การพัฒนาการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ชนิดผสมร้อนที่ถูกผสมด้วยขยะพลาสติกบนพื้นฐานของการออกแบบส่วนผสมแบบมาร์แชลล์และวิธีการผสมแบบแห้ง

Development of Mix Design for Asphalt Concrete Mixed with Plastic Waste Based on Marshall Mix Design and Dry Mixing Method

โชติชนิต เทียนไชย[1,*] และ พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม[2]

[1,2] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

**Corresponding author; E-mail address: chotchanit_th@cmu.ac.th*

บทคัดย่อ

ขยะพลาสติกได้กลายเป็นปัญหาที่สำคัญในปัจจุบัน การหาแนวทางการนำกลับมาใช้ใหม่ของขยะพลาสติกจึงมีความจำเป็นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยส่วนใหญ่ขยะพลาสติกเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ที่สามารถผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพกับการผลิตแอสฟัลต์ชนิดผสมร้อน อย่างไรก็ตามยังไม่มีแนวทางที่เหมาะสมในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีขยะพลาสติกเป็นส่วนผสม โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งนำเสนอแนวทางในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนโดยวิธีการมาร์แชลที่ถูกผสมด้วยขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีน (Polyethylene, PE) โดยอาศัยวิธีการผสมแบบแห้ง ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำเอาพลาสติกไปผสมกับหินร้อนก่อนที่จะผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ กระบวนการทดสอบประกอบไปด้วยการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนแบบธรรมดาและแบบมีส่วนผสมของขยะพลาสติก โดยอยู่บนพื้นฐานของการออกแบบส่วนผสมแบบมาร์แชลที่ได้รับการปรับปรุง ผลการทดสอบพบว่าการนำขยะพลาสติกเข้าไปผสมในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตในปริมาณที่เหมาะสมนั้น ตามกระบวนการผสมแบบแห้ง ทำให้ได้วัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของพลาสติกที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมแบบมาร์แชลล์ และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสมพลาสติก พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมพลาสติกมีค่าเสถียรภาพมาร์แชล (Marshal stability) สูงกว่าและใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณที่น้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตปกติ ดังนั้นวิธีการออกแบบส่วนผสมแบบมาร์แชลที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อให้สามารถใส่พลาสติกเข้าไปเป็นส่วนผสมและเป็นไปตามข้อกำหนดของการออกแบบส่วนผสมแบบมาร์แชลล์ ผลที่ได้จากโครงการวิจัย จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกบนพื้นฐานการผสมแบบแห้ง ได้ต่อไป

คำสำคัญ: แอสฟัลต์คอนกรีต, ขยะพลาสติก, การผสมแบบแห้ง

Abstract

Presently, plastic waste has become a significant problem. Unavoidably, discovering new methods to recycle those plastic wastes is still needed. Nevertheless, most plastic wastes are thermoplastics that can be effectively mixed in the hot mix asphalt process. However, there is no suitable mix design method for the asphalt concrete mixed with plastic wastes. Based on the dry mixing process, this research aimed to present a modified Marshall mix design for asphalt concrete mixed with (polyethylene, PE) and plastic. The plastic is mixed with hot aggregates before mixing with the hot asphalt cement (binder). This research focused on the study materials of asphalt concrete mixed with plastic (ACP) and asphalt concrete (AC) with no plastic added. The study results showed that following the modified Marshal mix design for ACP, the ACP using PE entirely complies with all Marshall mix design' requirements. Compared to AC, ACP provided higher Marshall stability with lesser cement content. This modified Marshall mix design of ACP based on the dry mixing concept could be used to incorporate plastic wastes into the hot mix asphalt process in the future.

Keywords: Asphalt concrete, Plastic waste, Dry mixing method

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกกำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับขยะพลาสติก รวมทั้งประเทศไทย ดังนั้นปัญหาดังกล่าวต้องได้รับการแก้ปัญหาอย่างจริงจัง จึงเกิดการคิดค้นนวัตกรรมในด้านวิศวกรรมเกี่ยวกับขยะพลาสติกอย่างหลากหลาย [1,2] จากข้อมูลพบว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะพลาสติกชนิดผลิตภัณฑ์พลาสติกใช้แล้วทิ้งต่อปี ประมาณ 1.85 ล้านตัน โดยมีการจัดการขยะพลาสติกด้วยการนำไปทำการฝังกลบ (Land Fill) ประมาณ

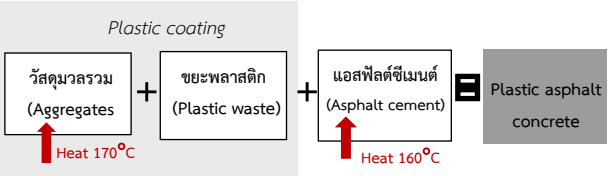
1.192 ล้านตัน นำกลับไปใช้ประโยชน์ประมาณ 0.360 ล้านตัน นำไปเผาในเตาเผาประมาณ 0.165 ล้านตัน และนำไปเป็นเชื้อเพลิง (Refuse Derived Fuel : RDF) ประมาณ 0.133 ล้านตัน [3] โดยขยะพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด แบ่งเป็น ขยะพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) ร้อยละ 19.46 นำไปกำจัดทิ้งด้วยวิธีการทำเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse derived fuel, RDF) และวิธีการฝังกลบ (Land fills) ร้อยละ 80.54 ซึ่งขยะพลาสติกที่ถูกกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ จำแนกตามโครงสร้างทางโพลีเมอร์ (Polymer) ได้ 4 ประเภทหลัก ได้แก่ โพลิเอทิลีน (Polyethylene, PE), โพลีสไตรีน (Polystyrene, PS), โพลีโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terepthalate, PET) พลาสติกที่กล่าวมานี้มีคุณสมบัติทางความร้อนที่เหมือนกันคือ เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เมื่อเจอความร้อนจะมีสถานะเป็นของเหลวและมีสถานะเป็นของแข็งเมื่ออุณหภูมิต่ำลง [4]

โครงสร้างถนนของประเทศไทยในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นถนนผิวเรียบที่ถูกสร้างด้วยผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ประกอบด้วย 2 วัสดุ คือ วัสดุมวลรวม (Aggregates) และแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยทั่วไปผิวทางแอสฟัลต์สามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ ผลิตแบบผสมร้อน (Dry mixing method) ที่ต้องให้ความร้อนวัสดุมวลรวมก่อนนำไปผสมกับแอสฟัลต์ร้อน หรือกล่าวคือเป็นวิธีการผสมภายใต้การใช้อุณหูมิสูงขณะผสม แต่จะสามารถนำมาใช้งานได้เมื่ออุณหภูมิเย็นลง และวิธีการผลิตแบบผสมเย็น (Wet mixing) คือ การนำวัสดุมวลรวมผสมด้วยยางแอสฟัลต์อิมัลชันที่ดำเนินการผสมในอุณหภูมิห้องปกติ จากนั้นสามารถนำไปสร้างชั้นพื้นผิวทาง [5] จากการศึกษาการนำขยะพลาสติกมาใช้ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต ทั้งวิธีการผสมแบบร้อนและแบบเย็นช่วยทำให้ค่าเสถียรของแอสฟัลต์คอนกรีตสูงขึ้น [6,7] แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังไม่ทราบถึงวิธีการนำขยะพลาสติกมาผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างเหมาะสม

โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาขยะพลาสติกประเภทโพลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) มาประยุกต์ใช้ในส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตจากขยะพลาสติกที่มีคุณสมบัติเทอร์โมพลาสติก ให้มีศักยภาพพอที่จะผสมใช้งานได้กับการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนที่ใช้อุณหภูมิสูงขณะผสมและใช้งานได้เมื่ออุณหภูมิเย็นลง โดยใช้เทคนิคการเคลือบวัสดุมวลรวมด้วยโพลีเมอร์ ซึ่งมีขยะพลาสติกเป็นโพลีเมอร์ทำหน้าที่เคลือบและสร้างความแข็งแรงให้กับวัสดุมวลรวม [8] เพื่อพัฒนาการออกแบบแอสฟัลต์ชนิดผสมร้อนที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติก โดยอยู่บนพื้นฐานการออกแบบส่วนผสมตามวิธีการของมาร์แชลชนิดผสมร้อนมาพัฒนาให้ใช้งานได้ ตามมาตรฐานแนวทางวิศวกรรมการทาง เพื่อให้มีความเหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย

2. วัสดุและขั้นตอนทดสอบ

โครงการวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ชนิดผสมร้อนที่ถูกผสมด้วยขยะพลาสติก (Asphalt Concrete mixed with Plastic, ACP) เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสมขยะพลาสติก (Asphalt Concrete, AC) บนพื้นฐานของการออกแบบส่วนผสมแบบมาร์แชลล์ภายใต้วิธีการผสมแบบแห้งตามมาตรฐาน ทล.-ท. 604/2517 (ASTM D-1559) [9] และมาตรฐานข้อกำหนดในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต ทล.-ม. 408/2532 [10]



รูปที่ 1 แนวคิดในการสร้าง "แอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมพลาสติก"

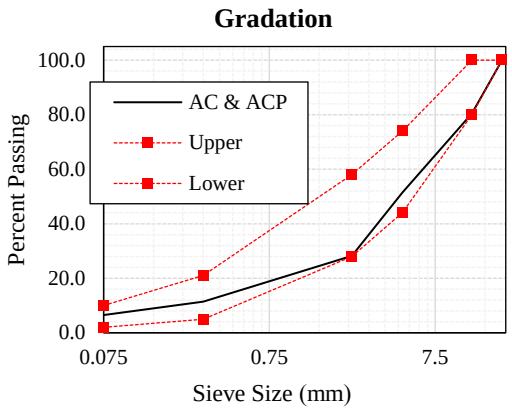
2.1 วัสดุ

2.1.1 วัสดุมวลรวม (Aggregates)

วัสดุมวลรวมเป็นชนิดหินปูน ประกอบไปด้วย วัสดุเม็ดหยาบ (Coarse aggregates) และวัสดุเม็ดละเอียด (Fine aggregates) จากบริษัทพีซีเอ็นคอร์ป จำกัด (มหาชน) จังหวัดเชียงใหม่ โดยมีรายละเอียดวัสดุมวลรวมสูตรส่วนผสมและความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดวัสดุมวลรวม สูตรส่วนผสม และความถ่วงจำเพาะ

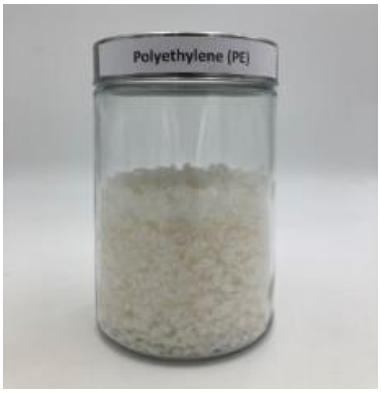
Size (ขนาด)	Bin 1 (ฝุ่น)	Bin 2 (3/8")	Bin 3 (1/2")	Bin 4 (3/4")	Combine (ขนาดคละ)
3/4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2	100.00	100.00	100.00	2.12	80.40
3/8	100.00	100.00	60.85	0.38	76.20
#4	100.00	51.37	4.34	0.28	51.50
#8	84.57	5.14	0.00	0.00	28.20
#16	62.04	0.41	0.00	0.00	19.40
#30	45.52	0.28	0.00	0.00	14.20
#50	36.57	0.26	0.00	0.00	11.40
#100	58.07	0.24	0.00	0.00	8.80
#200	20.73	0.10	0.00	0.00	6.50
อัตราส่วนผสม	31	39	10	20	-
Bulk Specific Gravity	2.589	2.652	2.648	2.661	-
Apparent Specific Gravity	2.737	2.713	2.706	2.706	-



รูปที่ 2 การกระจายขนาดคละของวัสดุมวลรวม

2.1.2 ขยะพลาสติก (Plastic waste)

ขยะพลาสติกที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มาจากขยะฝังกลบ (Land fills) คือ พลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีน (Polyethylene, PE) และเป็นขยะที่มีปริมาณมากกว่าขยะพลาสติกฝังกลบประเภทอื่น ๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกขยะพลาสติกชนิดนี้มาใช้ ซึ่งขยะพลาสติกจะถูกย่อยให้มีขนาดชิ้นละประมาณ 1 เซนติเมตร โดยขยะพลาสติกดังกล่าวจะถูกจัดเตรียมโดยสถาบันพลาสติกแห่งประเทศไทย (Plastic Institute of Thailand) ภายใต้โครงการ Material Flow Analysis (MFA) จากคุณสมบัติทางความร้อนของขยะพลาสติกประเภท PE เป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลแบบโซ่ตรงเป็นสายยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อย เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืด หากอุณหภูมิลดลงจะแข็งตัวตามเดิม เทอร์โมพลาสติกมีรูปร่างไม่แน่นอน สามารถหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงสถานะกลับไปมาระหว่างของแข็งและของเหลวโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และโครงสร้างของโพลิเมอร์เปลี่ยนได้ จึงเหมาะนำมาใช้เป็นส่วนผสมสำหรับโครงการนี้ [4]



รูปที่ 3 ขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีน (Polyethylene, PE)

รูปที่ 4 ขนาดของขยะพลาสติกชิ้นละประมาณ 1 เซนติเมตร

2.1.3 วัสดุเชื่อมประสาน (Binder)

วัสดุเชื่อมประสานของโครงการนี้เป็นชนิดยางมะตอย ที่มีความเป็นโพลีเมอร์จากการกลั่นปิโตรเลียมสำหรับใช้ในงานทาง เรียกว่า แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement) เกรด AC 60/70 ตามมาตรฐานงานทางประเทศไทย จากบริษัทเอเชี่ยน แอสฟัลท์ จำกัด จังหวัดเชียงใหม่ นำมาใช้ในการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในชั้นทางประเภทผิวทาง (Wearing Course) ที่มีวัสดุมวลรวมขนาดใหญ่สุด 12.5 มิลลิเมตร

2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

การผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมขยะพลาสติกจะใช้วิธีการผสมแบบแห้ง (Dry mixing) ตามวิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมาแชลล์ แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ การทดสอบหาปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสม และการทดสอบเพื่อหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม

2.2.1 การทดสอบหาปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสม

จากการทดลองผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ในห้องปฏิบัติการ ตามแนวคิดของโครงการ (รูปที่ 1) มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณขยะพลาสติกที่ผสม โดยอาศัยความร้อนจากวัสดุมวลรวมช่วยหลอมละลายขยะพลาสติก ขยะพลาสติกที่ละลายจะเคลือบพื้นที่ผิววัสดุมวลรวม และนำไปผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ร้อน จากหลักการแทนที่ (Replacement) ของวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) สามารถนำขยะพลาสติกแทนที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นโพลีเมอร์เช่นเดียวกัน จากการทดลองจึงได้สร้างสมการความสัมพันธ์ใหม่ระหว่างขยะพลาสติกต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก (Plastic to Binder Ratio, PBR%) ดังสมการที่ (1)

$$\frac{W.PW}{W.AC} x100 = PBR\% \qquad (1)$$

เมื่อ $W.PW$ = ปริมาณขยะพลาสติกโดยน้ำหนัก
$W.AC$ = ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 6% ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม
$PBR\%$ = อัตราส่วนขยะพลาสติกต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก

ในการดำเนินการทดสอบหาปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสม กำหนดอัตราส่วนขยะพลาสติกต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก (PBR%) ทั้งหมด 5 อัตราส่วน ได้แก่ 0, 2, 4, 6, และ 8 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนละ 2 ตัวอย่าง โดยใช้น้ำหนักขยะพลาสติกที่คำนวนได้จากสมการที่ (1) เพื่อผสมร่วมกับแอสฟัลต์คอนกรีต มีรายละเอียดส่วนผสมระหว่างขยะพลาสติก, แอสฟัลต์ซีเมนต์ และวัสดุมวลรวม ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดส่วนผสมที่ใช้หาปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสม

วัสดุเชื่อมประสาน (เปอร์เซ็นต์)	วัสดุเชื่อมประสาน (กรัม)	ขยะพลาสติกที่เหมาะสม (กรัม)	แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้จริง (กรัม)	วัสดุมวลรวม (กรัม)
4.0	48.00	0.72	47.28	1200.00
4.5	54.00	0.72	53.28	1200.00
5.0	60.00	0.72	59.28	1200.00
5.5	66.00	0.72	65.28	1200.00
6.0	72.00	0.72	71.28	1200.00

ก. ขยะพลาสติกผสมกับวัสดุมวลรวมร้อน ข.วัสดุมวลรวมเคลือบด้วยขยะพลาสติกผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ ค. แอสฟัลต์คอนกรีตผสมขยะพลาสติก

รูปที่ 5 การผสมขยะพลาสติกในตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกตามที่ออกแบบ จะถูกนำไปทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศและอัตราส่วนขยะพลาสติกต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก (PBR) พร้อมนำไปคำนวณหาปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสมโดยใช้สมการที่ (1) ซึ่งปริมาณขยะพลาสติกจากการคำนวนดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการทดสอบในขั้นตอนถัดไป เพื่อทดสอบหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมต่อไป

รูปที่ 6 รูปก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมขยะพลาสติก

2.2.2 การทดสอบเพื่อหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม

การออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตในขั้นตอนนี้ จะดำเนินการทดสอบตามวิธีการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมาแชลล์ ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้จะเริ่มจาก 4 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ จนกระทั่งมีปริมาณเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ ทั้งหมดจำนวน 5 เปอร์เซ็นต์ แอสฟัลต์ซีเมนต์ ทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์ละ 3 ตัวอย่าง ผสมร่วมกับปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสมจากขั้นตอน 2.2.1 โดยมีรายละเอียดส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 3

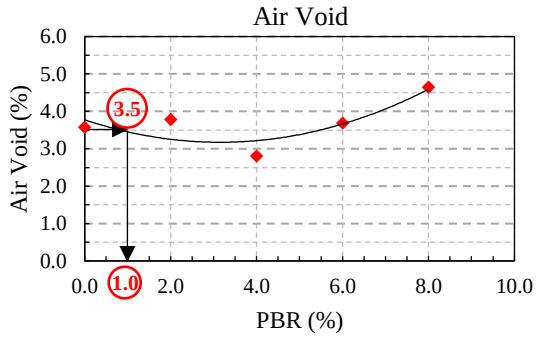
ตารางที่ 3 รายละเอียดส่วนผสมที่ใช้หาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม

PBR (%)	แอสฟัลต์ซีเมนต์ 6% จากสมการที่ (1) (กรัม)	ขยะพลาสติกที่ใช้จริง (กรัม)	แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ใช้จริง (กรัม)	วัสดุมวลรวม (กรัม)
0	72.00	0.00	72.00	1200.00
2	72.00	1.44	70.56	1200.00
4	72.00	2.88	69.12	1200.00
6	72.00	4.32	67.68	1200.00
8	72.00	5.76	66.24	1200.00

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์

3.1 การทดสอบหาปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสม

จากการทดสอบหาปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสม ได้ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศ (Air Void) กับอัตราส่วนขยะพลาสติกต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก (PBR) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า ณ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ เท่ากับ 3.5 จะมีค่าอัตราส่วนขยะพลาสติกต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก (PBR%) เท่ากับ 1.0 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณน้ำหนักขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีน (Polyethylene, PE) ที่เหมาะสมของโครงการนี้เท่ากับ 0.72 กรัม

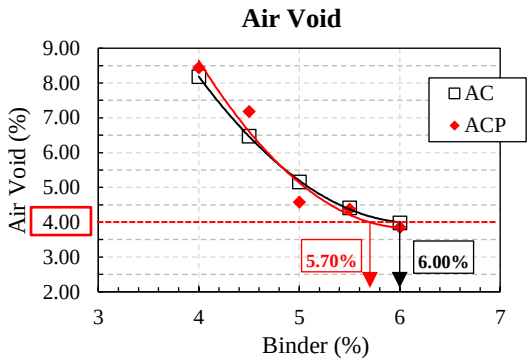


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Air Void กับ PBR

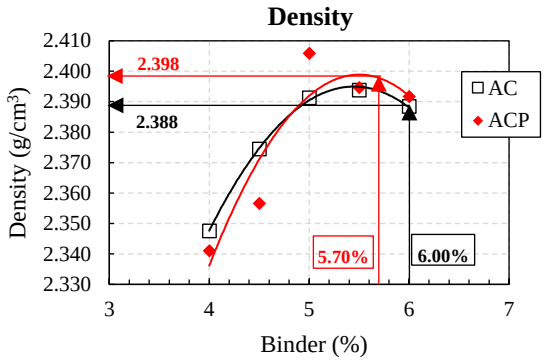
3.2 การทดสอบเพื่อหาปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสม

ผลการทดสอบการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลท์คอนกรีตตามวิธีมาแชลล์ ทั้งส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมีส่วนผสมขยะพลาสติก (ACP) และแบบธรรมดา (AC) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศ (Air Void) กับวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) ดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศจะลดลงตามเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น จากเกณฑ์การ

ออกแบบตามมาตรฐานกรมทางหลวงของประเทศไทยใช้เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศเท่ากับ 4 ทำให้ทราบค่าเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของสูตรแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมีส่วนผสมขยะพลาสติก มีค่าเท่ากับ 5.70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาที่มีค่าเท่ากับ 6.00 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าความหนาแน่น (Density) ของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งสองสูตรมีค่าเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง ณ จุดหนึ่ง ค่าความหนาแน่นจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งค่าความหนาแน่นของตัวอย่างที่มีเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมีส่วนผสมขยะพลาสติก (5.70 เปอร์เซ็นต์) และส่วนผสมแบบธรรมดา (6.00 เปอร์เซ็นต์) จะมีค่าความหนาแน่น เท่ากับ 2.398 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และเท่ากับ 2.388 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ



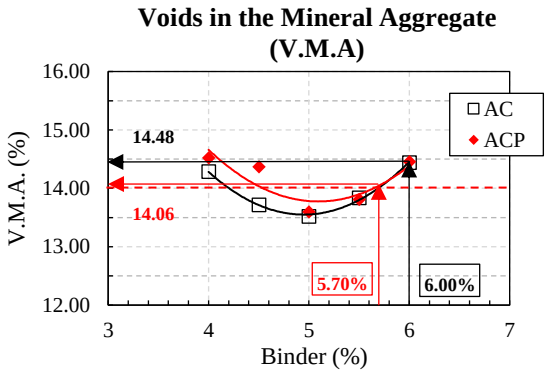
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Binder กับ Air Void



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Binder กับ Density

จากปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสมนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (V.M.A.) กับวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) พบว่าในช่วงแรกค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมจะค่อย ๆ ลดลงและเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น โดยกราฟมีลักษณะเป็นพาราโบลาหงาย (รูปที่ 10) มีค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมต่ำสุดที่ค่าวัสดุเชื่อมประสาน 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งแบบมีส่วนผสมของขยะพลาสติก (5.70 เปอร์เซ็นต์) และแบบธรรมดา (6.00 เปอร์เซ็นต์) มีค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมของตัวอย่างสูตรผสมทั้งสองแบบมีค่าเท่ากับ 14.06 เปอร์เซ็นต์ และ 14.48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับซึ่งผลดังกล่าวผ่านเกณฑ์การออกแบบตามข้อกำหนดวิธีมาร์แชลล์ คือต้องมีค่าช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมมากกว่า 14 เปอร์เซ็นต์

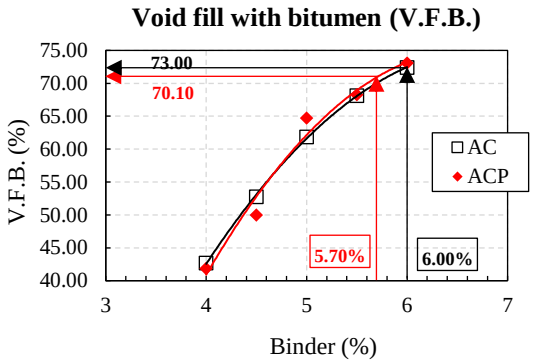
เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมดังกล่าวมาพิจารณาร่วมกับช่องว่างอากาศที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (V.F.B.) ตัวอย่างทั้งสองสูตรมีแนวโน้มของความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 11 ค่าช่องว่างอากาศที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน โดยตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมขยะพลาสติกจะมีค่าช่องว่างอากาศที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาในช่วงเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสาน 4.00 ถึง 4.60 แต่จะมีค่าที่สูงกว่าหลังจาก 4.60 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้นไป จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นพิจารณาร่วมกับเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมขยะพลาสติก (5.70 เปอร์เซ็นต์) และแบบธรรมธรรมดา (6.00 เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นจะมีค่าช่องว่างอากาศที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ของแบบผสมขยะพลาสติก เท่ากับ 73.0 เปอร์เซ็นต์ และแบบธรรมดา เท่ากับ 70.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



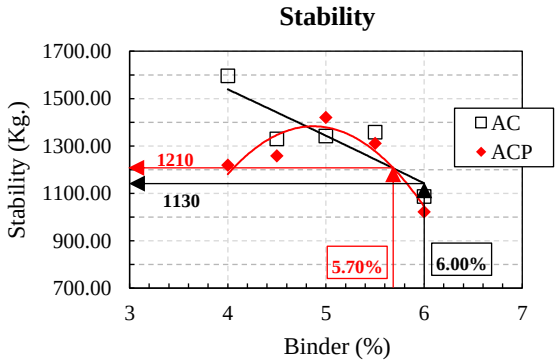
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Binder กับ V.M.A.

ผลจากการทดสอบค่าเสถียรภาพ (Stability) และค่าการไหล (Flow) นำมาสร้างความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสาน (Binder) รูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกับความเสถียรภาพ (Stability) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมขยะพลาสติกจะมีค่าเสถียรภาพต่ำและเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้น จนกระทั่งให้ค่าสูงสุดที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน 5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นถึงแม้จะเพิ่มปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน แต่ค่าความเสถียรภาพกลับลดลง โดยกราฟความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นพาราโบลาคว่ำ (รูปที่ 12) สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าเสถียรภาพสูงสุดและลดลงตามเปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่เปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบมีส่วนผสมขยะของพลาสติกมีค่าเสถียรภาพเท่ากับ 1210 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าเสถียรภาพสูงกว่าที่เปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดาที่มีค่าเท่ากับ 1130 กิโลกรัม

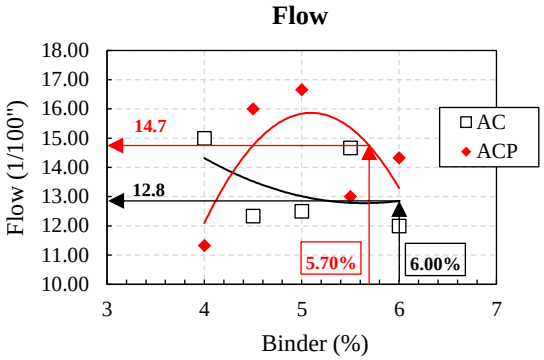
รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุเชื่อมประสาน (Binder) กับค่าการไหล (Flow) สำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตแบบผสมขยะพลาสติกพบว่าค่าการไหลจะเพิ่มสูงขึ้นตามวัสดุเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งปริมาณวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นค่าการไหลจะมีค่าลดลงแม้เพิ่มปริมาณวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งมีแนวโน้มเป็นลักษณะพาราโบลาคว่ำ (รูปที่ 13) เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุเชื่อมประสานกับความเสถียรภาพ (รูปที่ 12) แตกต่างจากค่าการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา ที่มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของวัสดุเชื่อมประสาน และมีค่าการไหลสูงสุดที่ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์วัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งแบบมีส่วนผสมของขยะพลาสติกมีค่าการไหลเท่ากับ 14.7 และแบบธรรมดาเท่ากับ 12.8 ซึ่งทั้งสองแบบมีค่าการไหลอยู่ในช่วงเกณฑ์การออกแบบตามข้อกำหนดของวิธีมาร์แชลล์ คือช่วง 8-16



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Binder กับ V.F.B.



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Binder กับ Stability



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Binder กับ Flow

4. บทสรุป

จากการทดลองเพื่อพัฒนาการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตชนิดผสมร้อนโดยวิธีการมาร์แชลที่ถูกผสมด้วยขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีน (Polyethylene, PE) โดยอาศัยวิธีการผสมแบบแห้งตามวัตถุประสงค์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. สมการอัตราส่วนขยะพลาสติกต่อแอสฟัลต์ซีเมนต์โดยน้ำหนัก (PBR %) ที่ได้จากการทดสอบ พบว่ามีศักยภาพพอทำให้ทราบปริมาณขยะพลาสติกที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์ชนิดผสมร้อนที่ถูกผสมด้วยขยะพลาสติกบนพื้นฐานของการออกแบบส่วนผสมแบบมาร์แชลล์และวิธีการผสมแบบแห้งได้ และผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวงของประเทศไทย

2. ปริมาณวัสดุเชื่อมประสานที่เหมาะสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติก เท่ากับ 5.70 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม ประกอบด้วย แอสฟัลต์ซีเมนต์ 5.64 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม และขยะพลาสติก 0.06 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม ภายใต้เกณฑ์การออกแบบกรมทางหลวงที่เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศเท่ากับ 4

3. ค่าเสถียรภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของขยะพลาสติกมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตแบบธรรมดา (ไม่ได้ผสมขยะพลาสติก) 7.08 เปอร์เซ็นต์

4. การนำขยะพลาสติกเข้ามาใช้ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตสามารถช่วยลดปริมาณการใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ลงได้ 1.06 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท พีซีเอ็น คอร์ป จำกัด (มหาชน) และสถาบันพลาสติกแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์วัสดุมวลรวมและตัวอย่างขยะพลาสติกประเภทโพลีเอทธิลีนมาใช้สำหรับโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Thushari, I., Vicheanteab, J., & Janjaroen, D. (2020). Material flow analysis and life cycle assessment of solid waste management in urban green areas, Thailand. Sustainable Environment Research, 30(1), 1-17.

[2] Bureecam, C., Chaisomphob, T., & Sungsomboon, P. Y. (2018). Material flows analysis of plastic in Thailand. Thermal Science, 22(6 Part A), 2379-2388..

[3] กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2563). แผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะพลาสติก ระยะที่ 1, หน้า 15

[4] นางสาวอัลวานีย์ สติรักษ์. (2564). เทอร์โมพลาสติก. สืบค้น 25 พฤษพาคม 2565, จาก https://www.nsm.or.th/nsm/th/node/5669

[5] Kama Koti Marg. (2013). *Guidelines for the use of waste plastic in hot bituminous mixes (dry process) in wearing courses*. India :India INDIAN ROADS CONGRESS.

[6] El-Naga, I. A. and M. Ragab (2019). "Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures." Construction and Building Materials 219: 81-90.

[7] Almeida, A., et al. (2020). "Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing." Construction and Building Materials 232.

[8] Vasudevan, R., Sekar, A. R. C., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way–Application in construction of flexible pavements. Construction and Building Materials, 28(1), 311-320.

[9] กรมทางหลวง (2517). มาตรฐานงานทาง, สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.

[10] กรมทางหลวง (2532). มาตรฐานงานทาง, สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง, กรมทางหลวง, กรุงเทพฯ.