล ความแข็ง

ความต้านทานแรงดึงทางอ้อม และการสูญเสียเสถียรภาพวิธีที่ดีที่สุด คือ การผสมพลาสติกในแอสฟัลต์ก่อนแล้วผสมกับมวลรวม จึงได้มีแนวความคิดทำการทดสอบหาวิธี และปริมาณการนำขยะพลาสติกที่เหมาะสมมาใช้ในการแอสฟัลต์คอนกรีต โดยที่ถนนยังมีประสิทธิภาพเท่าเดิม แต่สามารถช่วยลดขยะในสิ่งแวดล้อมลงได้

โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาขนาดของขยะพลาสติกขนาด 3-5 มิลลิเมตร [7] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนขนาดไม่เกิน 1 ตารางนิ้ว โดยตั้งสมมุติฐานว่าขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีแหล่งกำเนิดจากปิโตรเลียมมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [9] เช่นเดียวกับแอสฟัลต์ จึงศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน แทนที่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยกระบวนการผสมแบบแห้ง [13] เพื่อเป็นแนวทางในการนำขยะประเภทพอลิเอทิลีนไปใช้ในการถนนแอสฟัลต์ได้อย่างเหมาะสมก่อสร้างขึ้นผิวทางให้มีคุณภาพที่ดีได้ตามมาตรฐานกรมทางหลวง ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมลงได้อีกทางหนึ่ง และเป็นการยืดระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดคือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ให้ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้

มวลรวมหินปูนจากโรงโม่หินชุมเงินชุมทอง ตำบลกลางดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ของโครงการก่อสร้างสะพานข้ามจุดตัดทางรถไฟสายทางเข้าเมืองแก่งคอย จังหวัดสระบุรี

แอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้เกรด 60-70 เป็นไปตามคุณลักษณะที่ต้องการของแอสฟัลต์ซีเมนต์ประเภทเพนเทรชัน [14]

ขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน (Polyethylene Plastic Waste; PPW) โดยนำขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนมาทำความสะอาดแล้วตัดย่อยให้ได้ขนาดไม่เกิน 1 ตารางนิ้ว แล้วคัดแยกด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว ค้างตะแกรงเบอร์ 4 (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนที่ผ่านการตัดย่อย

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างมวลรวมหินปูนจากยูนิตร้อน (Hot Bin) ที่ได้จากการทำงานของโรงงานผสมทั้ง 4 ยูนิต (4 Bins) หาสมบัติของมวลรวมจากยูนิตร้อน ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ค่าความดูดซึมน้ำ ค่าดัชนีความแบน ค่าดัชนีความยาว ค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ ค่าการสึกหรอโดยใช้เครื่อง Los Angeles Abrasion ค่าความคงทนโดยใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต จำนวน 5 รอบ ค่ามวลผสมเทียบเป็นทราย ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง [15] โดยตารางที่ 1 แสดงสมบัติของมวลรวมจากยูนิตร้อน

ตารางที่ 1 สมบัติของมวลรวมจากยูนิตร้อน

Description	Total
Bulk Specific Gravity	2.690
Apparent Specific Gravity	2.733
Effective Specific Gravity	2.708
Water Absorption (%)	-
Flakiness Index (%)	27
Elongation Index (%)	22
Asphalt Absorption (%)	0.25
Los Angeles Abrasion (%)	23.7
Soundness (% Wt. Loss), - Aggregate 3/4"	2.3
- Fine Aggregate	6.0
Sand Equivalent (%), - Fine Aggregate	68
- Hot Bin 1	78



2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

หาขนาดคละของมวลรวม ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.204/2516 [15] (ตารางที่ 2) และให้มวลรวมผสมมีขนาดคละของมวลรวมอยู่ในเกณฑ์กำหนดสำหรับชั้น Wearing Course ขนาด 12.5 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408/2532 [16] แสดงดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมหินปูน

Sieve Size	% Passing			
	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin4
3/4"			100	100
1/2"			99.0	5.5
3/8"		100	46.0	0.8
#4	100	54.4	5.4	
#8	78.2	3.0	0.4	
#16	50.3	1.4		
#30	33.6	0.5		
#50	21.7			
#100	15.9			
#200	12.5			

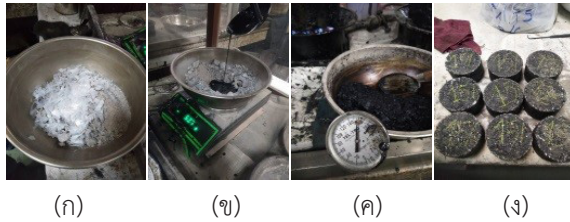
ตารางที่ 3 ขนาดคละของมวลรวมที่มีผลต่อสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต

Nominal Size (mm)	12.5
(in)	(1/2)
Class	Wearing Course
Thickness (mm)	40-70
Sieve Size	%Passing by Mass
3/4"	100
1/2"	80-100
3/8"	-
#4	44-74
#8	28-58
#16	-
#30	-
#50	5-21
#100	-
#200	2-10

ตารางที่ 4 ข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

Class	
Description	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

ทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ ตามมาตรฐานการทดลองที่ ทล.-ท. 604/2517 [15] การเตรียมตัวอย่างเป็นกระบวนการผสมแบบแห้ง [7], [13] ซึ่งเป็นการนำ PPW มาผสมกับอัตราส่วนผสมของหินร้อน 1 : 2 : 3 : 4 เท่ากับ 44 : 22 : 18 : 16 โดยมวลของมวลรวม ใส่แอสฟัลต์ลงผสมไปภายหลัง โดยกำหนดใช้ปริมาณของ PPW เท่ากับร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 โดยมวลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และลดปริมาณร้อยละการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ลงตามปริมาณของ PPW ในขณะที่ทำการผสมเท่ากับร้อยละ 5.00, 4.75, 4.50, 4.25 และ 4.00 โดยมวลของมวลรวม ตามลำดับการเตรียมก่อนตัวอย่าง 3 ก่อน ต่อปริมาณของ PPW ที่แทนที่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์ บดอัดก่อนตัวอย่างทดสอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส (รูปที่ 2), (รูปที่ 3) ทดสอบค่าความหนาแน่น (Density) ค่าเสถียรภาพ (Stability) ค่าการไหล (Flow) ช่องว่างอากาศ (Air Voids) ช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate) ช่องว่างที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids Filled with Bitumen) และดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) รวมทั้งทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength Test) ค่ามอดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus Test) ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรแบบพลวัต (Dynamic Creep) และความล้าจากแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Fatigue Test)



รูปที่ 2 แอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW (ก) มวลรวมร้อนผสม PPW (ข) ตักแอสฟัลต์ลงบนมวลรวมผสม (ค) คลุกเคล้ามวลรวมผสมให้เข้ากัน (ง) ก้อนตัวอย่างหลังผ่านการบดอัดแล้ว



รูปที่ 4 การทดสอบความต้านทานต่อแรงดิงทางอ้อม



รูปที่ 3 การทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดิงทางอ้อม อ้างอิงตามมาตรฐานวิธีทดสอบ AASHTO T 283 [17] และ ASTM D 4867 [18] ใช้อัตราการป้อนน้ำหนักเพื่อให้เกิดการยุบตัวคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างพังทลาย บันทึกค่าน้ำหนักสูงสุด โดยการทดสอบจะทำอุณหภูมิของก้อนตัวอย่างให้ได้ 35 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะนำก้อนตัวอย่างติดตั้งในชุดทดสอบแรงดิงทางอ้อม (รูปที่ 4) แล้วทำการคำนวณค่าความต้านทานต่อแรงดิงทางอ้อม ดังสมการที่ (1)

$$ITS = \frac{2P}{\pi DT} \quad (1)$$

เมื่อ ITS คือ ความต้านทานต่อแรงดิงทางอ้อม (MPa) P คือ ค่าน้ำหนักกดสูงสุด (N) D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm) และ T คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)



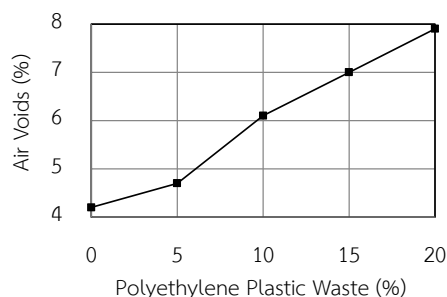
รูปที่ 5 การทดสอบค่ามอดุลัสคืนตัว

การทดสอบค่ามอดุลัสคืนตัว อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 4123 [19] และ AASHTO TP31 [20] โดยก้อนตัวอย่างจะถูกจัดวางในเครื่องทดสอบในลักษณะเดียวกับการทดสอบหาค่าความต้านทานต่อแรงดิงทางอ้อม ค่าน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่าเท่ากับแรงที่ทำให้เกิดความต้านทานแรงดิงทางอ้อมร้อยละ 15 ของค่าความต้านทานต่อแรงดิงทางอ้อมของก้อนตัวอย่าง (รูปที่ 5)

การทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรแบบ Dynamic Creep Test ซึ่งเป็นการทดสอบโดยการป้อนน้ำหนักตามแนวแกนในลักษณะกระทำซ้ำต่อกันตัวอย่างวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน BS DD 226: 1996 [21] การทดสอบจะทำการป้อนน้ำหนักแบบกระทำซ้ำขนาด 100 กิโลปาสกาล (kPa) ด้วยความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ แบ่งเป็นช่วงเวลาในการป้อนน้ำหนัก 0.5 วินาที และช่วงเวลาพัก 1.5 วินาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 การทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่าง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศและปริมาณ PPW



รูปที่ 7 การทดสอบความล้าจากแรงดึงทางอ้อม

การทดสอบความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานการทดสอบของ BS EN 12697-24: 2004 [22]

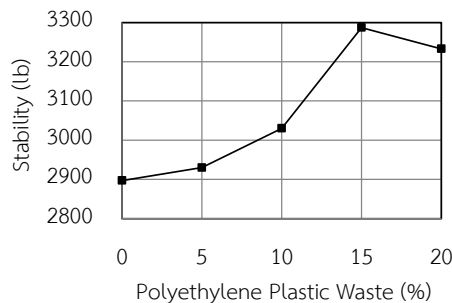
รูปแบบการป้อนน้ำหนักเช่นเดียวกับการหาค่ามอดุลัสคืนตัว โดยให้น้ำหนักกระทำซ้ำที่ควบคุมหน่วยแรงคงที่จนกระทั่งก้อนตัวอย่างเกิดความเสียหาย จำนวนครั้งที่แรงกระทำจนแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดความเสียหาย (NF) คือ อายุความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Life) ของตัวอย่างทดสอบ การทดสอบจะกระทำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยค่าหน่วยแรงที่กระทำอยู่ที่ 300 กิโลปาสกาล (รูปที่ 7)

3. ผลการทดลอง

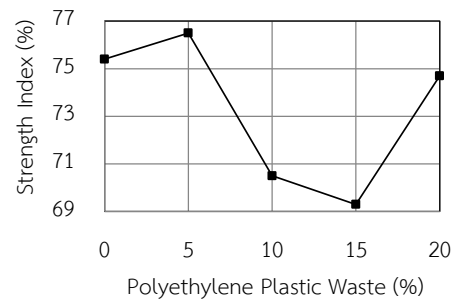
3.1 สมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์

ตารางที่ 5 แสดงสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม

PPW ที่ปริมาณต่างๆ จากกระบวนการผสมแบบแห้งลำดับแรก PPW จะหลอมละลายเคลือบผิวมวลรวมก่อนแล้วจึงผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามลงไป เพื่อให้เกิดการเคลือบมวลรวม เมื่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ลดลงแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นเริ่มลดลงที่ปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 5 และลดลงตามปริมาณ PPW ที่เพิ่มขึ้น [7] จากกระบวนการผสมแบบแห้งทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างมวลรวมเกิดช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 10 ขึ้นไป มีค่าช่องว่างอากาศเกินกว่าข้อกำหนด และปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 5 มีค่าเป็นไปตามข้อกำหนด (รูปที่ 8) ช่องว่างระหว่างมวลรวม (VMA) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PPW ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใส่ลงไปผสมลดลง ทำให้ปริมาตรช่องว่างที่เหลือจากการแทนที่ของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (VFB) น้อยลง จึงส่งผลทำให้ค่าช่องว่างอากาศและ VMA เพิ่มขึ้น [14] ที่ปริมาณ PPW เพิ่มขึ้น แอสฟัลต์ที่เคลือบเม็ดมวลรวมบางลงเป็นผลให้ความเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุเพิ่มขึ้น ค่าเสถียรภาพที่สูงมากเกินไปจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตแข็งเกินไป เกิดความกระด้าง ขาดความยืดหยุ่น ซึ่งอาจทำให้ผิวทางเสียหายได้ (รูปที่ 9) ค่าการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PPW ที่เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 10 และ 15 ขึ้นไป มีค่าลดลง แสดงว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW มีความแข็งมาก และเกิดความเปราะได้ง่าย ค่าอัตราส่วนเสถียรภาพต่อค่าการไหลแสดงถึงพฤติกรรมแบบแข็งเปราะมากขึ้น เมื่อปริมาณ PPW เพิ่มขึ้น ดัชนีความแข็งแรงเป็นค่ากำลังต้านทานต่อการหลุดออกมีค่าลดลงที่ปริมาณ PPW ร้อยละ 10 ขึ้นไป มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่ำกว่าข้อกำหนด



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพและปริมาณ PPW



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแข็งแรงและปริมาณ PPW

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกพอลิโพรพิลีนโดยวิธีมาร์แชลล์

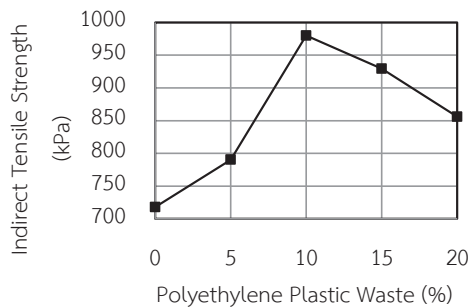
Description	Asphalt Concrete Mixed with Polyethylene Plastic Waste (% by Mass of Asphalt Cement)					Tolerance Limit
	0	5	10	15	20	
Asphalt Cement (AC 60-70) (% by Mass of Aggregate)	5.00	4.75	4.50	4.25	4.00	-
%Polyethylene Plastic Waste (PPW)	-	0.25	0.50	0.75	1.00	-
Total Asphalt Cement (AC 60-70) and Polyethylene Plastic Waste (% by Mass of Aggregate)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	±0.3%
Marshall Density (gm/ml)	2.405	2.392	2.358	2.336	2.312	2.395-2.412
Marshall Air Voids (%)	4.2	4.7	6.1	7.0	7.9	3.5-5.0
Voids in Mineral Aggregate, VMA (%)	14.8	15.3	16.5	17.3	18.2	14 Min
Voids Filled with Bitumen, VFB (%)	71.9	69.3	63.3	59.8	56.4	67-77
Marshall Stability (lb)	2,897	2,930	3,030	3,287	3,233	2,100 Min
Marshall Flow (0.01 in)	13	15	16	14	12	11-13
Marshall Stability/Marshall Flow (lb/0.01 in)	223	195	189	235	269	160 Min
Strength Index (%)	75.4	76.5	70.5	69.3	74.7	75 Min

และปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 5 มีค่าเป็นไปตามข้อกำหนด (รูปที่ 10) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้ขยะ PPW เป็นวัสดุทดแทนในแอสฟัลต์ซีเมนต์ของงานผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ร้อยละ 5 จะเป็นวัสดุช่วยเพิ่มความแข็งแรงต่อส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตได้ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง [16]

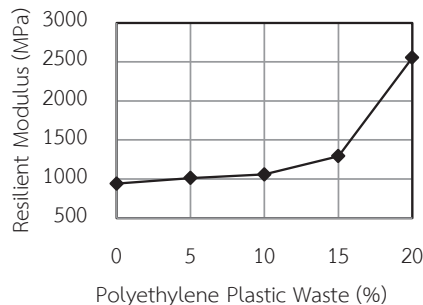
3.2 ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม

รูปที่ 11 แสดงผลความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมกับปริมาณ PPW ของแอสฟัลต์คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 0, 5 และ 10 เนื่องจากการหลอมละลาย PPW บางส่วนเคลือบผิวของมวลรวมและยึด

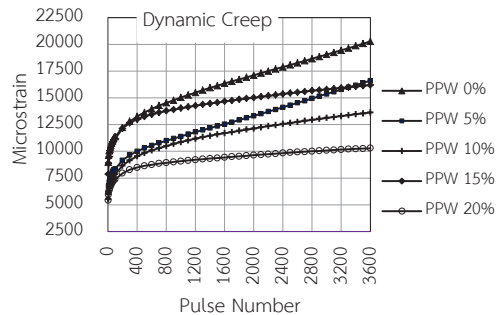
ประสานด้วยแอสฟัลต์ซีเมนต์ และ PPW ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน มวลรวมมีเม็ดเป็นเหลี่ยม ผิวหยาบขรุขระ และมีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เพียงพอต่อการยึดเกาะพื้นที่ผิวของมวลรวม จึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของมวลรวมเพิ่มขึ้น เม็ดวัสดุเคลื่อนที่ผ่านได้ยากกว่าเมื่อน้ำหนักมากขึ้น ส่วนผสมมีความหนืดตัวได้ดีจึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการใช้ขยะพลาสติกร้อยละ 6-8 โดยมวลของแอสฟัลต์ซีเมนต์ มีค่าไม่น้อยกว่า 0.9 เมกะปาสคาล [13] ในทางกลับกันที่ปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 15 และ 20 ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมมีแนวโน้มลดลง



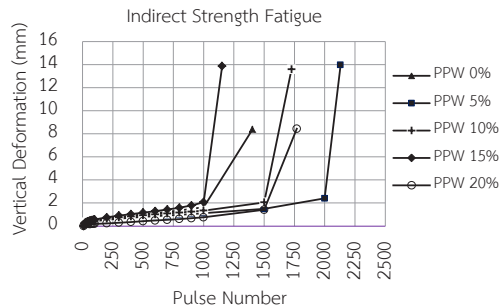
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมกับปริมาณ PPW ของแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสคืนตัวกับปริมาณ PPW ของแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวสะสมกับจำนวนรอบของแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายเนื่องจากความล้ากับจำนวนรอบของแอสฟัลต์คอนกรีต

3.3 ค่ามอดุลัสคืนตัว

รูปที่ 12 แสดงผลค่ามอดุลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณ PPW เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนให้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์ และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเม็ดมวลรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตให้ค่ามอดุลัสคืนตัวเพิ่มขึ้น

3.4 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรแบบพลวัต

รูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW เกิดการยุบตัวสะสมมากที่สุดจนกระทั่งถึงน้อยที่สุด เมื่อรอบการป้อนน้ำหนักร้อยละ 0-3,200 รอบ ปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 0, 15, 5, 10 และ 20 และรอบการป้อนน้ำหนักร้อยละ 3,600 รอบ ปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 0, 5, 15, 10, และ 20 ตามลำดับ แอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW

ร้อยละ 0 เกิดการยุบตัวสะสมมากที่สุด ซึ่งหมายถึง เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรมากที่สุดโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้มากที่สุด เมื่อปริมาณ PPW เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรลดลง แสดงถึงส่วนผสมเหล่านี้นี้มีผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรได้ดีกว่าโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้น้อยลงเช่นกัน ดังนั้น แอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW ร้อยละ 0 จะมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรที่น้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW ร้อยละ 5, 15, 10 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW ร้อยละ 20 มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างถาวรมากที่สุด

3.5 ความล้าจากแรงดึงทางอ้อม

รูปที่ 14 แสดงผลความล้าจากแรงดึงทางอ้อมพบว่าจำนวนครั้งที่แรงกระทำจนแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW ร้อยละ 0, 5, 10, 15 และ 20 เกิดความเสียหาย (NF) เท่ากับ

1,403 2,131 1,726 1,153 และ 1,770 รอบ ค่า N_f ต่ำที่สุด แสดงถึงมีความต้านทานต่อการล้าต่ำที่สุด ซึ่งน่าจะเป็นผลจากค่าเสถียรภาพที่สูงทำให้ส่วนผสมขาดความยืดหยุ่น โอกาสที่ส่วนผสมจะเสียหายเนื่องจากการล้าจึงเป็นไปได้ง่าย ในขณะที่แอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน ร้อยละ 10, 20 และ 5 ให้ค่าความต้านทานต่อการล้าที่สูงตามลำดับ ค่าเสถียรภาพสูงจะมีผลต่อความสามารถในการต้านทานต่อการล้าของส่วนผสมในขณะที่ค่าการไหลใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าเสถียรภาพต่อค่าการไหลสูง จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีลักษณะแข็ง และเปราะง่าย จึงทำให้ความต้านทานต่อการล้าต่ำด้วย

4. สรุป

จากการศึกษาสมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนสามารถสรุปได้ดังนี้ การใช้ PPW เป็นวัสดุแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีลักษณะการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเมื่อทำการผสมแบบแห้ง ปริมาณ PPW ที่เหมาะสมในการนำไปใช้ทดแทนแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 5 ทำให้สมบัติทางวิศวกรรมของแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์เป็นไปตามมาตรฐานกรมทางหลวง

ความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PPW เท่ากับร้อยละ 5 และมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณ PPW เพิ่มขึ้น

โมดูลัสคืนตัวของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ PPW เท่ากับร้อยละ 5 และ 10 สอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงทางอ้อม เมื่อใช้ปริมาณ PPW เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนให้กับแอสฟัลต์ซีเมนต์และเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวม

ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูอย่างถาวรแบบพลวัตของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW ที่รอบการป้อนน้ำหนัก 3,600 รอบเมื่อปริมาณ PPW สูงสุด จะเกิดการยุบตัวสะสมน้อยที่สุดและมีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูอย่างถาวรมากที่สุด

ความล้าจากแรงดึงทางอ้อมของแอสฟัลต์คอนกรีตผสม PPW ที่ปริมาณ PPW ร้อยละ 5 ให้ค่าความต้านทานต่อการ

ล้ามากที่สุด

ควรเลือกใช้ปริมาณขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนขนาดไม่เกิน 1 ตารางนิ้ว แทนที่ในแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยกระบวนการผสมแบบแห้งเท่ากับร้อยละ 5 โดยมวลของแอสฟัลต์ซีเมนต์และใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 4.75 โดยมวลของมวลรวมเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการนำขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนไปใช้ในงานก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตตามมาตรฐานของกรมทางหลวงได้อย่างเหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กรมทางหลวง ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี และส่วนออกแบบและตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์ สำนักวิศวกรรมและตรวจสอบ กรมทางหลวง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและวัสดุในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Plastic waste, global problems. (2018, December). *Bangkokbiznews*. [Online] (in Thai). Available: www.bangkokbiznews.com/news/detail/820466
- [2] The Secretariat of the Council of Ministers. (2019, November). *The propulsion mechanism of abstinence using plastic bags*. [Online]. Available: https://www2.soc.go.th/?page_id=3737&year=2019&month=11
- [3] A. Sultana SK and K. S. B. Prasad, "Utilization of waste plastic as a strength modifier in surface course of flexible and rigid pavements," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 1185–1191, 2012.
- [4] T. B. Moghaddam, M. R. Karim, and M. Solthani, "Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 264–271, 2013.



- [5] H. Jan, M. Y. Aman, S. Khan, and F. Karim, "Performance of hot asphalt mixtures containing plastic bottles as additive," in *Proceeding ISCEE*, 2016, pp. 1–7.
- [6] A. O. Sojobi, S. E. Nwobodo, and O. J. Aladgegboye, "Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete," *Cogent Engineering*, vol. 3, 2016.
- [7] W. Jongjit, O. Somchinuek, and C. Thipakornkiat, "Asphaltic concrete pavement using recycled material," in *Proceeding NCCE*, 2017, pp. 1–9 (in Thai).
- [8] W. Lakas, W. Setthapun, and K. Lucksiri, "Process of asphaltic concrete pavement construction to reduce plastic waste problems in the community," *Academic Journal Uttaradit University*, vol. 12, no. 1, pp. 41–53, 2017 (in Thai).
- [9] A. F. Ahmad, A. R. Razali, and I. S. Razelan, "Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in asphalt pavement," in *Proceeding IOP*, 2017, pp. 1–7.
- [10] S. S. Ali, N. Ijaz, N. Aman, and E. Noor, "Feasibility study of low density waste plastic in non-load bearing asphalt pavement in district faisalabad," *Earth Sciences Pakistan*, vol. 1, no. 2, pp. 17–18.
- [11] A. Awad and F. A. Adday, "Utilization of waste plastics to enhance the performance of modified hot mix asphalt," *International Journal of GEOMATE*, vol. 13, no. 40, pp. 132–139.
- [12] A. K. Mohamed, H. A. Mahdy, and K. A. Kandil, "The use of waste plastics in hot asphalt mixes in Egypt," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 7, no. 3, 2018.
- [13] *Guidelines for The Use of Waste Plastic in Hot Bituminous Mixes (Dry Process) in Wearing Courses*, 1st ed., Indian Roads Congress, Delhi, 2014, pp. 1–13.
- [14] N. Nokkaew, *Highway Materials Testing*, Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand–Japan) 2016 (in Thai).
- [15] Bureau of Materials, *Research and Development, Standard Test Methods*. Bangkok: Express Transportation Organization of Thailand, 2000, pp. 94–184.
- [16] Bureau of Materials, *Research and Development, Standards for Highway Construction*. Bangkok: The Agricultured Co-operative Federation of Thailand., Ltd., 1996, pp. 263–270.
- [17] *Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixture-included damage*, Standard Specification Materials and Methods of Sampling and Testing AASHTO T 283, 2014.
- [18] *Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures*, Annual Book of ASTM Standard ASTM D 4867, 2014.
- [19] *Standard test method for Indirect tension test for resilient modulus for bituminous mixtures*, Annual Book of ASTM Standard ASTM D 4123, 1995.
- [20] *Standard test method for determing the resilient modulus of bituminous mixtures by direct tension*, Standard Specification Materials and Methods of Sampling and Testing AASHTO TP31, 1996.
- [21] *Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined dynamic loading*, British Standards Institution, BS DD 226, 1996.
- [22] *Bituminous mixtures test methods for hot mix asphalt-part 24: Resistance for fatigue*, British Standards Institution, BS EN 12697-24, 2004.