

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแอสฟัลต์ผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว

Study of the mechanical properties of asphalt and old motorcycle inner tube mixture

อังคณา พันธุ์หล่อ¹ และสมศักดิ์ เอื้ออัสมาสัย²
ank_pun@yahoo.com¹, somsaku@yahoo.com²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแอสฟัลต์ผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้อัตราส่วนผสมของยางในต่อน้ำหนักรวมของส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 5 แล้วนำไปทดสอบ 1) ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน 2) ค่าจุดอ่อนตัว และ 3) ค่าความยืดดึง จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อเพิ่มส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์มากขึ้น จะทำให้ค่าการจมตัวของเข็มลดลง อุณหภูมิของจุดอ่อนตัวของวัสดุผสมสูงขึ้น และค่าความยืดดึงลดลง ในส่วนของการนำไปใช้งานพบว่าค่าอัตราส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ที่ควรใช้คือ ร้อยละ 1.5 ซึ่งมีค่าการยืดดึงเป็นไปตามมาตรฐานที่ยอมให้

คำสำคัญ: วัสดุแอสฟัลต์ ยางในรถจักรยานยนต์

Abstract

This research studied the mechanical properties of asphalt and old motorcycle inner tube mixture, whereas the percentage of the inner tube 0-5 % in compare with the total weight of the mixture has been assigned. The mixture has been tested for 1) penetration 2) softening point and 3) ductility. The laboratory results show that by increasing the percentage of the inner tube, the penetration is increased. The softening point is decreased and the ductility is reduced as well. For working, it is recommended that the old inner tube 1.5% should be used, because it can provide the standard requirement for the ductility test.

Keywords: asphalt, old motorcycle inner tube

¹⁻² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

1. บทนำ

จากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้ความต้องการในการใช้รถจักรยานยนต์ในประเทศไทยมีจำนวนมากถึง 1,199,152 คันต่อปี และมีความต้องการใช้ยางในล้อจักรยานยนต์ประมาณ 4,088,757 เส้นต่อปี และยางในที่ใช้แล้วนั้นก็มีจำนวนสูงถึง 3,404,478 เส้นต่อปี ซึ่งทำให้เกิดปัญหาขยะจากยางในรถจักรยานยนต์เก่าเพิ่มขึ้น โดยขยะพวกนี้จะใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานหลายปี ทำให้ยากต่อการกำจัด [1]

แนวคิดในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุแอสฟัลต์ ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งมีความยืดหยุ่น ให้มีความต้านทานต่อการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) และทนทานต่อความเสียหายของการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Cracking) โดยการผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้วเข้ากับแอสฟัลต์ เพราะยางในรถจักรยานยนต์นั้นมีส่วนผสมของยางพารา ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมได้ [2] นอกจากนี้แล้วในการที่จะหลอมยางในรถจักรยานยนต์นั้นต้องใช้อุณหภูมิที่สูง จึงสามารถช่วยป้องกันการเสียรูปอย่างถาวร ได้ ทั้งนี้งานวิจัยนี้กำหนดให้มีการผสมแอสฟัลต์กับยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้อัตราส่วนผสมของยางในต่อน้ำหนักรวมของส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 5 โดยพิจารณาจากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีดังนี้

ธนาพร (2544) ได้ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยผงยางล้อรถที่ใช้แล้วแล้ว [3] โดยวิธีการผสมแบบเปียกและแบบแห้ง ผลการวิจัยพบว่า วิธีการผสมแบบเปียกจะเป็นการใส่ผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ก่อน แล้วจึงผสมกับมวลรวมร้อน ซึ่งจะได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดเมื่อใช้ปริมาณผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมในอัตราส่วนร้อยละ 15 ถึง 20 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ และวิธีการผสมแบบแห้งจะเป็นการใส่ผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมกับมวลรวมร้อนก่อน แล้วจึงผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดเมื่อใช้ปริมาณผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมในอัตราส่วนร้อยละ 1 ถึง 3 ของน้ำหนักมวลรวม จากการ

เปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพกับแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางล้อที่ใช้แล้วจะมีคุณสมบัติดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา

ฉัตรวรรณ สุทธิรักษ์ และยรรยง เพ็ญจันทร์ (2552) ได้ศึกษายางรถยนต์เก่ามาผสมกับยางมะตอยเพื่อทำแอสฟัลต์ซีเมนต์ [4] ผลการวิจัยพบว่า ยางมะตอยที่มีการเติมผงยางรถยนต์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน 0.95:0.05, 0.90:0.10, 0.85:0.15, 0.80:0.20 โดยน้ำหนัก และที่ขนาดต่างกันคือ ผงยางรถยนต์ขนาด 40 เมช (425 ไมโครเมตร) และขนาด 8 เมช (2.48 มิลลิเมตร) จากผลการทดสอบพบว่าค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน (Penetration) จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของยางรถยนต์ เมื่อนำมาผสมกับแอสฟัลต์ จะทำให้ยางมีความอ่อนตัวมากขึ้น และเมื่อพิจารณาจากปริมาณของผงยางรถยนต์ที่เพิ่มเข้าไปในแอสฟัลต์ทั้ง 4 อัตราส่วน คือ 0.95:0.05, 0.90:0.10, 0.85:0.15, 0.80:0.20 โดยน้ำหนัก ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์ที่ไม่ได้เติมผงยางรถยนต์ คือ การเติมผงยางรถยนต์ที่อัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ขนาด 40 เมช (425 ไมโครเมตร) ค่าความเหนียวจะมีค่าที่ต่ำลง เนื่องจากมีการเติมผงยางรถยนต์ที่มากเกินไป ทำให้แอสฟัลต์มีการยึดเกาะกับผงยางรถยนต์ลดลง ดังนั้นเมื่อเติมผงยางรถยนต์ที่อัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนัก ของผงยางขนาด 40 เมช (ไมโครเมตร) จะมีค่าความเหนียวที่ 24.2 เซนติเมตร ผลการทดสอบคุณสมบัติของยางทั้ง 2 ค่า ทำให้สรุปได้ว่า การเติมผงยางที่อัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับค่าแอสฟัลต์ที่ไม่ได้เติมผงยางรถยนต์ ดังนั้นจึงนำเอาค่าอัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนักไปทดสอบ การออกแบบการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ ซึ่งสรุปได้ว่า จากการออกแบบการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ โดยมีการออกแบบส่วนผสมของหินฝุ่น หิน 3/8" หิน 1/2" หิน 3/4" คือในอัตราส่วนที่ 50:20:20:10 ทำให้ได้ค่าต่าง ๆ ที่มีปริมาณเหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมวลรวม ซึ่งการเติมเป็นร้อยละของยางดังกล่าว จะทำให้มีค่าเสถียรภาพ

มากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่มีการเติมผงยางรถยนต์

ณพรัตน์ วิจิตชลชัย และคณะ (2552) ได้ศึกษาการใช้ยางแห้งผสมยางมะตอยใช้ในงานทาง [5] จากการทดลองผสมยางแห้งที่ผ่านกระบวนการผลิตอย่างง่าย ได้แก่ ยางเต้าหู้และเศษยางแผ่นรมควันผสมกับแอสฟัลต์ โดยใช้วิธีบดผสมกับแอสฟัลต์ในอัตราส่วน 1:1 เป็น Master batch ก่อนนำไปผสมกับแอสฟัลต์ สรุปได้ว่าสามารถนำยางแห้งที่ไม่ผ่านกระบวนการผลิต (ยางเต้าหู้) หรือยางที่เหลือจากกระบวนการผลิต (เศษยางแผ่นรมควัน) มาใช้ปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์แทนน้ำยางชั้นที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตและที่ราคาแพงกว่าได้ แต่จะต้องนำยางแห้งมาบดผสมใน Master batch ก่อนผสมกับแอสฟัลต์ในอัตราร้อยละ 5 โดยผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบของคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อยางแห้งในยางมะตอย [5]

คุณสมบัติ	อัตราส่วนเนื้อยางแห้งในยางมะตอย		
	0 %	2 %	5 %
Penetration (0.1 mm)	65	56	52
Softening point (°C)	48	50	61
Ductility (cm)	150	37	33

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะช่วยลดปัญหาปริมาณขยะยางในรถจักรยานยนต์ใช้แล้วที่มีอยู่ในปัจจุบันให้น้อยลง โดยการนำยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้วมาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ยางมะตอย) โดยผลดีอีกอย่างที่เราคาดว่าจะได้รับ คือ สามารถปรับปรุงคุณภาพของถนนแบบยืดหยุ่นให้ดีขึ้นได้ [6]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ใช้วัสดุหลัก 2 ชนิดคือ

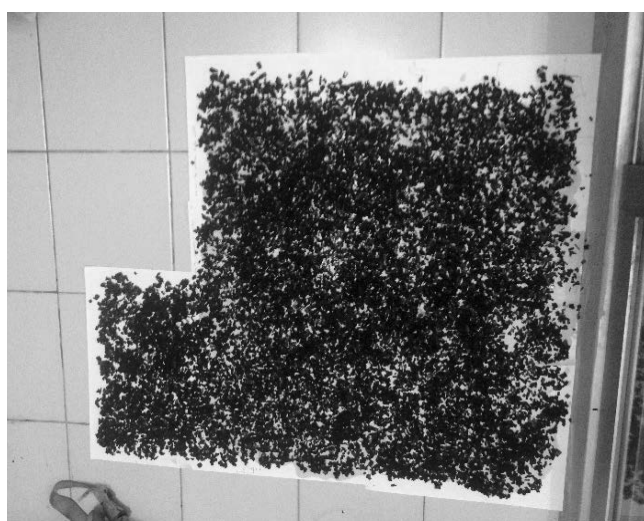
- แอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60/70)
- ผงยางในรถจักรยานยนต์ ขนาดเล็กประมาณ 80 เมช

2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- 1) นำยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว มาตัดจุกยางออก แล้วนำไปตากแห้ง (รูปที่ 1)
- 2) ตัดยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปล้างน้ำ และนำมาผึ่งให้แห้ง (รูปที่ 2)

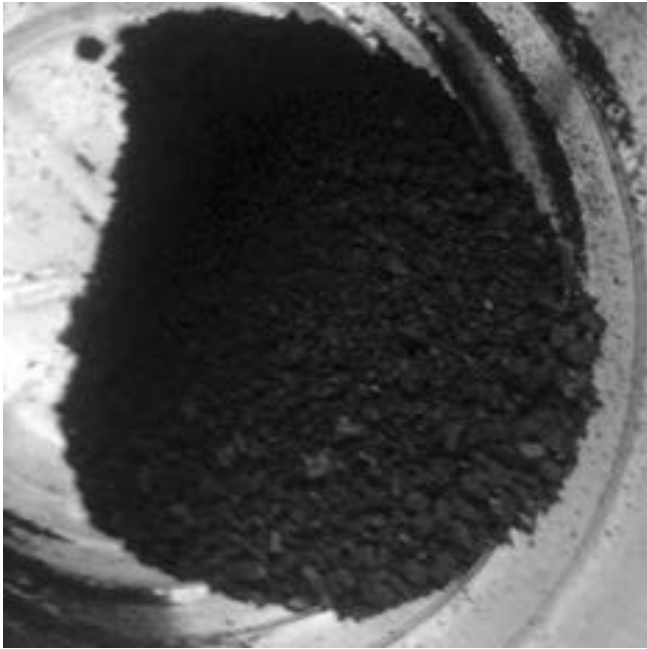


รูปที่ 1 ยางในรถจักรยานยนต์ถูกนำไปตากแห้ง



รูปที่ 2 ยางในรถจักรยานยนต์ซึ่งถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ถูกนำไปล้าง และนำมาผึ่งให้แห้ง

3) เมื่อยางแห้ง นำยางไปแช่ในไนโตรเจนเหลว เพื่อให้ยางอยู่ในสถานะเป็นของแข็งชั่วคราว แล้วนำมา บั่นทันที จนกลายเป็นผงยางขนาดเล็ก (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ผงยางขนาดเล็ก

4) จากนั้นนำผงยางไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80 เพื่อให้ได้วัสดุผสมซึ่งมีขนาดเล็กประมาณ 80 เมช

2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับยางในรถจักรยานยนต์
 - ชั่งแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60/70) และผงยาง โดยใช้อัตราส่วนผสมของยางในต่อน้ำหนักรวมของส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 5
 - ต้มแอสฟัลต์ให้ร้อน (อุณหภูมิประมาณ 90 ถึง 120 องศาเซลเซียส) แล้วจึงเติมผงยางเข้าไป โดยขณะเติมจะต้องวัดอุณหภูมิทุกครั้ง เพื่อไม่ให้เกิน 120 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเสียคุณภาพ และจะต้องคนส่วนผสมตลอดเวลาเพื่อกระจายความร้อน และทำให้ยางผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับแอสฟัลต์ได้ง่ายขึ้น (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 การผสมแอสฟัลต์กับผงยางในรถจักรยานยนต์

2) นำส่วนผสมที่ได้ไปทำการทดสอบหาคคุณสมบัติเชิงกล ดังนี้

- การทดสอบการจมตัวของเข็มมาตรฐานของวัสดุบิทูมินัส (Penetration Test of Bituminous Materials) เพื่อทดสอบความแข็งของวัสดุชนิดกึ่งแข็งตาม มอก.1201-2536

- การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูมินัส (Test for Softening Point of Bitumen: Ring and ball Apparatus) เพื่อทดสอบหาจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูมินัสในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 157 องศาเซลเซียส ตาม มอก. 1216-2537

- การทดสอบความยืดดึงของวัสดุบิทูมินัส (Test for Ductility of Bituminous Materials) เพื่อทดสอบค่าการยืดตัวของวัสดุจำพวกบิทูมินัส ตาม มอก. 1202-2536

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ผลทดสอบวัสดุผสมจำนวน 9 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม แล้วนำมาคิดค่าเฉลี่ย เป็นดังนี้

3.1 ผลการทดสอบการจมตัวของเข็มมาตรฐาน

จากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเพิ่มส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐานจะลดลง ทั้งนี้ตามมาตรฐาน มอก.851-2542 แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 จะต้องมีค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐานอยู่ระหว่าง

60-70 ดังนั้นจะมีเพียงอัตราส่วนผสมเดียว คือ 95 : 5 ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ได้ เพราะให้ค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน

อัตราส่วนของส่วนผสม ต่อยางในรถจักรยานยนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าการจมของเข็มมาตรฐาน [0.1 mm]
100 : 0	63.11
99 : 1	63.11
98 : 2	62.67
97 : 3	61.22
96 : 4	60.44
95 : 5	58.89

3.2 ผลการทดสอบหาค่าจุดอ่อนตัว

จากตารางที่ 3 พบว่า ในทุกอัตราส่วนผสม เมื่ออัตราส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์มากขึ้น ค่าจุดอ่อนตัวจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ตามมาตรฐาน มอก.851-2542 แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 จะต้องมียค่าจุดอ่อนตัวอยู่ระหว่าง 45 ถึง 55 องศาเซลเซียส ดังนั้นวัสดุผสมทุกอัตราส่วนผสมที่ทดสอบนั้นมียค่าจุดอ่อนตัวเป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาค่าจุดอ่อนตัว

อัตราส่วนของส่วนผสม ต่อยางในรถจักรยานยนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าจุดอ่อนตัว [°C]
100 : 0	45.13
99 : 1	45.90
98 : 2	46.80
97 : 3	46.80
96 : 4	49.70
95 : 5	49.50

3.3 การทดสอบความยึดติดของวัสดุผสม

จากตารางที่ 4 พบว่า เมื่อผสมยางในรถจักรยานยนต์ลงไปในส่วนผสมในปริมาณที่มากขึ้น ค่าการยึดติดจะลดลง และเนื่องจากค่ายึดติดตามมาตรฐาน มอก.851-2542 จะต้องไม่น้อยกว่า 50 เซนติเมตร ดังนั้นจึงทำการประมาณค่าอัตราส่วนของยางในที่เหมาะสม โดยพิจารณาช่วงที่ค่าการยึดติดอยู่ระหว่าง 48.00 กับ 52.33 เซนติเมตร พบว่า ค่าอัตราส่วนผสมยางในรถจักรยานยนต์เท่ากับร้อยละ 1.5 ต่อน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด จะทำให้วัสดุผสมมียค่าระยะยึดติด 50 เซนติเมตรตามข้อกำหนดในมาตรฐาน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหาค่าความยึดติด

อัตราส่วนของส่วนผสม ต่อยางในรถจักรยานยนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าความยึดติด [cm]
100 : 0	150.00
99 : 1	52.33
98 : 2	48.00
97 : 3	42.67
96 : 4	39.33
95 : 5	34.00

4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่า การผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้วเข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว จะทำให้ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน (Penetration) ลดลง ขณะที่ค่าจุดอ่อนตัว (Softening Point) เพิ่มขึ้น แต่ค่าความยึดติด (Ductility) จะลดลง เพราะยางในจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความแข็งมากขึ้น แต่มีคุณสมบัติยึดติดลดลง ผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลการวิจัยของณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ

ในส่วนของการนำไปใช้งาน พบว่า ค่าอัตราส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ที่ควรใช้คือ ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด เพราะให้ค่าความยึดติ่งซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ยอมให้ คือจะต้องไม่ต่ำกว่า 50 ซม. (มอก.851-2542) เพราะอาจส่งผลต่อการแตกร้าวของผิวถนน

สรุปได้ว่า ยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว สามารถนำมาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ เพราะส่วนผสมที่ได้นั้นมีคุณสมบัติซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของงานทาง และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้ดีขึ้นในด้านของความแข็ง คือค่าระยะจมนของเข็มมาตรฐานจะลดลง ซึ่งช่วยป้องกันการเสียรูปอย่างถาวรของผิวถนนได้ และในส่วนของคุณสมบัติของยางในรถจักรยานยนต์เข้าไป จะทำให้ค่าจุดอ่อนตัวสูงขึ้น ซึ่งมีผลดีต่อการช่วยลดการเยิ้มตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [7] แต่มีข้อเสียคือทำให้ส่วนผสมมีค่าความยึดติ่งลดลง

กรณีที่จะนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมนั้นจะต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมในแง่อื่น ๆ ที่ครอบคลุมการใช้งานจริงทั้งหมด และต้องสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการย่อยขนาดยางให้เล็กลง หรือเครื่องมือใช้การบดยางให้เป็นผงยาง รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการผสมผงยางบดให้เข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดี รวมทั้งทดลองนำไปสร้างถนนจริง เพื่อประเมินคุณภาพของถนน และศึกษาความคุ้มค่าในการก่อสร้างจริงต่อไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทั้งในแง่ของวิศวกรรมทางและช่วยลดปริมาณขยะยางในรถจักรยานยนต์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในปัจจุบัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมทาง และขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัย ผู้ช่วยวิจัย และอาจารย์ปฏิบัติการประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา รวมทั้งบริษัทไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ซึ่งได้อนุเคราะห์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับใช้ในงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยางรถจักรยานยนต์. ตลาดในยังรุ่ง...เร่งมุ่งตลาดนอก. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.positioningmag.com>
- [2] The Use of Recycled Tire Rubber to Modify Asphalt Binder and Mixtures : Understanding how tires are used in asphalt. [online] : <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif14015.pdf>
- [3] ธนาพร พูนสวัสดิ์, 2544. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ธรรมดา กับแอสฟัลต์ผสมยางล้อรถที่ใช้แล้วโดยวิธีการผสมแบบเปียกและแบบแห้ง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] ฉัตรวรรณ สุทธิรักษ์ และยรรยง เพ็ญจันทร์, 2552. การนำยางรถยนต์เก่ามาผสมกับยางมะตอยเพื่อทำแอสฟัลต์ซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [5] ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ, 2552. “การใช้ยางแห้งผสมยางมะตอยใช้ในงานทาง” ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา สถาบันวิจัยยาง.
- [6] Understanding how tires are used in asphalt. [online] : <http://asphaltmagazine.com/understanding-how-tires-are-used-in-asphalt>
- [7] Oliver, J.W.H., 1997. “Critical Review of the Use of Rubbers and Polymers in Bitumen Board Paving Materials”, Report AIR 1037-1, Australian Road Research Board.