

ยางมะตอยที่ดัดแปรด้วยอนุภาคยางจากเศษถุงมือยาง

นายเชาวลิต ประเสริฐสมบุญ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Scrap glove powder modified asphalts

Mr. Chawlit Prasertsomboon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ยางมะตอยที่ดัดแปรด้วยอนุภาคยางจากเศษถุงมือยาง

โดย

นายเชาวลิต ประเสริฐสมบุรณ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมดุสิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมดุสิต)

..... กรรมการ

(ดร. ชุตินิพนธ์ สิริพิพัฒน์กุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์)

เขาวลิต ประเสริฐสมบุญ : ยางมะตอยที่ดัดแปรด้วยอนุภาคยางจากเศษถุงมือยาง (Scrap glove powder modified asphalt) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ศราวุธ ริมคูสิต, 62 หน้า.

ยางประเภทต่างๆ ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและทางความร้อนของยางมะตอยโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับงานทางวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและทางความร้อนของยางมะตอยสำหรับงานทางโดยใช้เศษยางเป็นสารดัดแปร โดยจะทำการปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยเกรด AC 60/70 ด้วยการเติมผงยางธรรมชาติจากเศษถุงมือยางในอัตราส่วน 1, 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการผสมโดยใช้เครื่องกวนที่อุณหภูมิ 150 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที ศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยผงยางจากเศษถุงมือยาง พบว่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus) มีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณเศษยางเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของยางมะตอยดัดแปรที่มีค่าต่ำลง อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของยางมะตอยดัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือยางเพิ่มขึ้นเป็น 357 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ของยางมะตอยปกติ นอกจากนี้ยังพบว่าจุดอ่อนตัว (Softening point) ของยางมะตอยเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าการเจาะลึก (Penetration) ลดลง และค่าการยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) มีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณผงยางเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการผสมจาก 150 เป็น 180 องศาเซลเซียสค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการทดสอบมีแนวโน้มดีขึ้น จากการศึกษาการดัดแปรยางมะตอยด้วยผงยางจากเศษถุงมือยางมีแนวโน้มที่จะสามารถลดการเสีรูปของผิวถนนในการเกิดร่องล้อ (Rutting) และ การเยิ้ม (Bleeding) ได้เป็นอย่างดี

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470926421 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MODIFIED ASPHALTS / MECHANICAL PROPERTIES

CHAWLIT PRASERTSOMBOON: Scrap glove powder modified asphalts.

ADVISOR: ASSOC. PROF. SARAWUT RIMDUSIT, 62 pp.

The use of rubbers for modification of asphalt is an attempt to prolong the service life and improve the performance of asphalt particularly for road pavement applications. This research aims to study mechanical and thermal properties of asphalt modification by scrap gloves powder. The 60/70 penetration grade asphalts were modified by varying the amount of scrap gloves powder at 1wt%, 3wt%, 5wt% and 7wt%. The suitable mixing condition was achieved by mechanical mixing for 1 hr. at 150 and 180°C and a mixing speed of 3,000 rpm. The storage modulus increased when scrap gloves powder contents increased and the glass transition temperature (T_g) of scrap glove powder-modified asphalt decreased. The degradation temperature of scrap gloves powder -modified asphalt increased to 357°C from 340°C of unmodified asphalt. Softening point of the scrap gloves powder-modified asphalt increased with increasing the scrap gloves powder contents while the penetration depth decreased when the scrap gloves powder increased. Appreciable decrease in formation of rutting and bleeding are thus expected to be achieved by the use of the scrap gloves powder-modified asphalts.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศราวุธ ริมดุสิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล อาจารย์ ดร. ชุติมณฑน์ สติรพิพัฒน์กุล และรองศาสตราจารย์ ดร. จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ ที่ได้กรุณามาเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บริษัทคาร์ดิแนลเฮลท์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้มอบตัวอย่างถุงมือให้ใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณบริษัทไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) ที่มอบตัวอย่างยางมะตอยให้ใช้ในงานวิจัย รวมถึงอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือต่างๆในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ยางมะตอย [1].....	4
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยางมะตอย [6].....	5
2.1.2 สมบัติที่สำคัญของวัสดุยางมะตอย [3] [8].....	8
2.1.3 จุดด้อยของยางมะตอยเมื่อใช้ในงานถนน [1].....	8
2.1.4 ยางมะตอยดัดแปรด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA) [9].....	9
สมบัติทั่วไปของวัสดุพอลิเมอร์โมดิฟายด์ยางมะตอยเมื่อเทียบกับวัสดุยางมะตอย.....	9
2.1.5 สารพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุยางมะตอย.....	10
บทที่ 3 การสืบค้นวรรณกรรม.....	16
ปริยาภรณ์ รัตนอุทัยกุล [13].....	16
A.F. de Almeida Junior et al (2012)[4].....	17
P.Cong et al.(2012) [14].....	18

Shutang Liu et al. (2009) [15]	19
K.-D.Jeong et al.(2009) [16]	20
Daryoush Y. K. et al. (2015) [17].....	21
Peralta et al. (2009) [18]	22
Navarro et al. (2010) [19].....	23
Anchalee (2013) [20]	25
บทที่ 4 วิธีการทดลอง	27
4.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	27
4.2 วิธีการทดสอบ	28
4.2.1 การวัดค่าการเจาะลึก	28
4.2.2 การวัดค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัว	29
4.2.3 การวัดค่าการยืดหยุ่นกลับ	30
4.2.4 การวัดค่าความหนืด	31
4.2.5 การวัดค่าความหนาแน่น	32
4.2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analysis).....	32
4.2.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric Analysis).....	32
4.2.8 การวัดสัณฐานวิทยา (Morphology) โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	32
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	33
5.1 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าความหนืดที่ 135 องศาเซลเซียส ของยางมะตอยดัดแปร.....	34
5.2 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าการเจาะลึก (Penetration) ของยางมะตอยดัดแปร.....	35

5.3 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุหุมิการผสมที่มีต่อค่าอนุหุมิจุดอ่อนตัว (Softening Point) ของยางมะตอยตัดแปร	36
5.4 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุหุมิการผสมที่มีต่อค่าการยืดหยุ่นกลับ (Elastic Recovery) ของยางมะตอยตัดแปร	37
5.5 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุหุมิการผสมที่มีต่อค่าความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียส (Density) ของยางมะตอยตัดแปร.....	38
5.6 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุหุมิการผสมที่มีต่อค่าดัชนีการเจาะลึก (Penetration Index) ของยางมะตอยตัดแปร	39
5.7 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุหุมิการผสมที่มีต่อค่าสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analysis) ของยางมะตอยตัดแปร.....	41
5.8 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุหุมิการผสมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis) ของยางมะตอยตัดแปร	42
5.9 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุหุมิการผสมที่มีต่อสัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางมะตอยตัดแปร.....	43
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	55
รายการอ้างอิง	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	62

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมบัติระหว่าง SBS และ เศษยางปริมาณต่างๆ ที่ใช้ตัด แปรรู.....	17
ตารางที่ 2 แสดงผลของชนิด ปริมาณ และขนาดของเศษยางที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ ต่างๆ.....	19
ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบค่าพื้นฐานของยางคลัมป์ดัดแปรยางมะตอยเทียบกับมาตรฐาน ASTM D6114.....	21
ตารางที่ 4 แสดงผลของน้ำหนักและความเข้มข้นของเศษยางก่อนและหลังการดัดแปร	22
ตารางที่ 5 แสดงผลของปริมาณที่ใช้ในการดัดแปรยางมะตอยที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้ว	24
ตารางที่ 6 สมบัติของยางมะตอยเกรด 60/70.....	27
ตารางที่ 7 แสดงขนาดของผงยางที่ได้จากการบด.....	27
ตารางที่ 8 ค่าพื้นฐานของการทดสอบถุงมือยาง	28
ตารางที่ 9 แสดงค่าการเจาะลึก อุณหภูมิจุดอ่อนตัวและ ค่าการยืดหยุ่นกลับ ของยางมะตอยก่อน และหลังการดัดแปรด้วยเศษถุงมือ.....	53
ตารางที่ 10 แสดงค่าความหนืด ค่าความหนาแน่นและ ค่าดัชนีการเจาะลึก ของยางมะตอยก่อน และหลังการดัดแปรด้วยเศษถุงมือ.....	53
ตารางที่ 11 แสดงค่าโมดูลัสสะสม และ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางมะตอยก่อน และหลังการดัดแปรด้วยเศษถุงมือ.....	54
ตารางที่ 12 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว (°C) ที่ 5% น้ำหนักที่หายไปและปริมาณเถ้าถ่าน (%) ที่ 800 °C ของยางมะตอยก่อนและหลังการดัดแปรด้วยเศษถุงมือ.....	54

สารบัญรูป

รูปที่ 1 ปริมาณรกลสะสมที่จุดทะเบียนในประเทศไทย [5]	2
รูปที่ 2 ลักษณะของยางมะตอย	4
รูปที่ 3 โครงสร้างของยางมะตอยกลุ่มอิมิตัว [6, 7].....	5
รูปที่ 4 โครงสร้างของยางมะตอยกลุ่มอะโรมาติก [6, 7].....	6
รูปที่ 5 โครงสร้างของยางมะตอยกลุ่มเรซิน [7]	6
รูปที่ 6 โครงสร้างของยางมะตอยกลุ่มแอสฟัลทีน [6, 7].....	7
รูปที่ 7 โครงสร้างของ สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Styrene-butadiene-styrene: SBS).....	10
รูปที่ 8 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [10].....	11
รูปที่ 9 แสดงค่าความลึกของการเจาะทะลุ (Penetration) ของยางมะตอยตัดแปรด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (a) เครื่องผสมที่มีความเร็วรอบต่ำ (b) เครื่องผสมที่มีความเร็วรอบสูง	16
รูปที่ 10 แสดงผลของปริมาณเศษยางต่อสมบัติทางกายภาพต่างๆ	18
รูปที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบความหนืด และอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปต่อเวลาในการผสมสาร	20
รูปที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบความหนืด และอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปต่ออุณหภูมิในการผสมสาร	21
รูปที่ 13 แสดงสัญญาณวิทยาของเศษยางรถยนต์หลังนำไปตัดแปรยางมะตอยแต่ละชนิด	23
รูปที่ 14 แสดงค่ามอดูลัสสะสม (E') และมอดูลัสสูญเสีย (E'') กับอุณหภูมิ ของยางมะตอย ตัดแปรด้วยยางล้อรถยนต์ที่ปริมาณต่างๆ.....	24
รูปที่ 15 แสดงค่ามอดูลัสสะสมของยางมะตอยตัดแปรด้วยเบนซอกซาซีนปริมาณต่างๆ: (▲) ยางมะตอยก่อนการตัดแปร, (■) 1wt%, (◆) 3wt%, (▼) 5wt%, (●) 7wt%, (▲) 9wt%.....	25
รูปที่ 16 แสดงค่ามอดูลัสสูญเสียของยางมะตอยตัดแปรด้วยเบนซอกซาซีนปริมาณต่างๆ: (▲) ยางมะตอยก่อนการตัดแปร, (■) 1wt%, (◆) 3wt%, (▼) 5wt%, (●) 7wt%, (▲) 9wt%.	26
รูปที่ 17 แสดงเครื่องวัดค่าการเจาะลึก.....	29

รูปที่ 18 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิจุดอ่อนตัว	30
รูปที่ 19 แสดงเครื่องวัดค่าการยืดหยุ่นกลับ	31
รูปที่ 20 แสดงเครื่องวัดค่าความหนืด	31
รูปที่ 21 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าความหนืดที่ 135 °C ของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■)อุณหภูมิผสม 180 °C.....	45
รูปที่ 22 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าการเจาะลึกของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■)อุณหภูมิผสม 180 °C.....	45
รูปที่ 23 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■)อุณหภูมิผสม 180 °C.....	46
รูปที่ 24 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าการยืดหยุ่นกลับของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■)อุณหภูมิผสม 180 °C.....	46
รูปที่ 25 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าความหนาแน่นของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■)อุณหภูมิผสม 180 °C	47
รูปที่ 26 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าดัชนีการเจาะลึกของยางมะตอยดัดแปร (■) อุณหภูมิผสม 150 °C (■)อุณหภูมิผสม 180 °C	47
รูปที่ 27 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่ามอดูลัสสะสมของยางมะตอยดัดแปร (●) ยางมะตอยก่อยดัดแปร (◆) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (■) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (*) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (▲) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (○) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (□) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (◇) ผงยาง 5wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (×) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C.....	48
รูปที่ 28 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางมะตอยดัดแปร (●) ยางมะตอยก่อยดัดแปร (◆) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (■) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (*) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (▲) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (○) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (□) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (◇) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (×) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C	49

รูปที่ 29 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนัก และปริมาณเถ้าถ่านที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของยางมะตอยดัดแปร (+) ยางมะตอยก่อดัดแปร (X) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (Δ) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (◇) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (□) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (●) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (▲) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (◆) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (■) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C.....50

รูปที่ 30 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของยางมะตอยดัดแปรด้วยผงเศษถุงมืออย่าง (a) ยางมะตอยก่อนการดัดแปร (b) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 1%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (c)ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 3%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (d) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 5%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (e) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 7%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (f) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 1%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C (g) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 3%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C (h) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 5%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C (i) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 7%โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C.....52

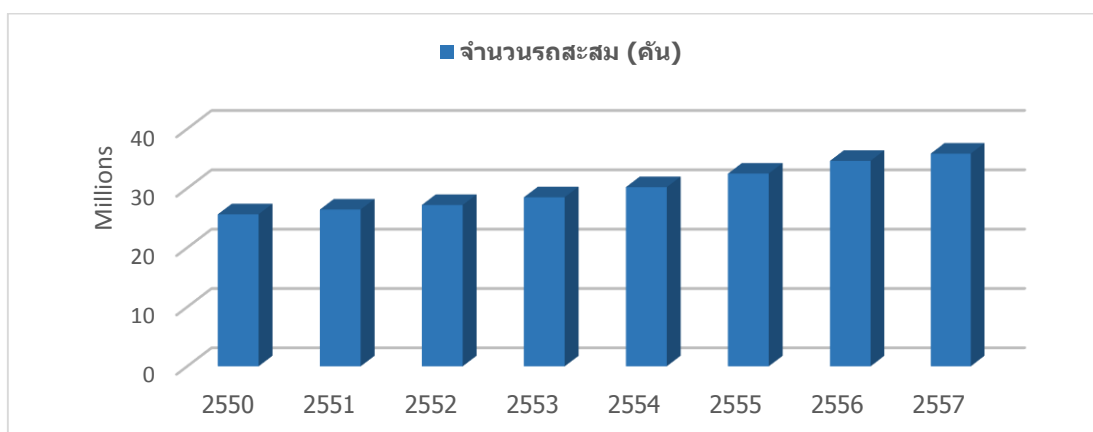
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณรถประเภทต่างๆ มากขึ้น จากรูปที่ 1 เป็นปริมาณรถที่จดทะเบียนสะสมทั่วประเทศ ซึ่งจะสังเกตว่า แต่ละปีมีแนวโน้มของรถที่จดทะเบียนกันมากขึ้น เมื่อปริมาณรถมากขึ้นสิ่งที่จะต้องเพิ่มขึ้นมาคู่กันคือถนน ซึ่งวัสดุสำคัญที่ใช้ในการทำถนนปัจจุบันนี้คือยางมะตอย เนื่องจากมีราคาถูก และมีสมบัติที่สำคัญหลายประการ เช่น การยึดและประสาน อ่อนตัวเมื่อโดนความร้อนแข็งตัวเมื่อโดนความเย็น ทนต่อสภาวะแวดล้อม รวมทั้งทนต่อการกดและด่างอ่อนๆ [1] ยางมะตอยสามารถเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติหรือจากกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมเป็นวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก และเทอร์โมพลาสติก คือมีความยืดหยุ่นและสามารถไหลได้ที่อุณหภูมิสูง เพราะที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถเสียรูปถาวรเมื่อโดนแรงกดทับสูงๆ [2] จากสมบัตินี้ดังกล่าวการนำยางมะตอยล้วนๆ ไปลาดถนนมีข้อจำกัดตรงที่มีค่าความหนืดต่ำ จึงมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมากอุณหภูมิที่สูงเมื่อได้รับความร้อนจากแสงแดดจะทำให้ยางมะตอยอ่อนตัวส่วนอุณหภูมิต่ำหรือเย็นยางมะตอยจะแตก เมื่อผิวถนนต้องรองรับปริมาณการจราจรที่หนาแน่น และน้ำหนักบรรทุกที่สูงเช่นภาวะปัจจุบันจึงประสบปัญหาผิวทางชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติอันได้แก่ ผิวทางเยิ้ม (Bleeding) ผิวเกิดร่องล้อ (Rutting) ผิวทางแตกร้าว (Crack) และผิวหน้าหลุดร่อน (Reveling) [1] เพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติทางอุณหภูมิ และการเสียรูปถาวรจึงมีการนำพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มาใช้ในการตัดแปรรยางมะตอยอย่างกว้างขวาง ซึ่งจำแนกพอลิเมอร์ที่ใช้ออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ยาง เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตพลาสติก และบล็อกโคพอลิเมอร์ มีการใช้สไตรีนบิวทาไดอีนโคพอลิเมอร์ ในการปรับปรุงการเปราะแตกที่อุณหภูมิต่ำแต่ก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาที่อุณหภูมิสูงได้ [3] สไตรีน บิวทาไดอีนสไตรีน เมื่อผสมกับยางมะตอยแล้วทำให้สมบัติทางความร้อนของยางมะตอยดีขึ้นแต่มีราคาค่อนข้างสูง จึงมีการนำเศษยางรถยนต์มาใช้เป็นตัวตัดแปรรแต่มีค่าบางค่าที่ยังต่ำกว่ามาตรฐานคือค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) และความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) [4] น้ำยางชั้นเมื่อผสมกับยางมะตอยสามารถเพิ่มค่าจุดอ่อนตัวและค่าความยืดหยุ่นกลับได้แต่การเติม

น้ำยางข้นเข้าไปผสมยางมะตอยจะเกิดเป็นฟองที่ผิวหน้าและมีไอน้ำแรงดันสูงพุ่งออกมาเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน [1] ยางชนิดยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงเป็นวัสดุที่เป็นกากของเสียจากการผลิตยางมือยางซึ่งต้องกำจัดทิ้งไปเนื่องจากไม่สามารถรีไซเคิลเป็นยางมือยางเพื่อใช้ใหม่ได้ รวมทั้งเป็นของแข็งจึงน่าจะช่วยแก้ปัญหาของการเติมน้ำยางข้นและค่าความยืดหยุ่นกลับของยางรถยนต์ได้



รูปที่ 1 ปริมาณรถสะสมที่จดทะเบียนในประเทศไทย [5]

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อใช้เศษยางมือมาใช้เป็นตัวตัดแปร ในการตัดแปรยางมะตอย
2. เพื่อศึกษาค่าต่างๆหลังจากทำการตัดแปร ดังนี้ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน
3. เพื่อประเมินผลค่าที่เป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับการลาดถนนได้แก่ จุดอ่อนตัว ค่าการเจาะทะลุ
4. เพื่อเปรียบเทียบค่าการยืดหยุ่นกลับ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เศษยางรถยนต์ในการตัดแปร

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ทาวิธีเตรียมตัวอย่าง เศษถุงมือขนาด 180-250 ไมโครเมตร เพื่อใช้เป็นตัวตัดแปร
2. ปริมาณเศษถุงมือต่อปริมาณยางมะตอยเท่ากับ 1% 3% 5% และ 7%
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส
4. เวลาที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 60 นาที
5. ศึกษาผลของตัดแปร โดยเศษถุงมือโดยวัดค่า สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน
6. เพื่อประเมินผลค่าที่เป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับการลาดถนนได้แก่ อุณหภูมิจุดอ่อนตัว ค่าการเจาะลึก และค่ายึดหยุ่นกลับ



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางมะตอย [1]

ยางมะตอยตามมาตรฐาน ASTM D1079 ได้ให้คำจำกัดความว่าเป็นวัสดุสีดำหรือสีน้ำตาล
ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2 มีลักษณะเหนียวเชื่อมยึดติดผิวได้มีสภาพเป็นของแข็งกึ่งแข็งหรือเหลว
สามารถเกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติหรือจากขบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมและจะถูกนำไปผ่าน
ขบวนการผลิตวัสดุยางมะตอยต่อไป เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติตามต้องการคุณสมบัติที่สำคัญ
โดยทั่วไปของวัสดุยางมะตอย คือการยึดและประสานป้องกันการไหลซึมผ่านของน้ำอ่อนตัวเมื่อ
โดนความร้อนแข็งตัวเมื่อโดนความเย็นยึดหยุ่นเป็นฉนวนทนต่อสภาวะแวดล้อมรวมทั้งทนกรด
และด่างอื่นๆ



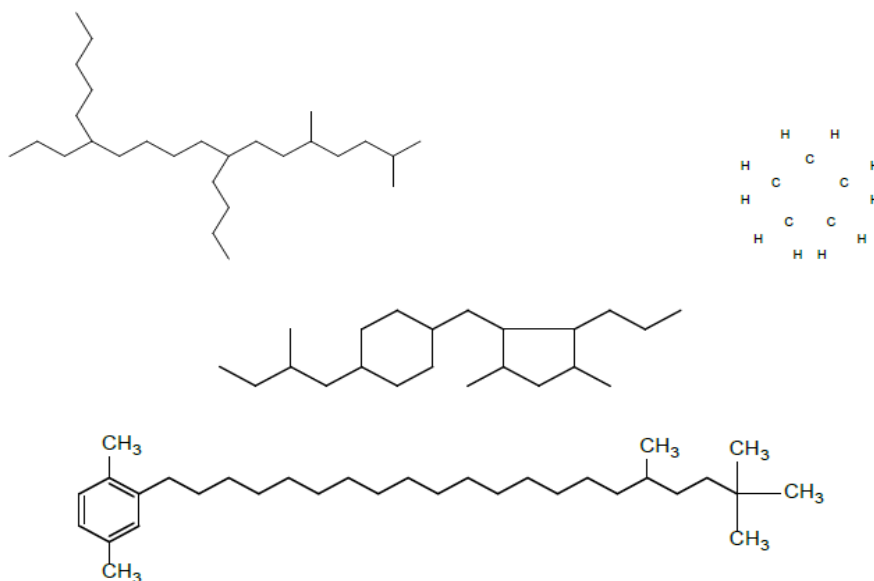
รูปที่ 2 ลักษณะของยางมะตอย

แหล่งที่มา : <http://www.rpsgroup.com/getdoc/db20054f-76f4-41dd-8513-116839efd27a/Heavy-Oil---Bitumen.aspx>

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยางมะตอย [6]

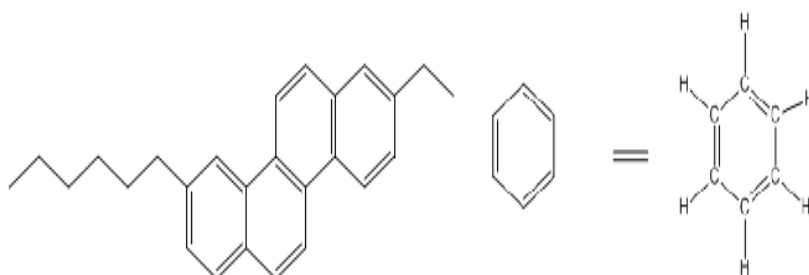
องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุยางมะตอยมีความซับซ้อนมากและขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการแบ่งองค์ประกอบซึ่งมีหลายวิธี เช่นการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) กลั่นแยกสารระดับโมเลกุล (Molecular Distillation) โครมาโทกราฟี (Chromatography) โดยวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดวิธีหนึ่งคือวิธีซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบหลักของยางมะตอยได้เป็น 4 ประเภทคือ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (Saturates), อะโรมาติก (Aromatics), เรซิน (Resins) และ แอสฟัลทีน (Asphaltenes) หรือที่เรียกย่อๆ ว่า SARA โครมาโทกราฟี

1. ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว มีปริมาณ 5-20 % ของวัสดุยางมะตอยประกอบไปด้วยโซ่ตรงและกิ่งของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbons) มีลักษณะเป็นน้ำมันไหลหนืด ไม่มีขั้วมีสีน้ำตาลอ่อนแสดงโครงสร้างตามรูปที่ 3



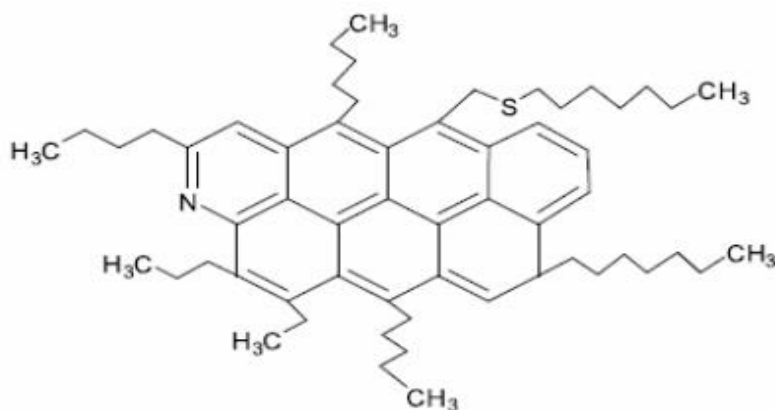
รูปที่ 3 โครงสร้างของยางมะตอยกลุ่มอิ่มตัว [6] [7]

2. อะโรมาติก มีปริมาณ 40-65 % ของวัสดุขางมะตอยมีสีน้ำตาลลักษณะเหลวหนืดน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 300-2,000 แสดงโครงสร้างตามรูปที่ 4



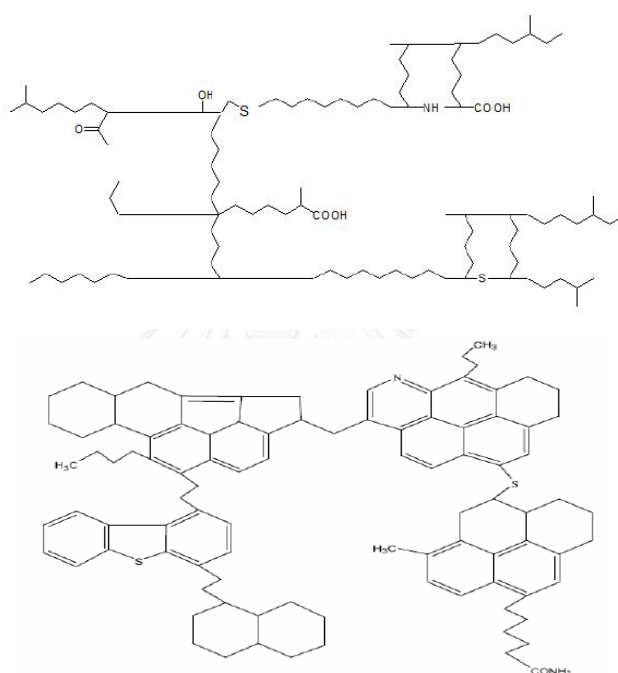
รูปที่ 4 โครงสร้างของขางมะตอยกลุ่มอะโรมาติก [6, 7]

3. เรซิน มีสีน้ำตาลเกือบดำลักษณะเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็งประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่และมีธาตุไนโตรเจนซัลเฟอร์และออกซิเจนบางส่วนดังแสดงโครงสร้างตามรูปที่ 5 โดยเรซินเมื่อถูกความร้อนจะเปลี่ยนสภาพเป็นของเหลว (ละลายได้เมื่ออุณหภูมิสูงประมาณ 93 องศาเซลเซียส) เมื่ออุณหภูมิต่ำจะแข็งเปราะสามารถละลายได้ใน n-Heptane น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 500-50,000 ขนาดอนุภาค 1-5 นาโนเมตร มีอัตราส่วน H:C ประมาณ 1:3 ถึง 1:4 ทำหน้าที่ช่วยให้แอสฟัลท์หิน กระจายตัวในขางมะตอยเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidation) จะสามารถกลายเป็นโมเลกุลสารแอสฟัลท์หิน



รูปที่ 5 โครงสร้างของขางมะตอยกลุ่มเรซิน [7]

4. แอสฟัลทีน มีปริมาณ 5-25 % ของวัสดุยางมะตอยเป็นของแข็งอัสฐานมีสีน้ำตาลหรือสีดำ ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่และมีไนโตรเจนซัลเฟอร์ออกซิเจน บางส่วนมีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งแขวนลอยละลายตัวเมื่อโดนความร้อนสามารถติดไฟได้ เมื่อได้รับความร้อนสูงไม่ละลายใน n-Heptane มีความเป็นขี้ผึ้งน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1,000-100,000 ขนาดอนุภาค 5-30 นาโนเมตรมีอัตราส่วน H:C ประมาณ 1:1 แสดงโครงสร้างตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างของยางมะตอยกลุ่มแอสฟัลทีน [6, 7]

แอสฟัลทีน เป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุยางมะตอยอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Colloid) กระจายตัวอยู่ในอะโรมาติก และไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ซึ่งเป็นตัวกลางโดยมีเรซินเป็นตัวช่วยกระจายแอสฟัลทีนไม่ให้จับตัวเป็นก้อน ดังนั้นเรซินจึงเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติ ด้านการยึดเกาะ (Adhesion) และการยืดตัว (Ductility) ของยางมะตอยสำหรับส่วนประกอบของอะโรมาติกและไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว นั้นจะมีผลต่อความแข็งหรืออ่อนของวัสดุยางมะตอย ดังนั้นจึงเป็นตัวที่กำหนดความหนืด (Viscosity) และการไหล (Flow) ของวัสดุยางมะตอย

2.1.2 สมบัติที่สำคัญของวัสดุยางมะตอย [3] [8]

1. สมบัติในการยึดและประสาน (Binding): ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมวัสดุต่างๆ ให้ติดกัน เช่น การผสมยางมะตอยที่ตัดแปรด้วยพอลิเมอร์กับเส้นใยที่ใช้ในการเสริมแรง เป็นต้น
2. สมบัติในการป้องกันน้ำซึมผ่าน (Waterproofing): เมื่อวัสดุเคลือบด้วยยางมะตอยแล้วโอกาสที่น้ำจะซึมผ่านจะเป็นไปได้ยาก
3. สมบัติที่เป็นของเหลวหรืออ่อนตัวเมื่อถูกความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลงคุณสมบัตินี้จะทำให้สามารถนำยางมะตอยมาใช้ประโยชน์ได้ง่ายขึ้นเช่นการทำหลังคาเมื่อทำใหยางมะตอยเหลวก็สามารถผสมยางมะตอยกับวัสดุต่างๆ ได้และเมื่อลาดยางแล้วจะเย็นลงจนเกิดการแข็งตัว
4. สมบัติในการเป็นฉนวน (Insulation)
5. สมบัติทนกรดและด่างอ่อนๆ และทนต่อสภาวะแวดล้อม

2.1.3 จุดด้อยของยางมะตอยเมื่อใช้ในงานถนน [1]

โดยปกติถนนที่ราดผิวถนนด้วยยางมะตอยล้วนๆมีข้อจำกัดตรงที่มีค่าความหนืดต่ำจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมาก เมื่อได้รับความร้อนจากแสงแดด จะทำใหยางมะตอยอ่อนตัวส่วนอุณหภูมิที่ต่ำหรือเย็นยางมะตอยจะแตกเมื่อผิวถนนต้องรองรับปริมาณการจราจรที่หนาแน่นและน้ำหนักบรรทุกที่สูงเช่นภาวะปัจจุบันจึงประสบปัญหาผิวทางชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติอันได้แก่

1. ผิวทางเยิ้ม (Bleeding) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากแสงแดดเป็นเหตุให้ผิวจราจรลื่น
2. ผิวเกิดร่องล้อ (Rutting) เกิดขึ้นหลังจากผิวทางเยิ้มยางมะตอยขาดคุณสมบัติการยึดหยุ่นจึงยุบตัวเป็นร่องตามแนวล้อที่แล่นทับแล้วไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม
3. ผิวทางแตกร้าว (Crock) มาจากสาเหตุผิวถนนขาดความยืดหยุ่นมีสภาพแข็งเปราะเมื่อมีน้ำหนักกดทับซ้ำๆ ผิดทางเกิดความล้า (Fatigue) จึงเกิดรอยแตกร้าว
4. ผิวหน้าหลุดร่อน (Reveling) เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวถนนสึกกร่อนเนื่องจากส่วนผสมละเอียดที่ผิวหน้าถูกแรงเฉือนจากล้อรถตะกุดออก

2.1.4 ยางมะตอยดัดแปรด้วยพอลิเมอร์ (Polymer Modified Asphalt, PMA) [9]

ยางมะตอยเป็นวัสดุที่ผลิตได้จากการกลั่นน้ำมันดิบคุณภาพของยางมะตอยจึงขึ้นกับคุณภาพของน้ำมันดิบที่นำมากลั่นและกระบวนการที่ใช้ในการกลั่นแต่อย่างไรก็ดีแหล่งน้ำมันดิบที่ให้สมบัติยางมะตอยที่ดีนั้นมีน้อยมากและมีกระบวนการกลั่นที่นิยมไม่กี่วิธีที่ทำให้ได้ยางมะตอยที่มีคุณภาพดี จึงเป็นเรื่องยากที่จะผลิตยางมะตอยที่มีคุณภาพจากการกลั่น โดยตรงการปรับปรุงสมบัติยางมะตอยด้วยกระบวนการหลังการกลั่นจึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงให้ยางมะตอยมีคุณสมบัติตามต้องการ เช่นการเป่าลมร้อนช่วยให้ยางมะตอยที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้นหรือการใช้ตัวทำละลายบางชนิดผสมลงในยางมะตอยเพื่อให้ได้ยางมะตอยที่มีความนิ่มอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมากคือการทำยางมะตอยดัดแปรด้วยพอลิเมอร์ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติยางมะตอยได้หลากหลายรูปแบบมากกว่าการใช้ลมร้อนหรือการเติมตัวทำละลายโดยสามารถเลือกชนิดของพอลิเมอร์ในการปรับปรุงให้ได้ยางมะตอยที่มีสมบัติตามต้องการได้

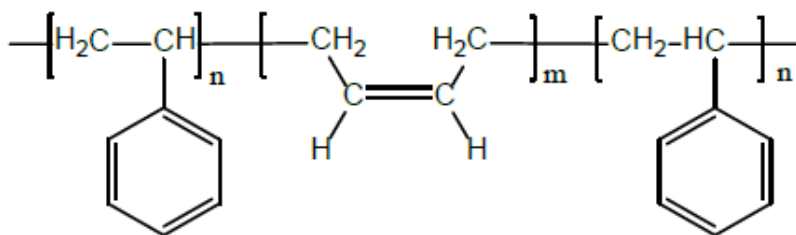
สมบัติทั่วไปของวัสดุพอลิเมอร์โมดิฟายด์ยางมะตอยเมื่อเทียบกับวัสดุยางมะตอย

- มีความต้านทานต่อความล้า (Fatigue) ที่ดีกว่า
- มีความต้านทานต่อการเสียรูปอย่างถาวร (Resistance to Permanent Deformation)
- มีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิต่ำมากหรือสูงมาก
- มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุกับวัสดุยางมะตอยสูงกว่า
- มีความต้านทานต่อการหลุดลอก (Stripping) ที่ดีขึ้น
- มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงจึงไม่มีปัญหาการซึมออก (Bleeding) ของวัสดุเชื่อม

ประสาน

2.1.5 สารพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุยางมะตอย

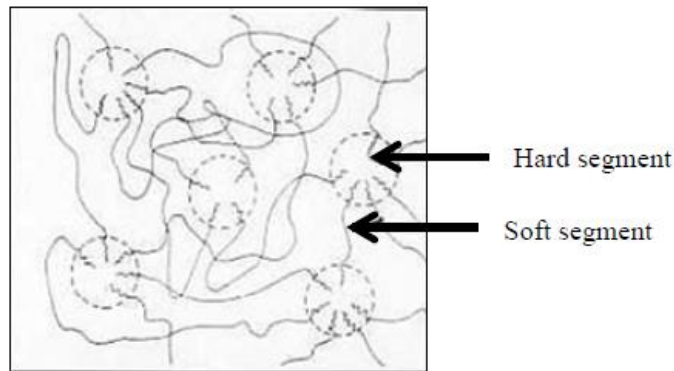
2.1.5.1 สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Styrene-butadiene-styrene: SBS) [11] [10] สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (SBS) เป็นโคพอลิเมอร์ได้มาจากการก่อตัวของกระบวนการพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีนและบิวทาไดอีน โดยทั่วไปจะมี 2 ขั้นตอนเกิดในกระบวนการโดยขั้นตอนแรกสไตรีนมอนอเมอร์จะผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเพื่อต่อตัวขึ้นเป็น Polystyrene blocks ที่มีมวลโมเลกุลตามที่ต้องการเช่นเดียวกับขั้นที่สองบิวทาไดอีนมอนอเมอร์จะได้รับการพอลิเมอไรเซชันเพื่อต่อตัวขึ้นเป็น Polybutadiene blocks ที่มีมวลโมเลกุลตามต้องการหลังจากนั้นแต่ละ blocks จะทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อสายโซ่ของพอลิเมอร์ร่วมกันได้เป็นพอลิสไตรีนบิวทาไดอีน (SB) ต่อมาเกิดพอลิเมอไรเซชันกับ Polystyrene blocks ต่อตัวกันจนกลายเป็นพอลิสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน (SBS) แสดงได้ตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างของ สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Styrene-butadiene-styrene: SBS)

จะเห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลของ SBS ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนของพอลิสไตรีนและส่วนของบิวทาไดอีน โดยส่วนของพอลิสไตรีนจัดเป็นส่วนแข็ง (Hard segment) และส่วนของพอลิบิวทาไดอีนจัดเป็นส่วนอ่อน (Soft segment) โดยที่ส่วนแข็งคือพอลิสไตรีน มีความสำคัญในการสร้างบริเวณแข็ง (Rigid region) ที่ทำหน้าที่คล้ายกับการเชื่อมโยงเชิงกายภาพ (Physical crosslinks) ยึดสายโซ่ที่ยืดหยุ่นของส่วนอ่อนคือพอลิบิวทาไดอีนไว้ด้วยกันส่วนแข็งเหล่านี้สามารถคลายตัวได้เมื่อได้รับความร้อนและกลับมารวมกันใหม่ได้ เมื่อเย็นตัวสำหรับส่วนอ่อนคือพอลิบิวทาไดอีนมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) คล้ายยางมีความอิสระในการเคลื่อนที่มากกว่าส่วนแข็งและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ต่ำ

SBS จัดเป็นวัสดุจำพวกเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomers) ชนิดหนึ่ง ซึ่งวัสดุดังกล่าวเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายยาง (Rubber-like) นิ่มตัวมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำยืดหยุ่นได้คล้ายยางแต่แตกต่างจากยางทั่วไปคือสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งคล้ายเทอร์โมพลาสติก การที่ SBS สามารถขึ้นรูปได้หลายครั้งหรือไหลได้ที่อุณหภูมิสูงและกลายเป็นยางที่อุณหภูมิใช้งานเนื่องจาก SBS มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical Crosslinks) แทนที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางเคมีเหมือนยางทั่วไปจุดเชื่อมโยงเชิงกายภาพนี้จะช่วยยึดให้สายโซ่โมเลกุลที่ยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ติดกันเหมือน โครงสร้างร่างแหสามมิติในยางแต่สามารถเปลี่ยนแปลงย้อนกลับไปมาได้เมื่อให้ความร้อนจึงขึ้นรูปได้ใหม่เหมือนเทอร์โมพลาสติกส่วนอ่อนและส่วนแข็งของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์แสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ [11]

สมบัติทั่วไปของสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน

- เป็นพอลิเมอร์ออสัญฐานทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้โปร่งใส (Transparent)
- ทนต่อน้ำมัน
- เป็นฉนวนทางความร้อนที่
- ทนต่อสารเคมี
- ทนต่อแรงกดและแรงกระแทกได้ดี

การใช้งานของสไตรีน-บิวทาไดอิน-สไตรีน

- ใช้ในอุตสาหกรรมพื้นรองเท้า
- ใช้ในการผลิตอุปกรณ์กีฬา
- ใช้ผลิตวัสดุรับแรงและวัสดุอื่นๆที่ต้องการความทนทานสูง
- ใช้ปรับปรุงสมบัติของยางมะตอยเพื่อช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น
- ใช้ในอุตสาหกรรมกาวหรือสารยึดติด (Adhesives)
- ใช้ผลิตส่วนประกอบของยางรถยนต์

2.1.5.2 เศษยางรถยนต์ [12]

กระบวนการผลิตยางรถยนต์

ขั้นที่ 1 การผสมวัตถุดิบ (Mixing)

ส่วนผสม

- ยางธรรมชาติ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตยางรถยนต์ คือ ช่วยทำให้ยางมีความยืดหยุ่นทนต่อแรงกระแทกและแรงดึงได้ดี แต่ยางธรรมชาติมีข้อจำกัด คือ เหมาะที่ใช้ในอุณหภูมิช่วง -40 ถึง 70 องศาเซลเซียส และไม่สามารถทนต่อน้ำมันบางประเภทได้

- ยางสังเคราะห์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง ให้มีคุณสมบัติเหนือยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์สามารถจำแนกออกได้ เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ 1 ยางที่มีสมบัติทนความร้อนได้ดีกว่ายางธรรมชาติ แต่คุณสมบัติทางด้านความเหนียว และความยืดหยุ่นด้อยกว่ายางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์กลุ่มนี้ ได้แก่ SRB (Styrene - Butadiene Rubber), BR (Polybutadiene Rubber) กลุ่มที่ 2 เป็นยางที่มีสมบัติทนต่อน้ำมัน ทนต่อความร้อนและโอโซน ยางสังเคราะห์ในกลุ่มนี้ เช่น CR (Chloroprene Neoprene Rubber), NBR (Acrylonitrile Butadiene Rubber)

- ผงเขม่าดำ (Carbon Black) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันดิบ คุณสมบัติช่วยให้ยางแข็งตัวเพื่อเพิ่มความทนทานของยาง และทนต่อรอยขีดข่วนต่างๆ

- สารเคมีต่างๆ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ในการผสมยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และผงเขม่าดำ เพื่อเร่งปฏิกิริยาในการผลิตและเตรียมเป็น Compound Rubber ที่พร้อมนำไปขึ้นรูป สารเคมีที่ใช้แบ่งเป็น 4 กลุ่ม คือ

1. สารที่ทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing Agent) ใส่เพื่อให้สถานะของยางอยู่สถานะยืดหยุ่นได้ กลุ่มนี้ได้แก่ กำมะถัน
2. สารป้องกันบางเสื่อมสภาพ (Protective Agent) สารกลุ่มนี้ได้แก่ สารไอโซน
3. สารช่วยในกระบวนการผลิต เช่น น้ำมัน ช่วยให้ง่ายที่ทำการผสมมีคุณสมบัตินิ่มนวล
4. สารอื่นๆ เช่น สารที่ทำให้ยางฟู หรือใส่ให้ยางมีสีต่างๆ

ขั้นที่ 2 การทำลวดขอบยาง (Bundling), การฉาบบาง (Coating) การขึ้นรูปขอบลวด (Foaming)

วิธีการคือ นำเส้นลวดมาทำเป็นขอบยางรถยนต์ คือ การดึงเส้นลวดมาในสายการผลิต แล้วทำการฉาบบางขอบยาง จากนั้นนำไปขึ้นรูปขอบลวด

เส้นลวดที่ใช้ในการผลิตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. เส้นลวดประเภท Bead Wire สำหรับทำขอบยาง
2. เส้นลวดประเภท Steel Cord เป็นเส้นลวดใยเหล็กที่ใช้กับยาง Radial

หมายเหตุ เมื่อผ่านขั้นตอนที่ 2 แล้วจะได้ขอบลวดออกมา (Bead Rings)

ขั้นที่ 3 การทำโครงผ้าใบและการฉาบบางกับผ้าใบเมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วนำแผ่นยางไปตัดก็จะได้ โครงผ้าใบและเข็มขัดรัดหน้ายางเส้นลวด

ขั้นที่ 4 การทำเส้นลวดเหล็กและการฉาบบางกับเส้นลวด เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้เข็มขัดรัดหน้ายาง

ขั้นที่ 5 การดันเนื้อยางเพื่อขึ้นรูปแก้มยางและหน้ายาง เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้ว จะได้โครงยางสำเร็จรูป (Green Tire)

ขั้นที่ 6 การประกอบโครงยาง

เครื่องจักรสำหรับขึ้นรูปยาง เป็นการนำเอายางที่ผสมแล้ว มาขึ้นรูปเป็นลักษณะของชิ้นส่วนต่างๆ โดยอาจนำปัจจัยการผลิตอื่นๆ เช่น ฟ้าใบ เข้ามาเป็นส่วนประกอบ เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง มี 2 ลักษณะคือ

1. เครื่องจักรประเภท (Extrusion) เป็นเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปยาง โดยอาศัยแรงดันจากการหมุนของสกรูดันยางผสมผ่านแม่พิมพ์ออกมา Extrusion ใช้ในการขึ้นรูปยางในส่วนของโครงยางและขอบยาง

2. เครื่องจักรประเภท (Calendar) เป็นเครื่องจักรที่ขึ้นรูปยางโดยลักษณะการรีดยาง โดยลักษณะการรีดยางผสมที่เคลือบหรือฉาบกับวัสดุอื่นๆ ให้เป็นแผ่นที่มีความหนา โดยอาศัยการรีดผ่านลูกกลิ้งจำนวน 2 ลูกในเครื่องจักร ใช้สำหรับขึ้นรูปในส่วนของชั้นฟ้าใบ และเข็มขัดรัดหน้ายางในกรณีที่เป็นยางเรเดียล

ขั้นที่ 7 การอบยาง (Curing Machine)

เครื่องอบยาง(Curing Press) เป็นเครื่องจักรที่ทำหน้าที่อัดลดยางลงบน โครงยางสำเร็จรูป เครื่องจักรมีลักษณะเป็นฝาครอบเปิด-ปิดได้ภายในมีแม่พิมพ์ของลายดอกยางและช่องผ่านไอน้ำ ร้อนเพื่ออัดลดยางและอบให้ยางสุก

ขั้นที่ 8 ตัดเนื้อยางส่วนที่เกิน (Trimming)

ขั้นที่ 9 ตรวจสอบความสมดุลของยาง

ขั้นที่ 10 ได้ยางที่มีคุณภาพตามลักษณะการใช้งาน

2.1.5.3 เศษถุงมือยาง

กระบวนการผลิตถุงมือยาง

การเตรียมน้ำยาง

ผสมน้ำยางกับสารตัวเติมชนิดต่างๆ (Compounding latex) ซึ่งตัวอย่างของสารตัวเติม ได้แก่

- KOH ใช้ปรับค่า pH และช่วยให้ยางคงตัว (Stabilizer)
- Sulphur dispersion เพื่อช่วยให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent)
- ZDBC dispersion ช่วยเร่งปฏิกิริยาของรูป (Accelerator)
- ZnO₂ dispersion ช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา (Activator)
- Wingstay L dispersion เพื่อป้องกันการเสื่อมเนื่องจากออกซิเดชัน (Antioxidant)

แล้วทำการบ่มเป็นเวลา 7 วัน เตรียมให้มีความเข้มข้นตามต้องการแล้วส่งไปยังถังจุ่ม (dip tank) ในกระบวนการผลิต

กระบวนการจุ่มแบบ

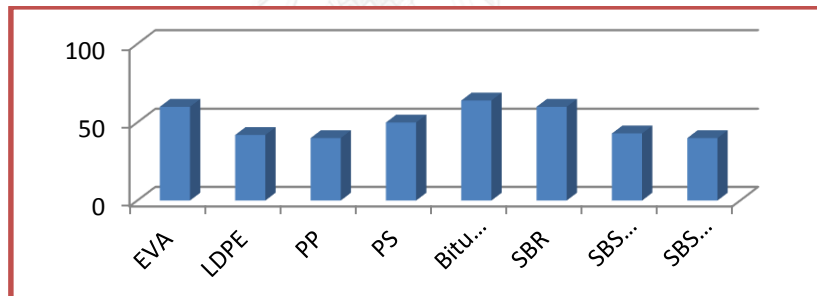
- ทำความสะอาดแบบฟิมพ์ (Mold cleaning) เพื่อทำความสะอาดแป้น และคราบต่างๆ
- จุ่มแบบฟิมพ์ลงในถังสารช่วยจับ (Coagulant tank) เพื่อป้องกันน้ำยางติดแม่พิมพ์ และช่วยให้น้ำยางสามารถจับแม่พิมพ์ได้
- จุ่มแบบฟิมพ์ลงถึงน้ำยาง (Latex dip tank) เพื่อให้ น้ำยางเสียสภาพแล้วจับตัวบนแบบฟิมพ์
- จุ่มแบบฟิมพ์ลงในถังล้าง (Leaching tank) เพื่อกำจัดสารที่ละลายน้ำได้ออก และป้องกันการฉีกขาดเนื่องจากสารตกค้าง
- ผ่านแบบฟิมพ์เข้าไปเตาอบถุงมือ (Cure zone oven) เพื่อให้ถุงมือสุก และระเหยน้ำออก
- จุ่มแบบลงไป ใน ถังสลอร์รี่ (Slurry dip tank) เพื่อให้ถอดถุงมือออกจากแบบง่าย และไม่เหนียวติดกันเมื่อถอดออกมา
- ถอดถุงมือออกจากแบบ

บทที่ 3

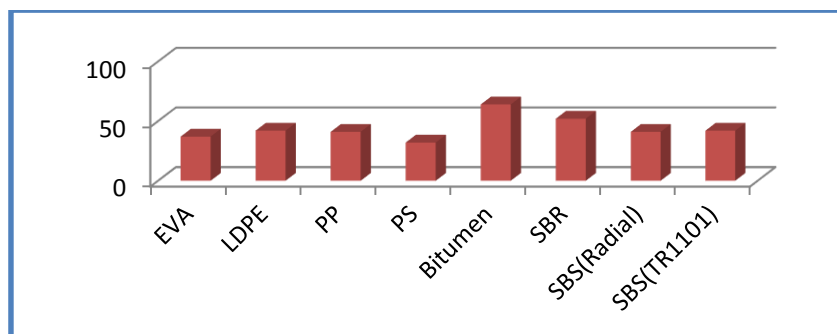
การสืบค้นวรรณกรรม

ปริยาภรณ์ รัตนอุทัยกุล [13]

ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของยางมะตอยด้วยพอลิเมอร์ (PMA) โดยพอลิเมอร์ที่นำมาศึกษาประกอบไปด้วย SBS(TR1101), SBS(Radial), Low Density Polyethylene (LDPE), EVA, High Density Polyethylene (HDPE), Polypropylene(PP), Polystyrene(PS) และ Styrene Butadiene Rubber(SBR) โดยทำการผสมยางมะตอยกับพอลิเมอร์ดังกล่าวด้วยความเข้มข้นที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับยางมะตอยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเตรียมได้จากเครื่องผสม 2 ชนิดคือเครื่องผสมที่มีความเร็วรอบต่ำ (380 รอบต่อนาที) และเครื่องผสมที่มีความเร็วรอบสูง (3,000 รอบต่อนาที) โดยทำการทดสอบค่าความลึกของการเจาะทะลุ (Penetration depth) โดยมีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 9



(a) ผสมด้วยความเร็วต่ำ



(b) ผสมด้วยความเร็วสูง

รูปที่ 9 แสดงค่าความลึกของการเจาะทะลุ (Penetration) ของยางมะตอยดัดแปรด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (a) เครื่องผสมที่มีความเร็วรอบต่ำ (b) เครื่องผสมที่มีความเร็วรอบสูง

จากการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่ายางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ที่มีลักษณะค่อนข้างนิ่มจะมีแนวโน้มให้ค่าความลึกของการเจาะทะลุที่มากในขณะที่ยางมะตอยที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้วยพอลิเมอร์ที่แข็งกว่าจะมีค่าความลึกของการเจาะทะลุที่น้อย (หรือมีค่าความต้านทานการเจาะทะลุสูง) วัสดุกลุ่มแรกจะเหมาะสำหรับการใช้งานในบริเวณที่อากาศเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้ยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์เปราะและแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำส่วนยางมะตอยที่ปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเมอร์ที่ให้ค่าความลึกการเจาะทะลุต่ำจะเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่ร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้ยางมะตอยอ่อนตัวและเสียรูปร่างที่อุณหภูมิสูงนอกจากนี้ผู้วิจัยยังรายงานว่าการผสมที่มีความเร็วรอบต่ำสามารถใช้ผสมยางมะตอยกับ EVA LDPE ได้ดีแต่สำหรับ HDPE SBS และ SBR ควรใช้เครื่องผสมที่มีความเร็วรอบสูงในการผสมเพื่อให้ได้สารผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น

A.F. de Almeida Junior et al (2012)[4]

ในงานวิจัยนี้ต้องการที่จะใช้เศษยางในการคัดแปรยางมะตอยแทนสไตรีนบิวทาไดอีนสไตรีน(SBS) เนื่องจากต้องการลดปริมาณเศษยางซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมรวมถึงลดปริมาณการใช้ SBS ซึ่งมีราคาสูง การศึกษาได้เปรียบเทียบระหว่าง ยางมะตอยที่คัดแปรด้วย SBS และยางมะตอยที่คัดแปรด้วยเศษยาง (TR) สำหรับเศษยางที่ใส่มีปริมาณ 15, 18, 20 และ 23 เปอร์เซ็นต์ (TR-15 TR-18 TR-20 และ TR-23 ตามลำดับ) ค่าที่ทำการทดสอบได้แก่ค่าการเจาะทะลุ (Penetration) จุดวาบไฟ (Flash point) ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) และค่าการยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

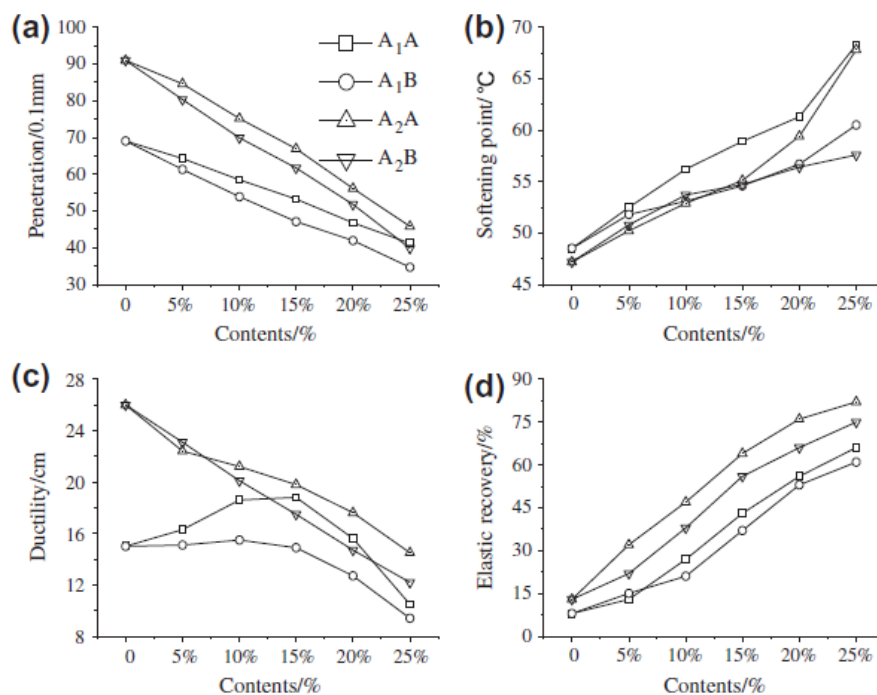
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสมบัติระหว่าง SBS และ เศษยางปริมาณต่างๆ ที่ใช้คัดแปร

สมบัติที่ทดสอบ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	ตัวอย่าง				
			SBS	TR-15	TR-18	TR-20	TR-23
ค่าการเจาะทะลุ (Penetration)	มม.	40-70	48	69	60	45	41
จุดวาบไฟ (Flash point)	องศาเซลเซียส	>235	>235	>235	>235	>235	>235
ค่าจุดอ่อนตัว (Softening point)	องศาเซลเซียส	>60	62	55	58	62	66
ความยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery)	เปอร์เซ็นต์	>85	88	51	54	59	59

จากตารางยางมะตอยที่ตัดแปรด้วย SBS สมบัติทุกชนิดผ่านค่ามาตรฐาน แต่สำหรับยางมะตอยที่ตัดแปรด้วยเศษยางปริมาณต่างๆ มีอยู่ 2 ค่าที่ไม่ผ่านเกณฑ์คือค่าจุดอ่อนตัว (Softening point) และค่าการยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery)

P.Cong et al.(2012) [14]

ทำการศึกษาผลของการตัดแปรยางมะตอย โดยศึกษาตัวแปรคือ วิธีการเตรียมเศษยาง ชนิดของยางมะตอย และปริมาณเศษยางว่าจะมีผลอย่างไรต่อสมบัติของยางมะตอยหลังการตัดแปร และค่าที่ทำการทดสอบได้แก่ ค่าการเจาะทะลุ ค่าการยืดดึง (Ductility) ค่าจุดอ่อนตัว และค่าการยืดหยุ่นกลับ โดยใช้ยางมะตอย 2 ชนิดคือ 60/80 pen grade (A_1) และ 80/100 pen grade (A_2) ซึ่งทั้ง 2 มีขนาดใกล้เคียงกัน และการเตรียมเศษยางทำ 2 วิธีคือ การบดที่อุณหภูมิปกติ (CRA) และการบดที่อุณหภูมิต่ำยิ่งยวด (CRB) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงผลของปริมาณเศษยางต่อสมบัติทางกายภาพต่างๆ

จากรูปแสดงแสดงผลของชนิดของเศษยาง ปริมาณเศษยาง และชนิดของยางมะตอยที่มีผลต่อการตัดแปรยางมะตอยจะเห็นได้ว่าจากรูป (a) ถ้าเพิ่มปริมาณเศษยางขึ้นจะทำให้ค่าการเจาะทะลุลดลง ซึ่งหมายถึงยางมะตอยหลังการตัดแปรมีความแข็งขึ้น รวมทั้งชนิดของเศษยางและวิธีการเตรียมเศษยางก็มีผลต่อค่าการเจาะทะลุเช่นกันสำหรับรูป (b) การเพิ่มปริมาณเศษยางส่งผลต่อค่าการอ่อนตัว

เช่นกันคือเมื่อปริมาณเศษยางมากขึ้นก็ทำให้ค่าการอ่อนตัวสูงขึ้นนั่นคืออ่อนตัวมากขึ้น รูป (c) แสดงค่าการยืดดึงเมื่อปริมาณเศษยางมากขึ้น ค่ามีแนวโน้มลดลง แต่สำหรับ A₁A แนวโน้มจะต่างจากตัวอย่างอื่นๆ รูป (d) แสดงค่าการยืดหยุ่นกลับ เนื่องจากเศษยางมีความยืดหยุ่นกว่ายางมะตอยดังนั้นเมื่อมีปริมาณเศษยางมากขึ้นจึงทำให้ค่าความยืดหยุ่นกลับสูงขึ้น

Shutang Liu et al. (2009) [15]

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของเศษยางที่ต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ TR (Tread rubber) HT (Heavy truck) ST (small truck) และ AT (Agriculture tire) ผลของขนาดของเศษยางโดยเลือกมา 2 ขนาดคือ 60 และ 80 mesh และผลของปริมาณเศษยาง 3 ค่าคือ 16 20 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับโดยใช้ยางมะตอยชนิดเดียวคือ AH-70 ค่าที่ทำการศึกษาได้แก่ค่าดัชนีการเจาะทะลุ ค่าการยืดดึง และค่าจุดอ่อนตัว ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

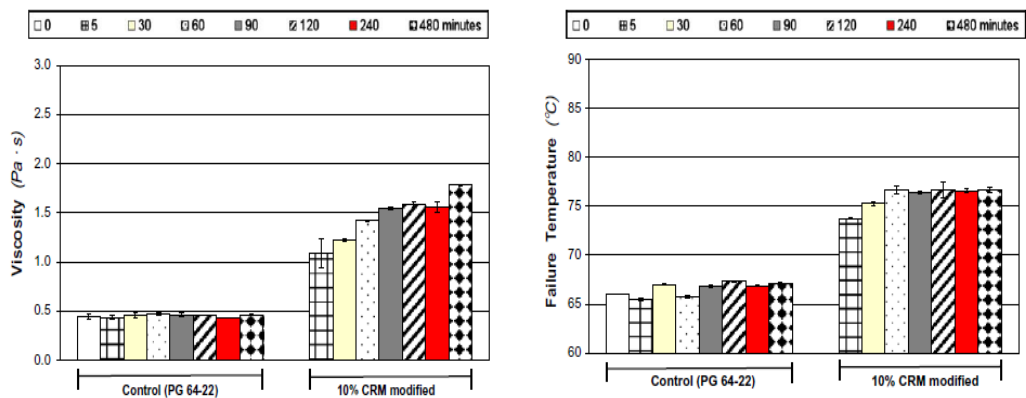
ตารางที่ 2 แสดงผลของชนิด ปริมาณ และขนาดของเศษยางที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพต่างๆ

Crumb rubber content (%)	Crumb rubber type	Softening point (°C)		Ductility at 5 °C (cm)		PI	
		60 mesh	80 mesh	60 mesh	80 mesh	60 mesh	80 mesh
16	HT	61.2	62.0	22.0	22.7	-0.2266	-0.5686
	ST	58.7	59.3	20.1	21.3	-0.2833	-0.1093
	AT	63.0	62.7	14.2	14.1	-0.3044	-0.2188
	TR	64.5	66.2	25.7	26.9	-0.0065	-0.0067
20	HT	68.5	69.0	19.7	19.0	0.5560	0.6644
	ST	66.3	67.4	18.5	18.9	0.6685	0.3664
	AT	69.2	71.3	10.1	11.2	0.3274	0.4034
	TR	68.2	68.7	22.3	22.9	0.6415	0.6876
24	HT	71.0	71.3	18.1	18.0	0.9328	1.0488
	ST	69.5	70.7	19.2	20.3	0.7290	0.7260
	AT	68.5	69.7	11.4	12.5	0.5879	0.5974
	TR	73.9	74.7	20.7	20.0	0.8511	0.8872

ข้อมูลจากตารางแสดงการเปรียบเทียบค่า 3 ค่าคือปริมาณยาง ชนิดของยาง และขนาดของยางเมื่อกำหนดให้ปริมาณยางและชนิดของยางคงที่และทำการเปรียบเทียบค่าขนาดของยางจะเห็นว่า ค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อกำหนดให้ปริมาณยางและขนาดของยางและทำการเปรียบเทียบค่าชนิดของยางจะเห็นว่าค่ามีความต่างกันเล็กน้อย เมื่อกำหนดให้ขนาดยางและชนิดของยางคงที่และทำการเปรียบเทียบค่าปริมาณยางจะเห็นว่าค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจึงสรุปว่า ค่าที่มีผลต่อสมบัติของยางมะตอยหลังการตัดแปรด้วยเศษยางที่สุดคือปริมาณยางรองลงมาคือชนิดของยาง และ มีผลน้อยที่สุดคือขนาดของยาง

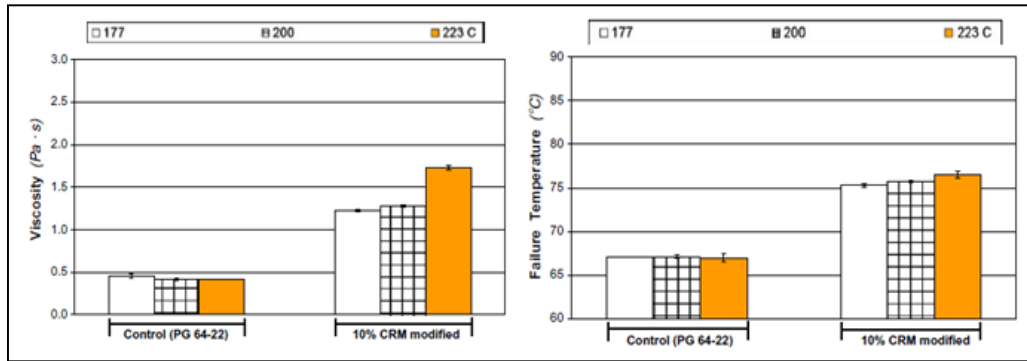
K.-D.Jeong et al.(2009) [16]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อสมบัติของยางมะตอยหลังตัดแปรด้วยเศษยางซึ่งตัวแปรที่ศึกษาได้แก่เวลาในการผสมเศษยางและยางมะตอยทำการทดลอง 7 ค่าคือ 5, 30, 60, 90, 120, 240 และ 480 นาที อุณหภูมิในการผสม 3 ค่าคือ 177, 200 และ 223 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษยาง 4 ค่าคือ 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ยางมะตอยชนิดเดียวคือ PG 64-22 ขนาด 40 mesh โดยค่าที่ทำการศึกษา คือค่าความหนืดและอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูป (Failure Temperature) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบความหนืด และอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปต่อเวลาในการผสมสาร

สำหรับกลุ่มควบคุม (ไม่ได้ผสมเศษยาง) เมื่อเพิ่มเวลาในการผสมสูงขึ้นค่าความหนืดจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่สำหรับกลุ่มที่เติมเศษยาง 10 เปอร์เซ็นต์ค่าความหนืดจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการผสมเพิ่มขึ้น เหตุที่กลุ่มที่มีเศษยางมีค่าความหนืดสูงขึ้นเมื่อเวลาในการกวนมากขึ้นเนื่องจาก ยางมีคุณสมบัติของการยึดติด เมื่อเวลาผสมมากขึ้นทำให้เกิดการยึดติดกันมากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืดสูงขึ้น ซึ่งแนวโน้มจะคล้ายกับค่าอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปคือกลุ่มควบคุมเมื่อเพิ่มเวลาในการผสมสูงขึ้นค่าอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่สำหรับกลุ่มที่เติมเศษยาง 10 เปอร์เซ็นต์ค่าอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปมีแนวโน้มสูงในช่วง 60 นาทีแรกหลังจากนั้นถึงจะเพิ่มเวลาขึ้นค่าก็แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบความหนืด และอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปต่ออุณหภูมิในการผสมสาร

จากรูปที่ 12 แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมแทบจะไม่มีผลความหนืดของกลุ่มควบคุม แต่จะมีผลต่อกลุ่มที่เติมเศษยาง 10 เปอร์เซ็นต์คือความหนืดจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการผสมสูงขึ้นและผลของอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปก็จะมีแนวโน้มคล้ายกันคือคือกลุ่มควบคุมเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมสูงขึ้นอุณหภูมิที่ทำให้เสียรูปจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และสำหรับกลุ่มที่เติมเศษยาง 10 เปอร์เซ็นต์ค่าก็มีแนวโน้มสูงขึ้นแต่ไม่มากนัก

Daryoush Y. K. et al. (2015) [17]

ทำการศึกษาผลของยางคลัมป์ที่ใช้ในการตัดแปรยางมะตอย โดยยางมะตอยที่ใช้เป็นเกรด 60/70 และยางคลัมป์ ที่ใช้ตัดแปรก็มีปริมาณ 4%, 8%, 12%, 16% และ 20% ตามลำดับ ผลที่ได้หลังการตัดแปรแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบค่าพื้นฐานของยางคลัมป์ตัดแปรยางมะตอยเทียบกับมาตรฐาน ASTM D6114

Test	Test condition	Standard		Test Result					
		Max	Min	0%	4%	8%	12%	16%	20%
Penetration	25 °C, 100 gr, 5 s	75	25	68	52	48	43	42	41
Softening Point (°C)	R&B		57.2	51.8	52.5	57.4	60.6	62.2	64.9
Elastic Recovery (%)	25 °C		25		23	33	41	48	54

จากตารางจะเห็นว่าเมื่อปริมาณยางคลัมป์มากขึ้นค่าต้านทานการเจาะทะลุมีแนวโน้มลดลง โดยที่ปริมาณยางคลัมป์ 20% จะทำให้ค่าต้านทานการเจาะทะลุลดลง 27% เมื่อเทียบกับยางมะตอยก่อน

การตัดแปร ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางคลัมป์มากขึ้น โดยที่ปริมาณยางคลัมป์ 20% จะทำให้ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น 25% และค่าการยืดหยุ่นกลับก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยางคลัมป์ที่ใช้ตัดแปรและที่ปริมาณยางคลัมป์ที่ 8% ขึ้นไปค่าที่ได้ก็ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

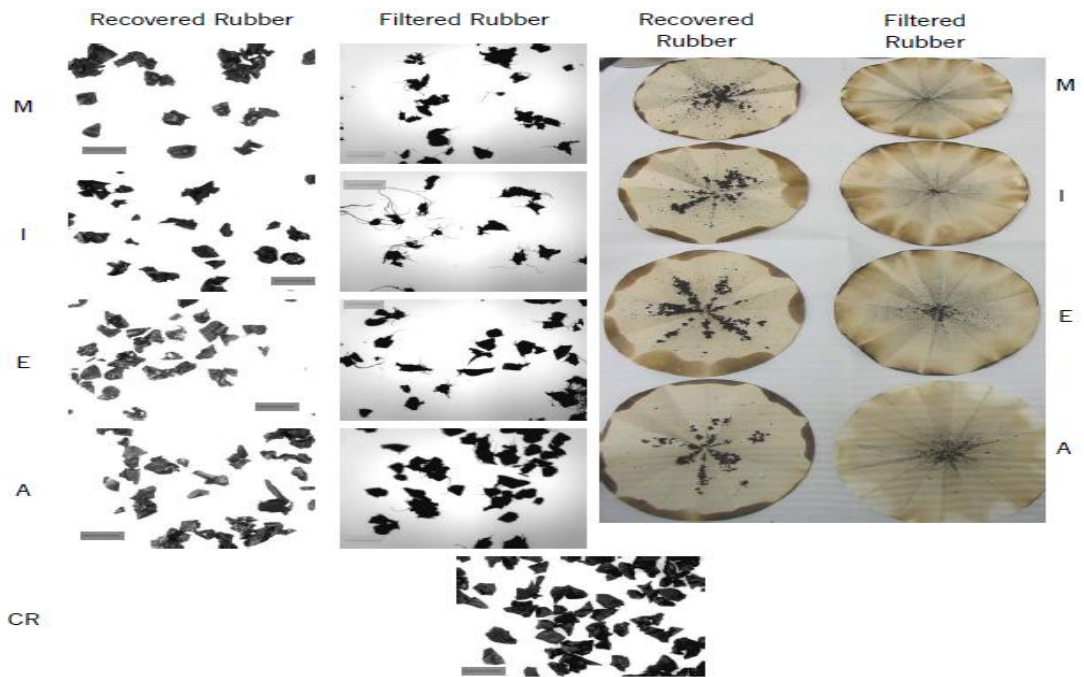
Peralta et al. (2009) [18]

งานวิจัยนี้ศึกษาพื้นฐานวิทยาของเศษยางรถยนต์และสมบัติทางกายภาพของยางมะตอยเมื่อนำเศษยางรถยนต์มาใช้ในการตัดแปรยางมะตอย โดยยางมะตอยที่ใช้มีอยู่ 4 ชนิดแต่ละชนิดมีค่าด้านทานการเจาะทะลุที่ต่างกันคือ A เกรด 10/20 E เกรด 40/50 I เกรด 60/70 และ M เกรด 150/200 ทำการผสมเศษยางรถยนต์ปริมาณ 21% โดยน้ำหนักเข้ากับยางมะตอยแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสทำการกวนผสม 60 นาที กรองเศษยางออกโดยวิธี Basket drainage นำมาล้างยางมะตอยออกโดยโทลูอีน เศษยางที่ค้างอยู่ใน Basket เราเรียกว่า Recovered Rubber ส่วนเศษยางที่ผ่าน Basket ไปได้เราเรียกว่า Filtered Rubber นำไปอบแล้วส่งคู่มือศึกษาของเศษยางหลังการตัดแปรยางมะตอยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 13 และเมื่อทำการวัดน้ำหนักและความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเศษยางรถยนต์ก่อนและหลังการตัดแปรก็ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงผลของน้ำหนักและความเข้มข้นของเศษยางก่อนและหลังการตัดแปร

ชนิด	เกรด	น้ำหนักเศษยางก่อนตัดแปร (กรัม)	น้ำหนักเศษยางหลังตัดแปร (กรัม)	การเปลี่ยนแปลง (%)	ความเข้มข้นยางก่อนตัดแปร (wt%)	ความเข้มข้นยางหลังตัดแปร (wt%)
A	10/20	428.60	574.40	25.23	21	70.10
B	40/50	210.74	349.03	39.60	21	81.13
I	60/70	210.84	379.57	44.45	21	77.87
M	150/200	210.11	434.39	51.60	21	81.84

จากตารางที่ 4 แสดงว่าน้ำหนักและความเข้มข้นของเศษยางรถยนต์หลังการตัดแปรจะเพิ่มขึ้นในทุกๆ ชนิดของยางมะตอยที่ใช้ตัดแปรเนื่องจากเมื่อกวนผสมเศษยางและยางมะตอยเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ส่วนที่เป็นองค์ประกอบเบาในยางมะตอยเกิดการแพร่เข้าสู่โครงสร้างของเศษยางทำให้เศษยางเกิดการพองตัวขึ้น



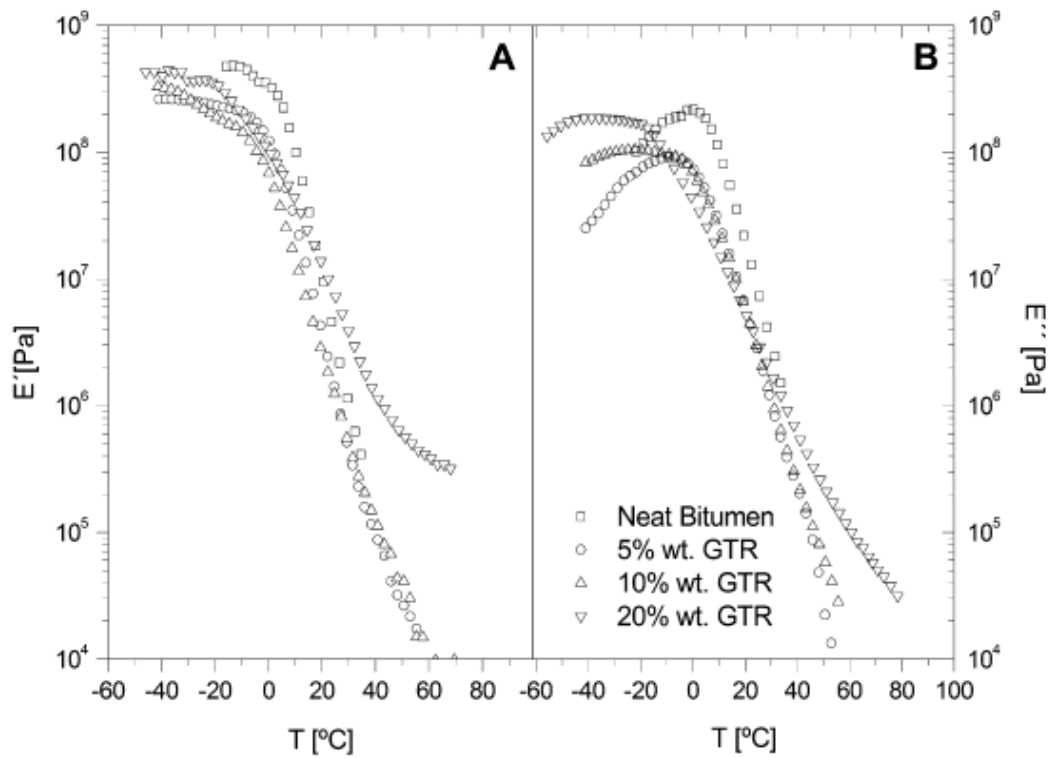
รูปที่ 13 แสดงสัณฐานวิทยาของเศษยางรถยนต์หลังนำไปตัดแปรรูปอย่างละเอียดแต่ละชนิด

Navarro et al. (2010) [19]

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติด้านความร้อนและสมบัติเชิงกลของยางมะตอยเมื่อนำเศษยางรถยนต์มาใช้ในการตัดแปรรูป ยางมะตอยที่ใช้คือเกรด AC 150/200 โดยใช้ปริมาณเศษยางรถยนต์ที่ใช้ในการตัดแปรรูป 5%, 10% และ 20% ทำการทดสอบโดยเครื่องวัดสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ ได้ค่ามอดูลัสสะสมและค่ามอดูลัสสูญเสีย โดยจุดสูงสุดของกราฟมอดูลัสสูญเสียคือค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วซึ่งดูได้จากรูปที่ 14 และค่าที่วัดได้แสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งจะพบว่าเมื่อใช้ปริมาณเศษยางที่ใช้ในการตัดแปรรูปมากขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่ต่ำกว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว วัสดุจะมีลักษณะแข็งเปราะและถ้าอุณหภูมิสูงกว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว วัสดุก็จะมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยาง ดังนั้นถ้าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงแสดงว่ามีช่วงที่วัสดุมีลักษณะคล้ายยางมากขึ้น วัสดุก็จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำได้มากขึ้น

ตารางที่ 5 แสดงผลของปริมาณที่ใช้ในการตัดแปรงยางมะตอยที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว

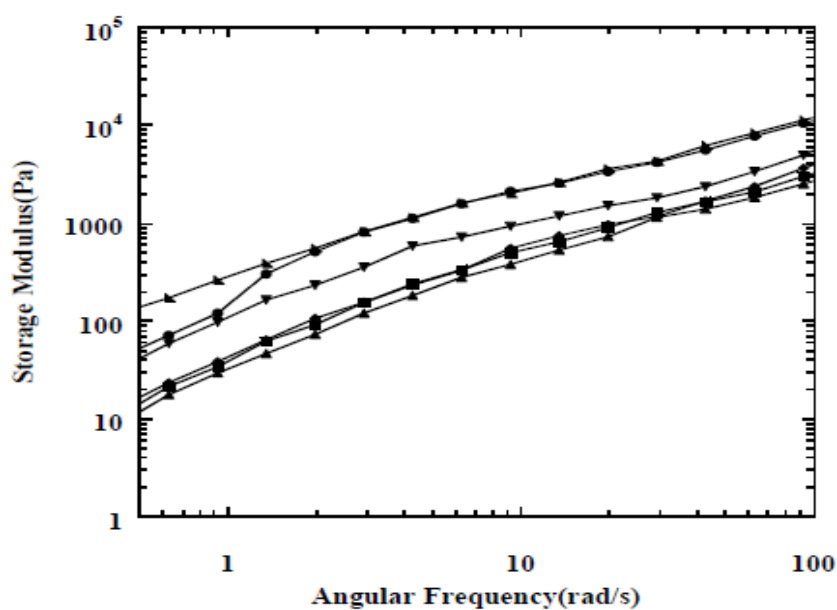
ปริมาณเศษยางที่ใช้ตัดแปรง (wt%)	ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (°C)
ยางมะตอยก่อนตัดแปรง	-1.5
5	-8.1
10	-18.5
20	-38.4



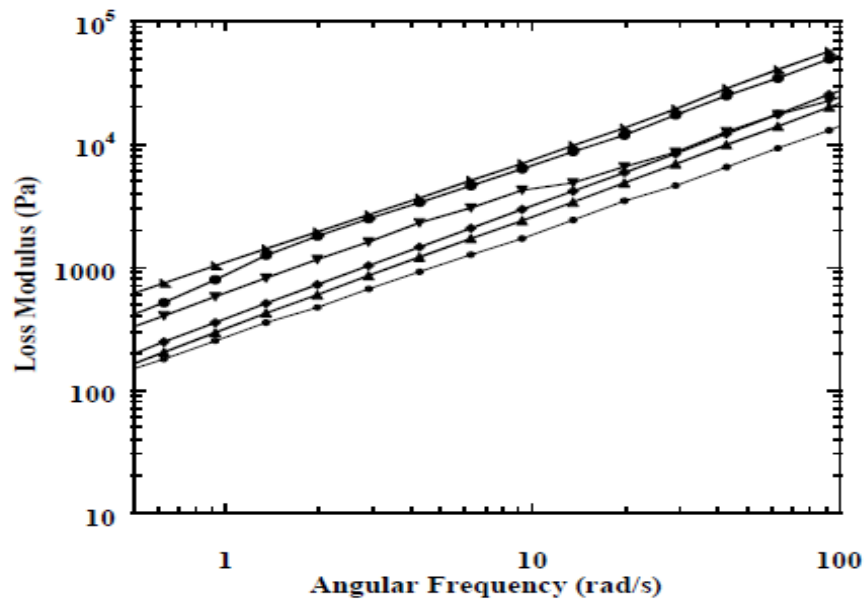
รูปที่ 14 แสดงค่ามอดูลัสสะสม (E') และมอดูลัสสูญเสีย (E'') กับอุณหภูมิ ของยางมะตอยตัดแปรงด้วยยางล้อยยนต์ที่ปริมาณต่างๆ

Anchalee (2013) [20]

ทำการศึกษาสมบัติรีออลยีของยางมะตอยตัดแปรด้วยเบนซอซาซีน โดยใช้ปริมาณเบนซอซาซีนเรซินในการตัดแปรปริมาณต่างๆกันตั้งแต่ 1-9% โดยน้ำหนัก ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรีออมิเตอร์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 15 และ 16 จากรูปจะเห็นว่าทั้งมอดูลัสการสะสม และมอดูลัสการสูญเสีย มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเบนซอซาซีนซึ่งการที่ค่ามอดูลัสการสะสมและมอดูลัสการสูญเสียก็แสดงว่าวัสดุมีความยืดหยุ่นมากขึ้น



รูปที่ 15 แสดงค่ามอดูลัสการสะสมของยางมะตอยตัดแปรด้วยเบนซอซาซีนปริมาณต่างๆ: (▲) ยางมะตอยก่อนการตัดแปร, (■) 1wt%, (◆) 3wt%, (▼) 5wt%, (●) 7wt%, (▲) 9wt%.



รูปที่ 16 แสดงค่ามอดูลัสสูญเสียของยางมะตอยตัดแปรด้วยเบนซอกซาซีนปริมาณต่างๆ: (▲) ยางมะตอยก่อนการตัดแปร, (■) 1wt%, (◆) 3wt%, (▼) 5wt%, (●) 7wt%, (▲) 9wt%.

บทที่ 4

วิธีการทดลอง

4.1 การเตรียมตัวอย่าง

ใช้ยางมะตอยเกรด AC 60/70 จากบริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน) สมบัติของยางมะตอย แสดงตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สมบัติของยางมะตอยเกรด 60/70

การทดสอบ	คุณสมบัติ
ค่าการเจาะลึก (25°C)	63
ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัว (°C)	47
ค่าการยืคดึง (cm)	100
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	1.042

เศษถุงมือที่ใช้เป็นถุงมือที่เป็นของเสียจากกระบวนการผลิตชนิดยางธรรมชาติ จากบริษัทคาร์ดิแนล เฮลท์ (ประเทศไทย) จำกัด ส่งไปบดที่บริษัท Jiangyin City Mingdong Machinery Manufacture ประเทศจีน อุณหภูมิการบด -196 องศาเซลเซียส ผงยางที่ได้มีขนาดแสดงดังตารางที่ 7 และค่าพื้นฐานของการทดสอบถุงมือยางแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 แสดงขนาดของผงยางที่ได้จากการบด

ขนาด (ไมโครเมตร)	ปริมาณ (%)
600	0.6
300	16.1
250	30.8
180	49.5
106	3.0

ตารางที่ 8 ค่าพื้นฐานของการทดสอบถุงมือยาง

การทดสอบ	คุณสมบัติ
Cuff dimension (mm)	0.15
Palm dimension (mm)	0.22
Finger dimension (mm)	0.23
Tensile strength (kg/cm ²)	293
Elongation (%)	867

การตัดแปรงมตะตอย

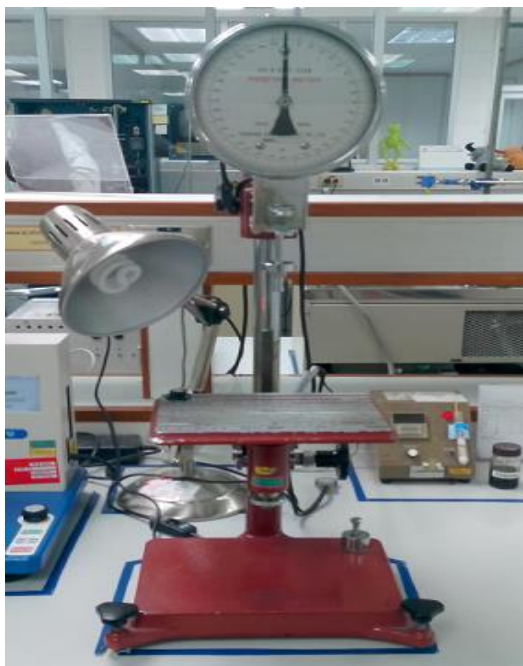
ใช้ยางมตะตอยเกรด 60/70 ผสมกับผงยางจากเศษถุงมือขนาด 180 – 250 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 1%, 3%, 5% และ 7% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 150 ± 5 และ 180 ± 5 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 60 นาที ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที ผสมโดยใช้เครื่องผสมยี่ห้อ Silverson

รุ่น LSM

4.2 วิธีการทดสอบ

4.2.1 การวัดค่าการเจาะลึก

การทดสอบค่าการเจาะลึก (Penetration) เป็นการทดสอบค่าความเหนียวข้น (Consistency) ของยางมตะตอย โดยจะเป็นการวัดระยะทางของเข็มที่เข็มมาตรฐานเจาะลงในยางมตะตอย ในแนวตั้ง ภายใต้น้ำหนัก เวลา และอุณหภูมิที่กำหนด 1 ค่าการเจาะลึกเท่ากับ 1 ใน 10 ของมิลลิเมตร ค่าการเจาะลึกจะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5 [21] เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการเจาะลึกแสดงดังรูปที่ 17 ทำการทดสอบค่าการเจาะลึกอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างใส่ภาชนะบรรจุแล้ววางในอ่างควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นนำตัวอย่างไปวางบนเครื่องทดสอบ และเจาะด้วยเข็มมาตรฐาน และแกนที่มีน้ำหนักรวม 100 กรัม เวลา 5 วินาที



รูปที่ 17 แสดงเครื่องวัดค่าการเจาะลึก

4.2.2 การวัดค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัว

ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัว (Softening point) คืออุณหภูมิที่ยางมะตอยกลายเป็นของขึ้นเหลว ซึ่งจะมีผลต่อการทำให้ผิวหน้าถนนเกิดการเยิ้มได้ ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D36 (ring and ball method) [22] เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าการเจาะลึกแสดงดังรูปที่ 18 ทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างของยางมะตอยซึ่งหล่อเป็นแผ่นกลมและมีความหนาตามที่กำหนดได้ถูกบรรจุอยู่ในวงแหวนทองเหลือง ตรงกลางของแผ่นยางมะตอยมีลูกโลหะกลมที่มีขนาดและน้ำหนักตามมาตรฐานวางอยู่ตรงกลาง ทั้งหมดนี้จะถูกแช่ในน้ำซึ่งจะถูกต้มให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที่อุณหภูมิที่แผ่นยางมะตอยถูกถ่วงด้วยลูกโลหะกลมจมลงจนแตะแผ่นโลหะที่รองรับมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส



รูปที่ 18 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิจุดอ่อนตัว
แหล่งที่มา : <http://en.petrotech.ru/en/equipment>

4.2.3 การวัดค่าการยืดหยุ่นกลับ

การวัดค่าการยืดหยุ่นกลับ (Elastic Recovery) เป็นการวัดการคืนตัวกลับหลังจากถูกดึงยืดและตัดขาด การวัดค่าการยืดหยุ่นกลับเป็นการทดสอบตามมาตรฐานกรมทางหลวงเรื่อง วิธีการทดลองหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องดึง (ทล.-ท. 415/2548) อุปกรณ์ที่ใช้เป็นเครื่องดึงมีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องดึงที่ใช้ในการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D 113 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 19 ทำการทดสอบโดยสวมห่วงที่ปลายของตัวยึดหัวจับตัวอย่างทดลองทั้งสองข้าง ให้เข้ากับขอหรือสลักของเครื่องดึงตัวอย่างทดลอง เดินเครื่องเพื่อเคลื่อนหัวจับเครื่องดึง (Traveling Carriage) ออกด้วยความเร็วคงที่ 5 เซนติเมตรต่อนาที ให้ได้ระยะยืด 10 ± 0.25 เซนติเมตร ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงจากที่กำหนดได้ไม่เกิน $\pm 5\%$ จากนั้นหยุดเครื่องไม่ให้มีการยืดของตัวอย่างต่อไป และรีบใช้กรรไกรตัดตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน โดยแบ่งครึ่งที่จุดกึ่งกลาง ปล่อยให้ตัวอย่างทดลองอยู่ในเครื่องดึงตัวอย่างทดลองต่อไปโดยไม่มีการรบกวนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นค่อย ๆ เคลื่อนหัวจับเครื่องดึงกลับมาที่ตำแหน่งที่ปลายของตัวอย่างทดลองเริ่มแรกกัน ถ้าปลายของตัวอย่างทดลองโค้งลง ให้ค่อย ๆ ยกปลายขึ้นมาอยู่ที่ระดับเดิมก่อนที่จะปรับให้ปลายทั้งสองมาประกบกัน แล้วบันทึกระยะยืดกลับของตัวอย่างทดลองที่ปลายทั้งสองเริ่มประกบกัน



รูปที่ 19 แสดงเครื่องวัดค่าการยืดหยุ่นกลับ

แหล่งที่มา : <http://www.aimil.com/product>

4.2.4 การวัดค่าความหนืด

การวัดค่าความหนืด (Viscosity) เป็นการวัดการไหลของยางมะตอย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกวนผสม การวัดค่าความหนืดทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D4402 [23] เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบค่าความหนืดแสดงดังรูปที่ 20 ทำการทดสอบโดยใช้รูคฟิลด์ อัตราเงื่อนไข 18.6 วินาที⁻¹ แกน(spindle) 21 ที่อุณหภูมิ 135 องศา หน่วยที่วัดได้เป็นเซนติพอยส์ (cP)



รูปที่ 20 แสดงเครื่องวัดค่าความหนืด

4.2.5 การวัดค่าความหนาแน่น

การวัดค่าความหนาแน่น (Density) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D70-09 โดยใส่ตัวอย่างลงในขวดพิกโนมิเตอร์และชั่งน้ำหนัก เมื่อปริมาตรที่เหลือถูกแทนที่ด้วยน้ำขวดพิกโนมิเตอร์ที่ประกอบด้วยตัวอย่างและน้ำที่บรรจุอยู่ ณ อุณหภูมิทดสอบถูกชั่งน้ำหนัก ความหนาแน่นของตัวอย่างคำนวณได้จากน้ำหนักของตัวอย่างและน้ำหนักของน้ำแทนที่ตัวอย่างที่บรรจุในขวดพิกโนมิเตอร์ หน่วยที่วัดได้คือ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

4.2.6 การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analysis)

การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ ของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือจะทำการทดสอบโดย เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์โมเดล DMA242 จากบริษัท NETZSCH Instrument การทดสอบใช้แรงกระทำชนิดแรงคดโค้ง (Three point bending) และใช้ขนาดตัวอย่างกว้าง 8.0-10.5 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร สูง 3.5-4.0 มิลลิเมตร ทดสอบที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ อุณหภูมิที่ทำการทดสอบอยู่ในช่วง -80 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้สภาวะในโตรเจนเพื่อหาค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus, E') และค่ามอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'')

4.2.7 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric Analysis)

การวิเคราะห์ความเสถียรของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือทำการวัดด้วย เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน รุ่น TGA/SDTA 851° จาก บริษัท เมทเธอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด โดยเตรียมตัวอย่างขนาดประมาณ 6 มิลลิกรัม ทำการทดสอบ โดยให้ความร้อนตั้งแต่ 50 ถึง 850 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้สภาวะในโตรเจน เพื่อหาค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณเถ้าถ่านที่ 800 องศาเซลเซียส

4.2.8 การวัดสัณฐานวิทยา (Morphology) โดยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

การวัดสัณฐานวิทยาของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือทำการวัดด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยี่ห้อ Bruker รุ่น Hyperion โดยเตรียมตัวอย่างขนาดประมาณ 0.1 มิลลิกรัม วางบนเพลทแล้วค่อยๆเพิ่มความร้อนด้วยอัตรา 1 องศาเซลเซียส/นาที ให้ได้เป็นแผ่นบางๆแล้วนำไปส่องเพื่อถ่ายรูป

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การตัดแปรงยางมะตอยโดยใช้ผงยางจากเศษถุงมือ เป็นการศึกษาปริมาณผงยางและอนุภาคนิวเมอโรนในการผสม ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติด้านความร้อนของยางมะตอย โดยยางมะตอยที่ใช้ในการศึกษาเป็นยางมะตอยเกรด AC 60/70 เนื่องจากเป็นเกรดมาตรฐานที่ใช้งานทางในประเทศไทย โดยเมื่อตอนเสนอโครงร่างวิทยานิพนธ์ กำหนดให้ใช้ปริมาณผงยาง 5%, 10%, 15%, 20% และ 25% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อทำการทดลองผสมผงยางเข้ากับยางมะตอยพบว่าที่ปริมาณผงยาง 9% มีความหนืดขณะผสมค่อนข้างมาก จึงนำตัวอย่างดังกล่าวไปทดสอบค่าความหนืดที่ 135 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าได้ค่าความหนืดสูงกว่า 3000 เซนติพอยด์ (cP) ซึ่งเกินกว่า มอก. 2156 - 2547 (มอดิไฟด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง) ซึ่งกำหนดค่าที่ไม่เกิน 3000 เซนติพอยด์ จึงได้ลดปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรงเป็น 1%, 3%, 5% และ 7% อนุภาคนิวเมอโรนที่ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการผสม 1 ชั่วโมง ความเร็วในการผสม 3,000 รอบต่อนาที การทดสอบสมบัติด้านกายภาพและสมบัติด้านความร้อนของยางมะตอยตัดแปรงด้วยเศษถุงมือมีดังนี้

1. ความเหมาะสมในการกวนผสม ทดสอบโดย
 - ค่าความหนืดที่ 135 องศาเซลเซียส
2. ความเหนียวข้น (Consistency) ทดสอบโดย
 - ค่าการเจาะลึก และค่าดัชนีการเจาะลึก
3. ความไวต่อการเปลี่ยนอนุภาคนิวเมอโรน ทดสอบโดย
 - ค่าอนุภาคนิวเมอโรนในตัว
4. ความยืดหยุ่น (Elasticity) ทดสอบโดย
 - ค่าความยืดหยุ่นกลับ
5. เสถียรภาพด้านความร้อน ทดสอบโดย
 - การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน
6. สมบัติเชิงกล ทดสอบโดย
 - การวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analysis)

5.1 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถูมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าความหนืดที่ 135 องศาเซลเซียส ของยางมะตอยตัดแปร

ค่าความหนืดวัดโดยบรูคฟิลด์ อัตรารีออน 18.6 วินาที⁻¹แกน(spindle) 21 ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส มาตรฐานอยู่ที่ไม่เกิน 3000 เซนติพอยด์ (cP) ตามมาตรฐานมอก. 2156 - 2547 (มอดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง) [24] ถ้าความหนืดสูงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกวนผสม [17] จากรูปที่ 21 แสดงค่าความหนืดที่ 135 องศาเซลเซียสของยางมะตอยก่อนการตัดแปรและยางมะตอยที่ตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถูมือโดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 1-7% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิในการผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าค่าความหนืดของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจะมีค่าสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ตัดแปร โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าความหนืด 289 เซนติพอยด์ และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าความหนืดเท่ากับ 570, 950, 1,550 และ 2,380 เซนติพอยด์ โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 1% และ 3% ความชันในการเพิ่มขึ้นของกราฟความหนืดต่ำกว่าที่ 5% และ 7% และ ที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 8.2 เท่า ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าความหนืด 289 เซนติพอยด์ และ ยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าความหนืดเท่ากับ 650, 980, 1,680 และ 2,450 เซนติพอยด์ โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ลักษณะการเพิ่มขึ้นของความชันของกราฟความหนืดคล้ายกับที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส แต่มีความชันมากกว่าเล็กน้อยโดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 8.5 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความหนืดสูงกว่าที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส 2.9% และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรยางมะตอย ที่ปริมาณยางคลัมป์ที่ใช้ตัดแปร 8% จะให้ค่าความหนืด 800 เซนติพอยด์ ซึ่งต่ำกว่าการใช้ผงยางจากเศษถูมือเพียง 7% ที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียสถึง 3 เท่า [17] ซึ่งแสดงว่าค่าความหนืดของการตัดแปรยางมะตอยโดยใช้ผงยางจากเศษถูมืออย่างให้ความหนืดค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรแต่ค่าทั้งหมดยังอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด [21] การที่ยางมะตอยตัดแปรมีความหนืดสูงขึ้นเนื่องมาจากกระหว่างที่อนุภาคยางกับยางมะตอยผสมกันจะเกิดปฏิกิริยากันแต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ใช่ปฏิกิริยาเคมี แต่เป็นการดูดซับองค์ประกอบที่มีน้ำหนักเบาของยางมะตอยเช่น น้ำมันอะโรมาติกเข้าไปยังสายโซ่ของยาง และอนุภาคยางเกิดการพองตัวจะทำให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลงมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น [18]

5.2 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถูมือและอนุกรมการผสมที่มีต่อค่าการเจาะลึก (Penetration) ของยางมะตอยตัดแปร

การทดสอบค่าการเจาะลึก (Penetration) จะสามารถบอกค่าความเหนียวข้น (Consistency) และความแข็ง (Hardness) ของวัสดุ โดยถ้าค่าการเจาะลึกต่ำหมายถึงวัสดุนั้นมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่มีค่าการเจาะลึกสูง รูปที่ 22 แสดงกราฟ ค่าการเจาะลึกของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถูมือ โดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 1-7% โดยน้ำหนักที่ 25 องศาเซลเซียส และอนุกรมการผสมที่ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจะมีค่าการเจาะลึกต่ำกว่ายางมะตอยที่ไม่ตัดแปร และค่าการเจาะลึกจะต่ำลงตามลำดับเมื่อปริมาณผงยางมากขึ้น โดยที่อนุกรมการผสมเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าการเจาะลึกเท่ากับ 63 และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าการเจาะลึกเท่ากับ 60, 53, 42 และ 38 โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ที่ปริมาณผงยางที่ใช้ตัดแปร 1%, 3% และ 5% กราฟค่าการเจาะลึกลดลงด้วยความชันมากกว่าที่ปริมาณผงยางที่ใช้ตัดแปร 7% อย่างไรก็ตามการตัดแปรที่ปริมาณผงยางเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าการเจาะลึกลดลงจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปรถึง 39.7% ที่อนุกรมการผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าการเจาะลึกเท่ากับ 63 และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าการเจาะลึกเท่ากับ 60, 50, 40 และ 35 โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ลักษณะการลดลงของกราฟค่าการเจาะลึกที่อนุกรมการผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียสมีค่าใกล้เคียงกันแต่ที่อนุกรมการผสม 180 องศาเซลเซียส มีค่าความชันของการลดลงที่สูงกว่าโดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าการเจาะลึกลดลงจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 44.4% และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อนุกรมการผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณผงยาง 7% เท่ากัน ที่อนุกรมการผสม 180 องศาเซลเซียสจะมีค่าการเจาะลึกต่ำกว่าที่อนุกรมการผสม 150 องศาเซลเซียส 7.9% และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรยางมะตอย ที่ปริมาณยางคลัมป์ที่ใช้ตัดแปร 8% จะให้ค่าการเจาะลึกลดลง 29.4% เมื่อเทียบกับยางมะตอยไม่ตัดแปร เมื่อใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรปริมาณ 20% จะให้ค่าการเจาะลึกเท่ากับ 41 ซึ่งค่าการเจาะลึกลดลง 39.7% เมื่อเทียบกับยางมะตอยไม่ตัดแปร ซึ่งจะเท่ากับการใช้ผงยางจากเศษถูมือเพียง 7% ที่อนุกรมการผสม 150 องศาเซลเซียสเท่านั้น แต่เมื่อเทียบกับการใช้ผงยางจากเศษถูมือเพียง 7% ที่อนุกรมการผสม 180 องศาเซลเซียสการใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรจะให้ค่าการเจาะลึกสูงกว่า [17] ค่าการเจาะลึกของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยาง โดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 0-7% แสดงดังตารางที่ 9

5.3 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัว (Softening Point) ของยางมะตอยตัดแปร

อุณหภูมิจุดอ่อนตัวเป็นหนึ่งในตัวแปรหลักและเป็นหนึ่งในมาตรฐานที่จะต้องทำการทดสอบสำหรับยางมะตอยที่จะใช้ในการทำถนน อุณหภูมิจุดอ่อนตัวคืออุณหภูมิที่ยางมะตอยกลายเป็นของขุ่นเหลวซึ่งจะมีผลต่อการทำให้ผิวหน้าถนนเกิดการเยิ้มได้ การที่อุณหภูมิจุดอ่อนตัวสูงขึ้นจึงแสดงว่ายางมะตอยทนต่อความร้อนได้สูงขึ้นเกิดการเยิ้มได้ยากขึ้น จากรูปที่ 23 แสดงกราฟค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือโดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกัน ตั้งแต่ 1-7% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการผสมที่ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจะมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ตัดแปรและค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวจะสูงขึ้นตามลำดับเมื่อปริมาณผงยางมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเท่ากับ 47 องศาเซลเซียส และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเท่ากับ 48.5, 51, 53.2 และ 62.7 องศาเซลเซียส ปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปร 1%, 3% และ 5% ที่ปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปร 3% มีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเท่ากับ 51 องศาเซลเซียสซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง [25] ที่กำหนดอุณหภูมิจุดอ่อนตัวไม่ต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 33.4% ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเท่ากับ 47 องศาเซลเซียส และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเท่ากับ 48.7, 50, 53.6 และ 62.7 องศาเซลเซียส โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 33.4% และเมื่อเปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณผงยาง 7% เท่ากัน ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียสจะมีค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวสูงกว่าที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส 3.3% และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรยางมะตอย ที่ปริมาณยางคลัมป์ที่ใช้ตัดแปร 8% จะให้ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวสูงขึ้น 10.8% เมื่อเทียบกับยางมะตอยไม่ตัดแปร เมื่อใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรปริมาณ 20% จะให้ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเท่ากับ 64.9 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวเพิ่มขึ้น 25.3% เมื่อเทียบกับยางมะตอยไม่ตัดแปร ซึ่งแสดงว่าการใช้ผงยางจากเศษถุงมือเพียง 7% ที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียสก็จะมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรปริมาณ 8% [17] ค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางโดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 0-7% แสดงดังตารางที่ 9

5.4 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุกรมการผสมที่มีต่อค่าการยืดหยุ่นกลับ (Elastic Recovery) ของยางมะตอยตัดแปร

ค่าการยืดหยุ่นกลับเป็นค่าที่แสดงว่ายางมะตอยสามารถคืนรูปได้ดีเพียงใดหลังถูกกดทับ ถ้าค่าการยืดหยุ่นกลับต่ำก็แสดงว่ายางมะตอยคืนตัวได้น้อยเมื่อถูกกดทับก็จะมีผลเมื่อนำไปใช้งาน ก็จะทำให้เกิดร่องล้อบนถนนได้ง่ายกว่าซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (5.1) [26]

$$\text{ความยืดหยุ่นกลับ ร้อยละ} = \frac{E - X}{E} \times 100 \quad (5.1)$$

เมื่อกำหนดให้

E = ระยะยืดเริ่มต้นของตัวอย่างทดลอง เป็นเซนติเมตร

X = ระยะยืดกลับของตัวอย่างทดลองที่ปลายทั้งสองเริ่มแตงกัน เป็นเซนติเมตร

จากรูปที่ 24 แสดงกราฟค่าการยืดหยุ่นกลับของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือ โดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 0-7% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการผสมที่ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจะมีค่าการยืดหยุ่นกลับสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ตัดแปรและค่าการยืดหยุ่นกลับจะสูงขึ้นตามลำดับเมื่อปริมาณผงยางมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าการยืดหยุ่นกลับเท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าการยืดหยุ่นกลับเท่ากับ 15.5, 25.5, 40.5 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ค่าการยืดหยุ่นกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรมากขึ้นลักษณะของกราฟเป็นกราฟเส้นตรง ที่ปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปร 5% มีค่าการยืดหยุ่นกลับเท่ากับ 40.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง [22] ที่กำหนดค่าการยืดหยุ่นกลับไม่ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าการยืดหยุ่นกลับตัวเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 6.7 เท่า ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าการยืดหยุ่นกลับเท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าการยืดหยุ่นกลับเท่ากับ 18, 29, 41.5 และ 62 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ค่าการยืดหยุ่นกลับมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรมากขึ้นลักษณะของกราฟเป็นกราฟเส้นตรง ที่ปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปร 5% มีค่าการยืดหยุ่นกลับเท่ากับ 41.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง [22] ที่กำหนดค่าการยืดหยุ่นกลับไม่ต่ำกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก จะมีค่าการยืดหยุ่นกลับเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 6.9 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิผสม 150 และ

180 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณผงยาง 7% เท่ากัน ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียสจะมีค่าการยืดหยุ่นกลับมากกว่าที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส 3.3% และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรงมะตอย ที่ปริมาณยางคลัมป์ที่ใช้ตัดแปรง 8% จะให้ค่าการยืดหยุ่นกลับ 33% ซึ่งต่ำกว่าการใช้ผงยางจากเศษถุงมือยางเพียง 7% ที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียสถึง 1.8 เท่าและ เมื่อใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรงปริมาณ 20% จะให้ค่าการยืดหยุ่นกลับเท่ากับ 54% ซึ่งแสดงว่าการใช้ผงยางจากเศษถุงมือยางเพียง 7% ที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียสก็จะมีค่าสูงกว่าเมื่อใช้ยางคลัมป์ในการตัดแปรงปริมาณ 20% [17] ค่าการยืดหยุ่นกลับของยางมะตอยตัดแปรงด้วยผงยาง โดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 0-7% แสดงดังตารางที่ 9

5.5 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียส (Density) ของยางมะตอยตัดแปรง

จากข้อกำหนดที่ ทล.-ก. 408/2536 ของกรมทางหลวง [27] กำหนดว่าความหนาแน่นของยางมะตอยตัดแปรงด้วยพอลิเมอร์ต้องอยู่ระหว่าง 1.00 – 1.05 กรัมต่อซีซี โดยการทดสอบเป็นไปตาม ASTM D70 [28] ค่าที่ได้จากการทดลองสามารถคำนวณได้เป็นค่าความถ่วงจำเพาะซึ่งคำนวณได้ดังสมการ (5.2) เมื่อได้ค่าความถ่วงจำเพาะ ก็สามารถคำนวณหาความหนาแน่นได้จากสมการ (5.3)

แสดงการคำนวณ

คำนวณค่าความถ่วงจำเพาะที่ 25°C

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ } 25^{\circ}\text{C} = (C-A) / [(B-A)-(D-C)] \quad (5.2)$$

เมื่อให้

$$A = \text{น้ำหนักของ ขวดพิคโนมิเตอร์ + ฝาจุก}$$

$$B = \text{น้ำหนักของ ขวดพิคโนมิเตอร์ + น้ำกลั่น + ฝาจุก}$$

$$C = \text{น้ำหนักของ ขวดพิคโนมิเตอร์ + ยางมะตอย + ฝาจุก}$$

$$D = \text{น้ำหนักของ ขวดพิคโนมิเตอร์ + ยางมะตอย + น้ำกลั่น + ฝาจุก}$$

คำนวณค่าความหนาแน่นที่ 25 °C

$$\text{ความหนาแน่นที่ } 25^{\circ}\text{C} = \text{ค่าความถ่วงจำเพาะที่ } 25^{\circ}\text{C} \times W_T \quad (5.3)$$

เมื่อ W_T = ความหนาแน่นของน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.9970 กิโลกรัม/ลิตร

จากรูปที่ 25 แสดงค่าความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียสของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือโดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 0-7% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจะมีค่าต่ำกว่ายางมะตอยที่ไม่ตัดแปร โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.042 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรและยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.041, 1.040, 1.040 และ 1.039 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าความหนาแน่นลดลงจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 0.3% ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.042 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรและยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.041, 1.040, 1.040 และ 1.039 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก จะมีค่าความหนาแน่นลดลงจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 0.3% และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกันและค่าทั้งหมดยังอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

5.6 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าดัชนีการเจาะลึก (Penetration Index) ของยางมะตอยตัดแปร

ค่าดัชนีการเจาะลึก (PI) เป็นค่าที่แสดงถึงความอ่อนไหวของการเปลี่ยนแปลงของยางมะตอยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (5.4) [20] มีการจำแนกค่าดัชนีการเจาะลึกออกเป็น 3 ระดับคือ [29]

ค่าดัชนีการเจาะลึกต่ำกว่า -1 หมายถึง มีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ค่าดัชนีการเจาะลึกอยู่ระหว่าง -1 และ +1 หมายถึง มีการเปลี่ยนแปลงในระดับปกติเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ค่าดัชนีการเจาะลึกสูงกว่า +1 หมายถึง มีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

คำนวณค่าดัชนีการเจาะลึกโดย

$$\text{ค่าดัชนีการเจาะลึก} = \frac{20U - 300V}{(5.4)}$$

$$U = \frac{U + 30V}{(\log 4) \times (T_{RB} - T_p)}$$

$$V = \log 800 - \log P_T$$

เมื่อ T_{RB} คือ อุณหภูมิจุดอ่อนตัว ($^{\circ}\text{C}$)

T_p คือ อุณหภูมิที่ทำการทดสอบค่าการเจาะลึก ($^{\circ}\text{C}$)

P_T คือ ค่าการเจาะลึก ที่อุณหภูมิ T_p

จากรูปที่ 26 แสดงค่าดัชนีการเจาะลึกของยางมะตอยดัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือที่มีปริมาณผงยางตั้งแต่ 0 ถึง 7% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการผสมที่ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยดัดแปรด้วยผงยางจะมีค่าดัชนีการเจาะลึกสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ดัดแปรและค่าดัชนีการเจาะลึกจะสูงขึ้นตามลำดับเมื่อปริมาณผงยางมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการดัดแปรมีค่าดัชนีการเจาะลึกเท่ากับ -1.43 และยางมะตอยดัดแปรด้วยผงยางมีค่าดัชนีการเจาะลึกเท่ากับ -1.14, -0.8, -0.8 และ 0.91 โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการดัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ค่าดัชนีการเจาะลึกของยางมะตอยก่อนการดัดแปรและยางมะตอยที่ดัดแปรด้วยผงยาง 1% ต่ำกว่า -1 ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของยางมะตอยดังกล่าวขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก เมื่อปริมาณผงยางที่ใช้ในการดัดแปรมากขึ้นเป็น 3% และ 5% ค่าดัชนีการเจาะลึกสูงขึ้นแต่ยังต่ำกว่า 0 ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของยางมะตอยดังกล่าวขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระดับปกติ และที่ปริมาณผงยางที่ใช้ในการดัดแปร 7% ค่าดัชนีการเจาะลึกมีค่าเป็นบวกซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของยางมะตอยดังกล่าวขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการดัดแปรมีค่าดัชนีการเจาะลึกเท่ากับ -1.43 และยางมะตอยดัดแปรด้วยผงยางมีค่าดัชนีการเจาะลึกเท่ากับ -1.09, -0.95, -0.82 และ 0.73 โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการดัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ ค่าดัชนีการเจาะลึกของยางมะตอยก่อนการดัดแปรและยางมะตอยที่ดัดแปรด้วยผงยาง 1% ต่ำกว่า -1 เมื่อปริมาณผงยางที่ใช้ในการดัดแปรมากขึ้นเป็น 3 และ 5% ค่าดัชนีการเจาะลึกสูงขึ้นแต่ยังต่ำกว่า 0 และที่ปริมาณผงยางที่ใช้ในการดัดแปร 7% ค่าดัชนีการเจาะลึกมีค่าเป็นบวกซึ่งแนวโน้มของค่าดัชนีการเจาะลึกของยางมะตอยดัดแปรที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส จะเหมือนกัน ค่าดัชนีการเจาะลึกของยางมะตอยดัดแปรด้วยผงยางโดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 0-7% แสดงดังตารางที่ 10

5.7 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอนุกรมการผสมที่มีต่อค่าสมบัติทางกลเชิงไดนามิกส์ (Dynamic Mechanical Analysis) ของยางมะตอยตัดแปร

ค่ามอดูลัสเสถียร (E')

ค่ามอดูลัสเสถียรคือพลังงานที่ได้รับและรักษาไว้ในรูปของความยืดหยุ่นถ้าค่ามอดูลัสเสถียรสูงขึ้นแสดงว่าวัสดุมีความแข็ง (Stiff) มากขึ้น [20] จากรูปที่ 27 แสดงค่ามอดูลัสเสถียรของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือที่มีปริมาณผงยางตั้งแต่ 0 ถึง 7% โดยน้ำหนักโดยทำการวัดที่ -80 ถึง 40 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิในการผสมที่ 150 และ 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจะมีค่ามอดูลัสเสถียรสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ตัดแปรและค่ามอดูลัสเสถียรจะสูงขึ้นตามลำดับเมื่อปริมาณผงยางมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่ามอดูลัสเสถียรเท่ากับ 13.34 MPa และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยาง มีค่ามอดูลัสเสถียรเท่ากับ 16.98, 19.33, 21.48 และ 23.09 MPa โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่ามอดูลัสเสถียรเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 1.7 เท่า ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่ามอดูลัสเสถียรเท่ากับ 13.34 MPa และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยาง มีค่ามอดูลัสเสถียรเท่ากับ 17.84, 19.84, 21.27 และ 23.54 MPa โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่ามอดูลัสเสถียรเพิ่มขึ้นจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 1.8 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณผงยาง 7% เท่ากัน ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียสจะมีค่ามอดูลัสเสถียรมากกว่าที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส 1.9% ค่ามอดูลัสเสถียรของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางโดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ 0-7% แสดงดังตารางที่ 11

ค่ามอดูลัสสูญเสีย (E'')

จากรูปที่ 28 แสดงค่ามอดูลัสสูญเสีย (E'') ของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางที่มีปริมาณผงยางแตกต่างกันตั้งแต่ 0-7% โดยน้ำหนักและที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ -80 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส ของอนุกรมการผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียสตามลำดับ จุดสูงสุดของกราฟค่ามอดูลัสสูญเสียจะสามารถบอกค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของแต่ละตัวอย่างได้ [30] จากกราฟมอดูลัสสูญเสียจะเห็นว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางมะตอยที่ไม่มีการตัดแปรจะมีค่าสูงกว่ายางมะตอยที่มีการตัดแปร โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการ

ตัดแปรมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ -12.3 องศาเซลเซียส และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ -13.8, -16.6, -18.7 และ -19.9 องศาเซลเซียส โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 61.8% ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ยางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ -12.3 องศาเซลเซียส และยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเท่ากับ -14.5, -17.2, -18.7 และ -20.6 องศาเซลเซียส โดยปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงยางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงจากยางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 67.5% และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณผงยาง 7% เท่ากัน ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียสจะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส 3.5% การที่ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางมีค่าที่ต่ำลงจะสามารถช่วยลดการเกิดรอยแตกของยางมะตอยที่อุณหภูมิต่ำได้ [19] เนื่องจาก ที่อุณหภูมิต่ำกว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ววัสดุจะมีลักษณะแข็งเปราะและถ้าอุณหภูมิสูงกว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ววัสดุก็จะมีลักษณะยืดหยุ่นคล้ายยางดังนั้นถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลงแสดงว่ามีช่วงที่วัสดุมีลักษณะคล้ายยางมากขึ้นวัสดุก็จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำได้มากขึ้น

5.8 ผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis) ของยางมะตอยตัดแปร

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis) เป็นวิธีการที่จะวัดน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพอลิเมอร์เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ลักษณะของกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA Thermogram) จะแสดงเสถียรภาพทางความร้อนรวมทั้งอุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณเถ้าถ่าน ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาในสองส่วนคืออุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักของแต่ละตัวอย่างและปริมาณเถ้าถ่านที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจนโดย รูปที่ 29 แสดงให้เห็น กราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน ของยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจากเศษถุงมือ โดยมีปริมาณผงยางที่ต่างกันตั้งแต่ตั้งแต่ 0-7% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนัก ยางมะตอยตัดแปรด้วยผงยางจะมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่ายางมะตอยที่ไม่ตัด

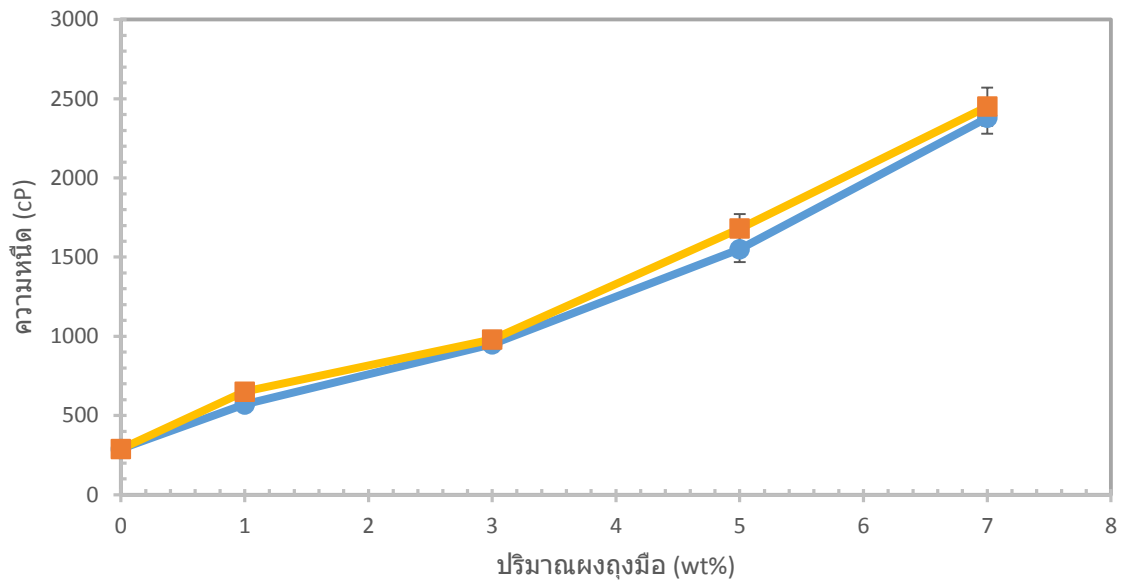
แปรโดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ขางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักเท่ากับ 340 องศาเซลเซียส และขางมะตอยตัดแปรรด้วยผงขางมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักเท่ากับ 341, 345, 351 และ 355 องศาเซลเซียส โดยปริมาณผงขางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงขางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก จะมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้นจากขางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 4.4% ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ขางมะตอยก่อนการตัดแปรมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักเท่ากับ 340 องศาเซลเซียส และขางมะตอยตัดแปรรด้วยผงขางมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักเท่ากับ 343, 346, 352 และ 357 องศาเซลเซียส โดยปริมาณผงขางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงขางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากขางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 5% และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณผงขาง 7% เท่ากัน ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียสจะมีค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักสูงกว่าที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส 0.6% สำหรับปริมาณเถ้าถ่านที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขางมะตอยตัดแปรรด้วยผงขางจะมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลืออยู่สูงกว่าขางมะตอยที่ไม่ตัดแปร โดยที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส ขางมะตอยก่อนการตัดแปรมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลือเท่ากับ 7.66% และขางมะตอยตัดแปรรด้วยผงขางมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลือเท่ากับ 8.83, 9.74, 13.55 และ 15.77% โดยปริมาณผงขางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงขางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนัก จะมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นจากขางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 2 เท่า ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียส ขางมะตอยก่อนการตัดแปรมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลือเท่ากับ 7.66% และขางมะตอยตัดแปรรด้วยผงขางมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลือเท่ากับ 9.10, 10.61, 13.84 และ 15.80% โดยปริมาณผงขางที่ใช้ในการตัดแปรเท่ากับ 1%, 3%, 5% และ 7% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณผงขางตัดแปรเท่ากับ 7% โดยน้ำหนักจะมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นจากขางมะตอยที่ไม่ตัดแปร 2.1 เท่า และเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิผสม 150 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณผงขาง 7% เท่ากัน ที่อุณหภูมิผสม 180 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณเถ้าถ่านที่เหลืออยู่สูงกว่าที่อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส 0.2%

5.9 ผลของปริมาณผงขางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อสัณฐานวิทยา (Morphology) ของขางมะตอยตัดแปร

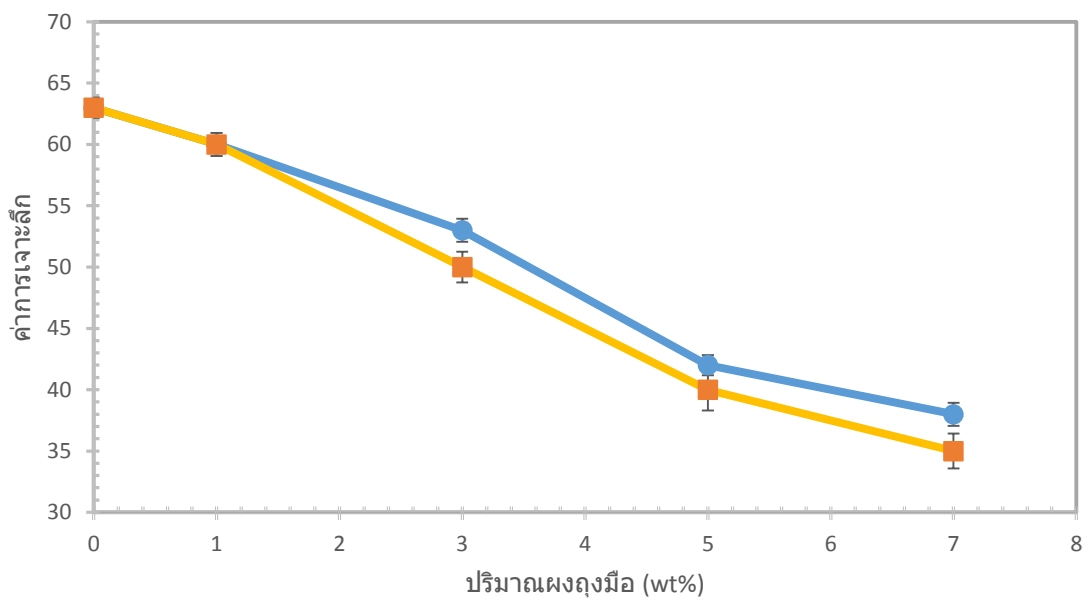
จากรูปที่ 30 จะแสดงสัณฐานวิทยาของขางมะตอยก่อนการตัดแปร และขางมะตอยที่ตัดแปรรด้วยผงขางจากเศษถุงมือ ที่ปริมาณผงขางที่ต่างกันตั้งแต่ 1-7% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิในการ

ผสมที่ 150 และ 180 องศาเซลเซียส จากรูปจะเห็นว่าจะมีการแยกส่วนกันอย่างชัดเจนระหว่างส่วนที่เป็นยางมะตอยคือส่วนที่มีสีอ่อน และส่วนที่เป็นผงยางคือส่วนที่มีสีเข้ม และเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางมากขึ้นก็就会有ความหนาแน่นของส่วนที่เป็นสีเข้มมากขึ้น ขนาดของผงยางมีขนาดเล็กกว่าผงยางก่อนที่จะทำการคัดแปรเนื่องจากผลของการปั่นกวนที่ความเร็วรอบสูง และที่อุณหภูมิในการผสมสูงจะทำให้อนุภาคยางแตกออกได้ [18]

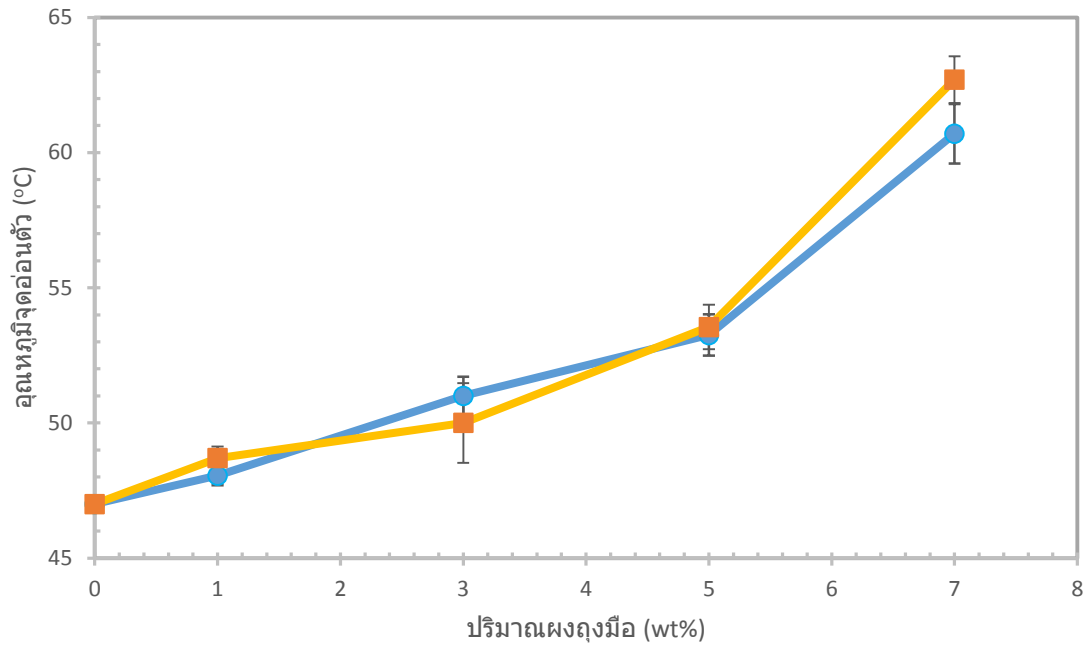




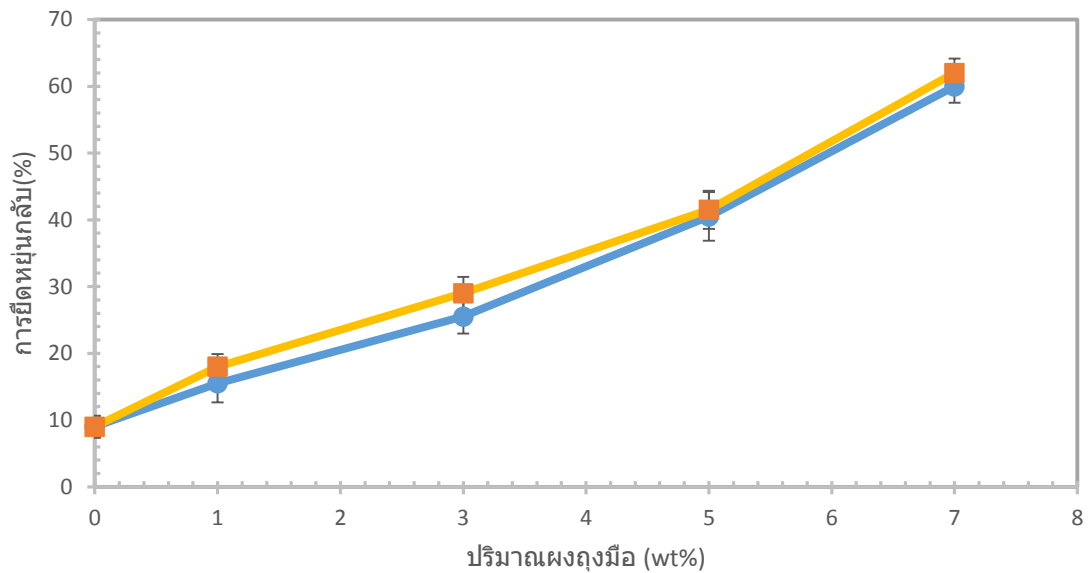
รูปที่ 21 แสดงผลของปริมาณผงจากเศษงูมมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าความหนืดที่ 135 °C ของยางมะตอยตัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■) อุณหภูมิผสม 180 °C



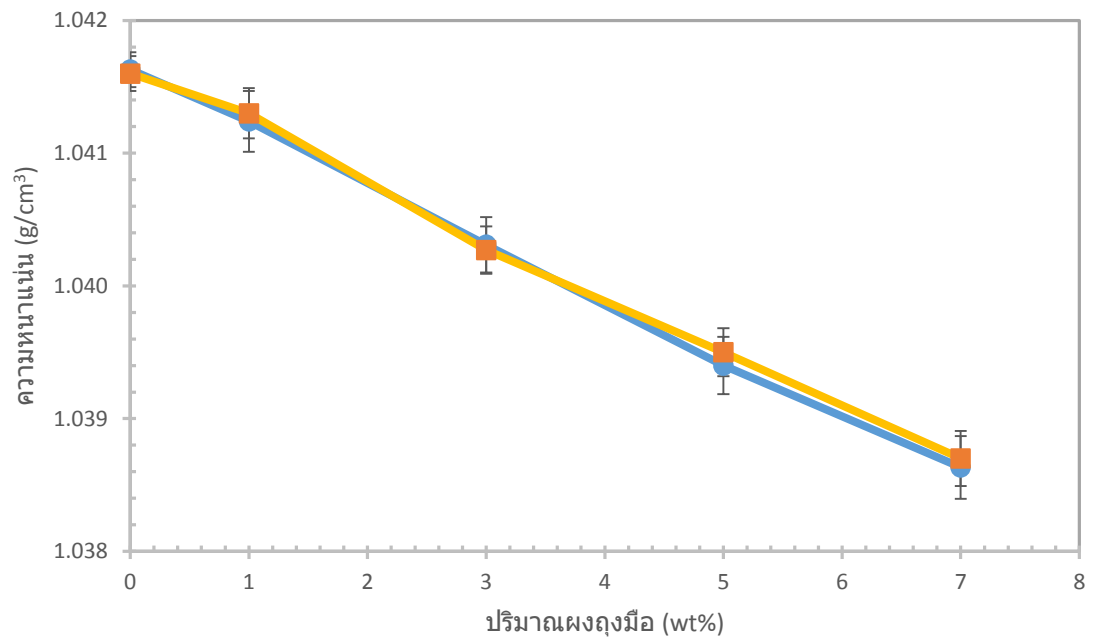
รูปที่ 22 แสดงผลของปริมาณผงจากเศษงูมมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าการเจาะลึกของยางมะตอยตัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■) อุณหภูมิผสม 180 °C



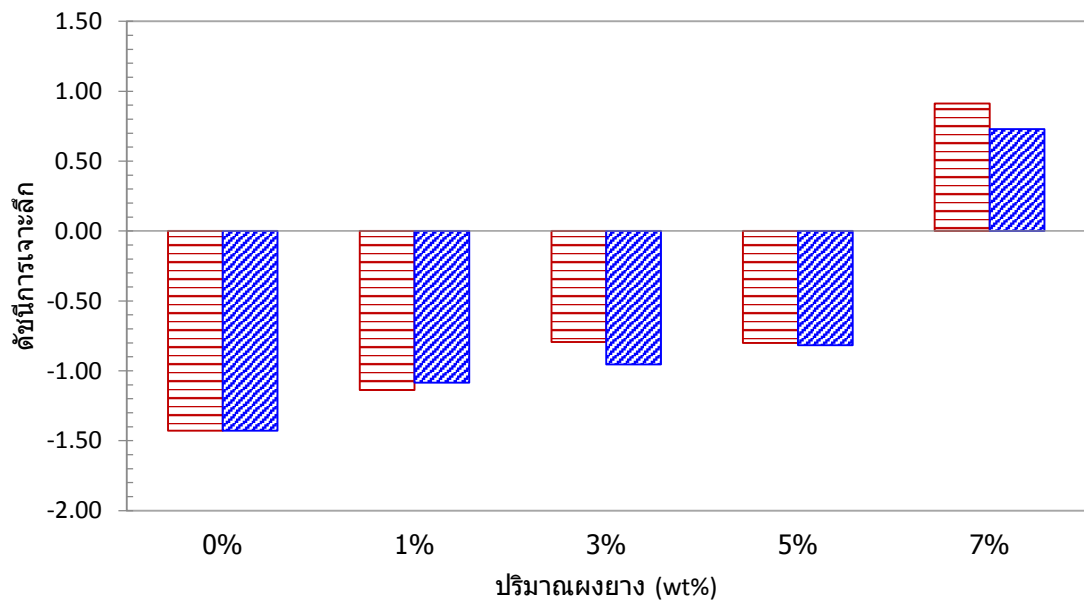
รูปที่ 23 แสดงผลของปริมาณพวงมมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าอุณหภูมิจุดอ่อนตัวของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■) อุณหภูมิผสม 180 °C



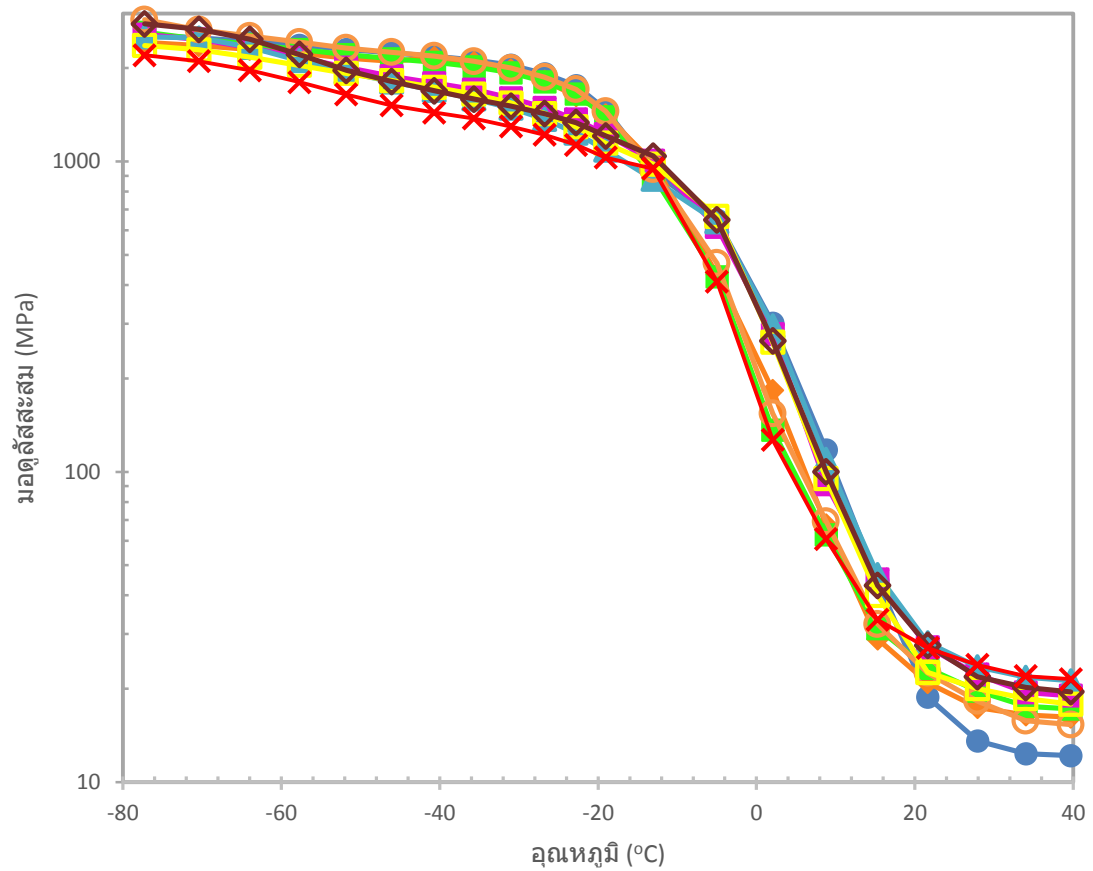
รูปที่ 24 แสดงผลของปริมาณพวงมมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าการยืดหยุ่นกลับของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■) อุณหภูมิผสม 180 °C



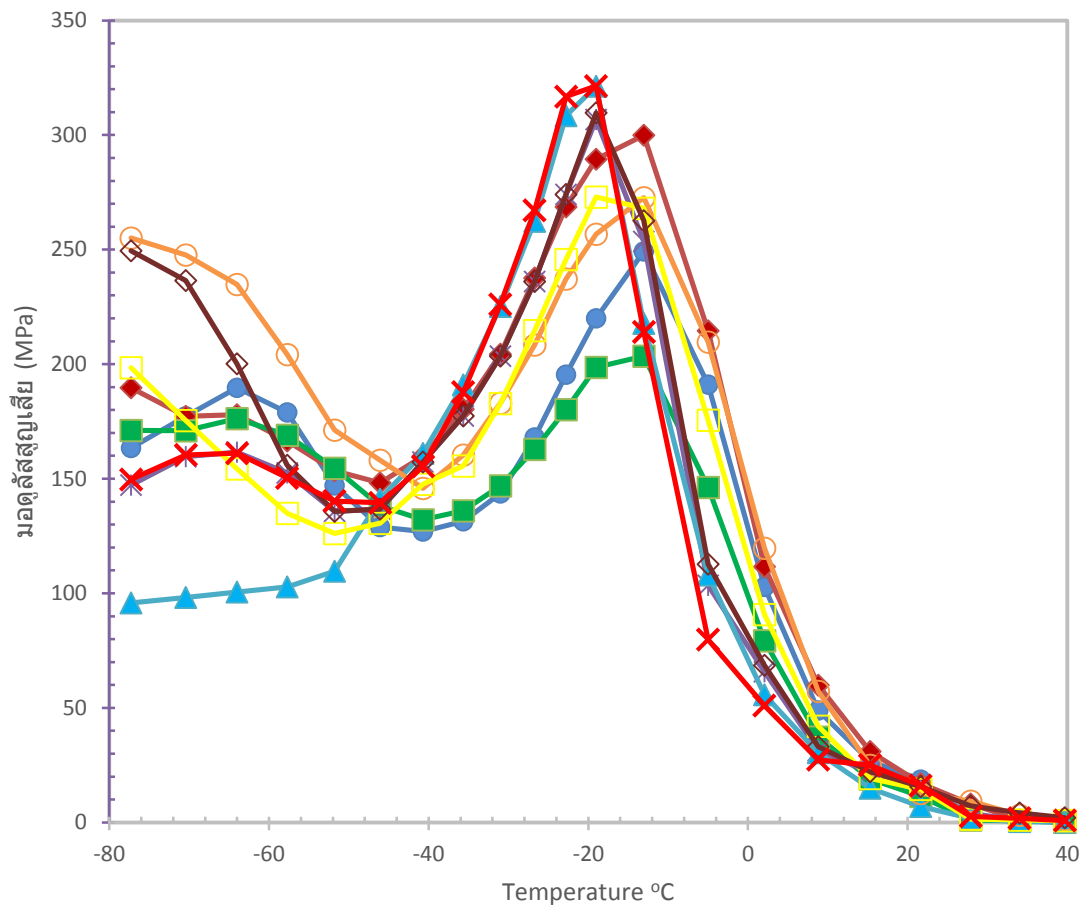
รูปที่ 25 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถลุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าความหนาแน่นของยางมะตอยดัดแปร (●) อุณหภูมิผสม 150 °C (■) อุณหภูมิผสม 180 °C



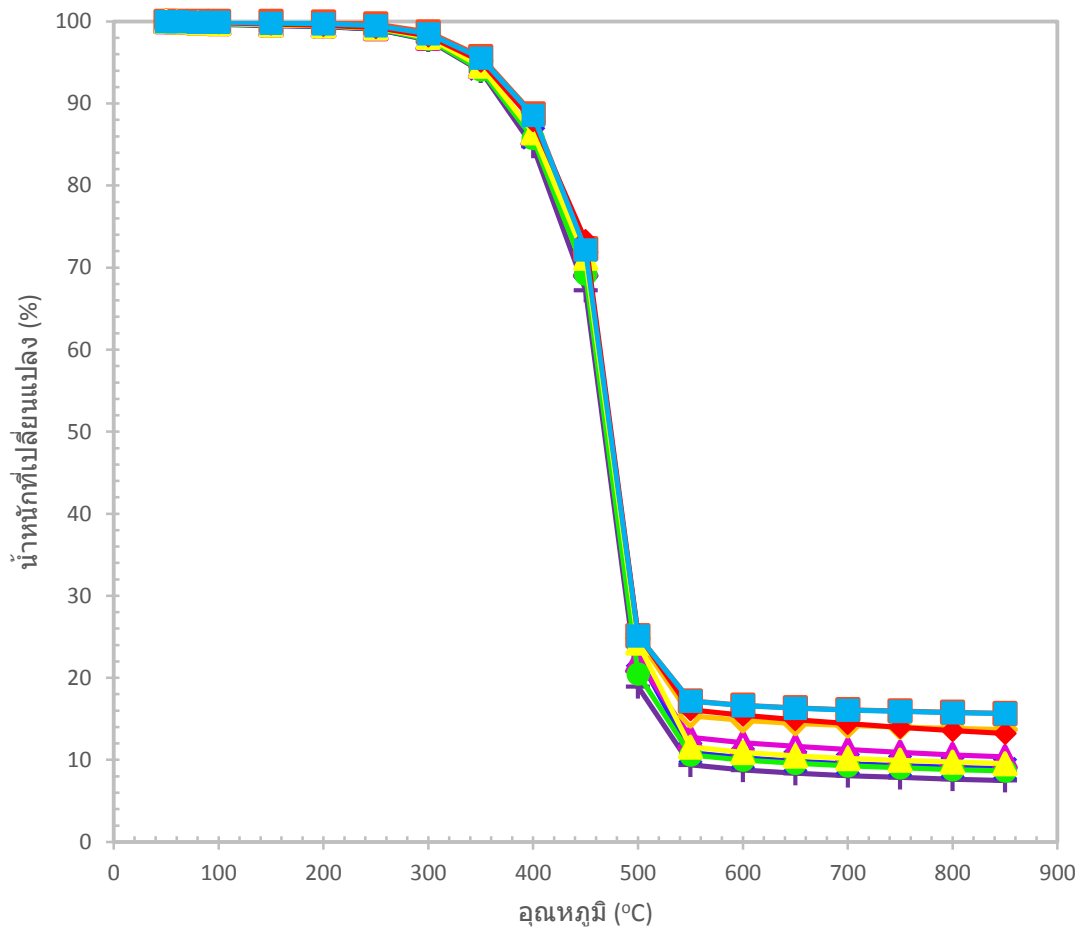
รูปที่ 26 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถลุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าดัชนีการเจลาเล็กของยางมะตอยดัดแปร (▨) อุณหภูมิผสม 150 °C (▨) อุณหภูมิผสม 180 °C



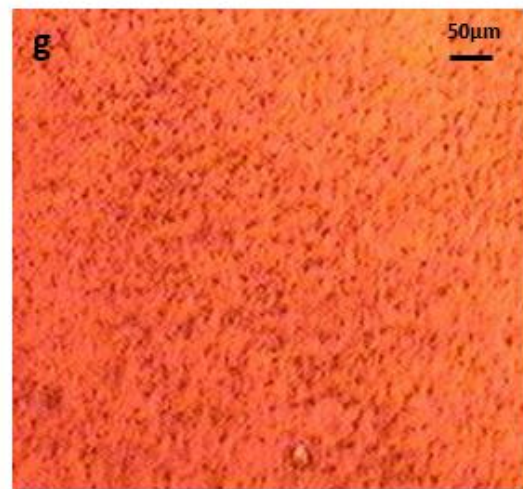
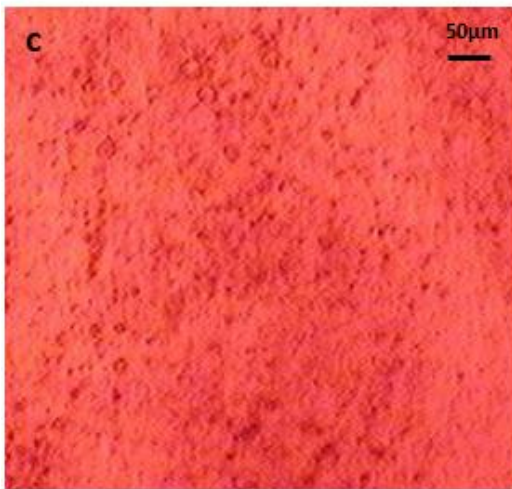
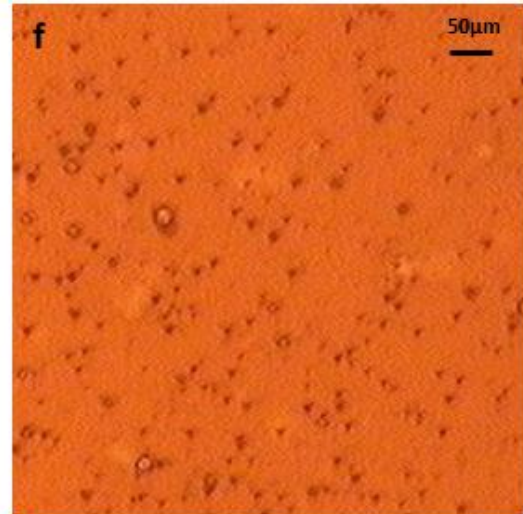
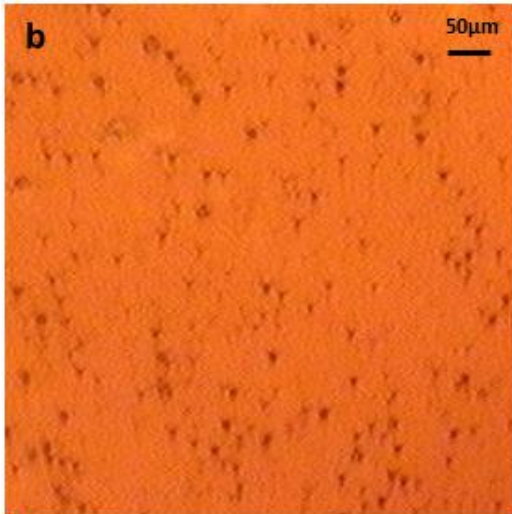
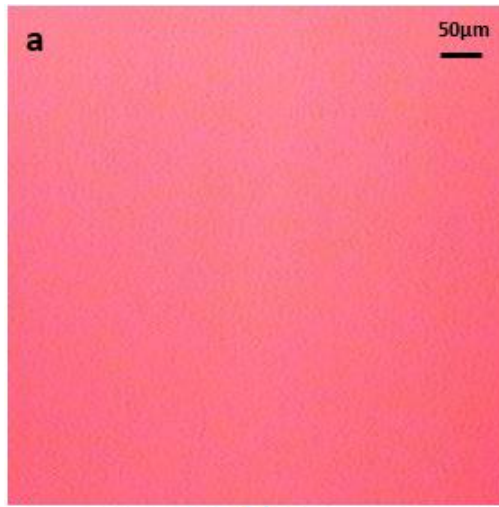
รูปที่ 27 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่ามอดุลัสสะสมของ ยางมะตอยดัดแปร (●) ยางมะตอยก้อยดัดแปร (◆) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (■) ผง ยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (*) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (▲) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (○) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (□) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (◇) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (×) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C

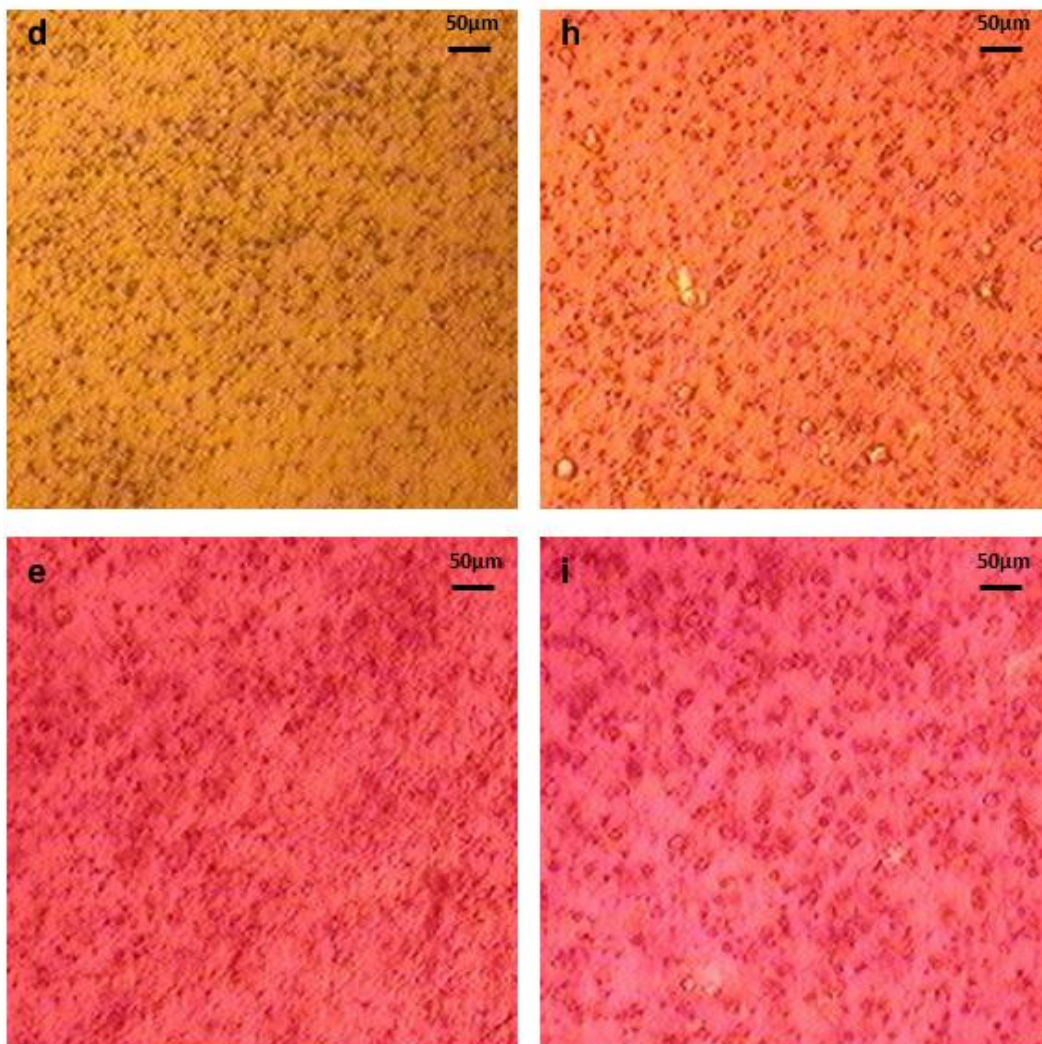


รูปที่ 28 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางมะตอยดัดแปร (●) ยางมะตอยก่อยดัดแปร (◆) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (■) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (*) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (▲) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (○) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (□) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (◇) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (×) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C



รูปที่ 29 แสดงผลของปริมาณผงยางจากเศษถุงมือและอุณหภูมิการผสมที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนัก และปริมาณเถ้าถ่านที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ของยางมะตอยดัดแปร (+) ยางมะตอยก่อดัดแปร (X) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (Δ) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (◇) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (□) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 150 °C (●) ผงยาง 1 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (▲) ผงยาง 3 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (◆) ผงยาง 5 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C (■) ผงยาง 7 wt% อุณหภูมิผสม 180 °C





รูปที่ 30 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของยางมะตอยดัดแปรด้วยผงเซรามิกมีอย่าง (a) ยางมะตอยก่อนการดัดแปร (b) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 1% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (c) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 3% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (d) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 5% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (e) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 7% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 150 °C (f) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 1% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C (g) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 3% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C (h) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 5% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C (i) ปริมาณผงยางใช้ดัดแปร 7% โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิผสม 180 °C

ตารางที่ 9 แสดงค่าการเจาะลึก อุณหภูมิจุดอ่อนตัวและ ค่าการยืดหยุ่นกลับ ของยางมะตอยก่อนและ หลังการตัดแปรด้วยเศษถุ้งมือ

ปริมาณเศษถุ้ง มือ (% โดยน้ำหนัก)	ค่าการเจาะลึก		อุณหภูมิจุดอ่อนตัว(°C)		ค่าการยืดหยุ่นกลับ (%)	
	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C
0 %	63	63	47	47	9	9
1 %	60	60	48.5	48.7	15.5	18
3 %	53	50	51	50	25.5	29
5 %	42	40	53.2	53.6	40.5	41.5
7 %	38	35	62.7	62.7	60	62

ตารางที่ 10 แสดงค่าความหนืด ค่าความหนาแน่นและ ค่าดัชนีการเจาะลึก ของยางมะตอยก่อนและ หลังการตัดแปรด้วยเศษถุ้งมือ

ปริมาณเศษถุ้ง มือ (% โดยน้ำหนัก)	ค่าความหนืด (cP)		ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)		ดัชนีการเจาะลึก	
	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C
0 %	289	289	1.042	1.042	-1.43	-1.43
1 %	570	650	1.041	1.041	-1.14	-1.09
3 %	950	980	1.040	1.040	-0.80	-0.95
5 %	1,550	1,680	1.039	1.040	-0.80	-0.82
7 %	2,380	2,450	1.039	1.039	0.91	0.73

ตารางที่ 11 แสดงค่าโมดูลัสสะสม และ ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางมะตอยก่อนและหลังการตัดแปรด้วยเศษถุงมือ

ปริมาณเศษถุงมือ (%โดยน้ำหนัก)	ค่าโมดูลัสสะสม (MPa)		อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว(°C)	
	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C
0 %	13.34	13.04	-12.3	-12.3
1 %	16.98	17.84	-13.8	-14.5
3 %	19.33	19.84	-16.6	-17.2
5 %	21.48	21.27	-18.7	-18.7
7 %	23.09	23.54	-19.9	-20.6

ตารางที่ 12 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว (°C) ที่ 5% น้ำหนักที่หายไปและปริมาณเถ้าถ่าน (%) ที่ 800 °C ของยางมะตอยก่อนและหลังการตัดแปรด้วยเศษถุงมือ

ปริมาณเศษถุงมือ (%โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ที่ 5% น้ำหนักที่หายไป		ปริมาณเถ้าถ่าน (%) ที่ 800 °C	
	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C	ผสมที่ 150 °C	ผสมที่ 180 °C
0 %	340	340	7.66	7.66
1 %	341	343	8.83	9.10
3 %	345	346	9.74	10.61
5 %	351	352	13.55	13.84
7 %	355	357	15.77	15.80

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

การตัดแปรงยางมะตอยโดยใช้ผงยางจากเศษถุงมือสามารถปรับปรุงสมบัติทางกายภาพสมบัติด้านความร้อน และสมบัติเชิงกลของยางมะตอยตัวอย่างได้

ค่าการเจาะลึก (Penetration) ของยางมะตอยลดลง เมื่อปริมาณเศษผงยางที่ใช้ในการตัดแปรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิจุดอ่อนตัว (Softening point) และค่าการยืดหยุ่นกลับ (Elastic recovery) ของยางมะตอยหลังตัดแปรงมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณผงยางเพิ่มขึ้น และค่าความหนืดที่ 135 องศาเซลเซียสของยางมะตอย ก็มีค่ามากขึ้นเช่นกันเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางที่ใช้ตัดแปรง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการผสมจาก 150 เป็น 180 องศาเซลเซียสค่าตัวแปรต่างๆที่ทำการทดสอบมีแนวโน้มดีขึ้น ค่าความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียสของยางมะตอยมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเศษผงยางมากขึ้นแต่ก็ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ค่าดัชนีการเจาะทะลุที่แสดงถึงความอ่อนไหวของการเปลี่ยนแปลงของยางมะตอยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นซึ่งแสดงว่ายางมะตอยหลังการตัดแปรงมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลง สมบัติเชิงกลได้แก่ค่ามอดูลัสสะสมวัดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรงสูงขึ้น ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรงสูงขึ้น แสดงว่าที่อุณหภูมิต่างๆยางมะตอยหลังการตัดแปรงมีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางมะตอยก่อนการตัดแปรง สมบัติทางความร้อนได้แก่ อุณหภูมิการสลายตัวที่ 5% โดยน้ำหนักของยางมะตอยหลังการตัดแปรงมีค่าสูงกว่ายางมะตอยก่อนการตัดแปรง และมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรง ในส่วนปริมาณเถ้าถ่านที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสของยางมะตอยหลังการตัดแปรงมีปริมาณมากกว่ายางมะตอยก่อนการตัดแปรง และปริมาณเถ้าถ่านที่เหลือมีปริมาณมากขึ้นเมื่อปริมาณผงยางที่ใช้ในการตัดแปรงสูงขึ้น

จากการศึกษาที่กล่าวมาการตัดแปรงยางมะตอยด้วยผงยางจากเศษถุงมือยางสามารถที่จะลดการเสีกรูปของผิวถนนและ การเยิ้ม (Bleeding) ได้เป็นอย่างดี

รายการอ้างอิง

1. ; Available from: <http://irrigation.rid.go.th/rid14/water/engineer14/pararoad.pdf>
2. Zupancic, A.a.Z., M., *Rheological examination of temperature dependence of conventional and polymer-modified road bitumens*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2002. 80: p. 253-263.
3. Nadkarni, V.M., Shenoy, A.V., Mathew, J., *Thermomechanical behavior of modified asphalts*. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev, 1985. 24(3): p. 478-484.
4. de Almeida Júnior, A.F., et al., *Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil*. Journal of Cleaner Production, 2012. 33: p. 236-238.
5. .
6. Read, J.a.W., D. , *The shell bitumen handbook*, ed. 5. 2003, London: Thomas Telford Publishing.
7. Akmaz, S.a.l., O., *The Structural Characterization of Saturate, Aromatic, Resin, and Asphaltene Fractions of Batiraman Crude Oil*. Journal of Petroleum Science and Technology, 2011. 29: p. 160-171.
8. *A Global Perspective: Production, Use, Properties, Specifications and Occupational Exposure The Bitumen Roofing Industry*. Vol. 2. 2011: National Roofing Contractor Assosiation.
9. Becker, Y.M., P.M. and Yajaira R., *Polymer Modified Asphalt*. Vision Technologica, 2001. 9(1): p. 39-50.
10. เจริญสูงเนิน, ร., การเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิस्टาไร์นบิวทาไดอินสไตร์นกับออกแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยการผสมแบบสารละลาย. 2551, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
11. วิริยะตั้งสกุล, บ., การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์โดยใช้อีลาสโตเมอร์และพลาสติก. 2543, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
12. ศรีสถิต., ฐ., ยางรถยนต์ สารคดี. Vol. 26. 2553. 360.
13. รัตนอุทัยกุล, ป., การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์โดยใช้สารเติมแต่งโพลิเมอร์. 2542, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

14. Cong, P.X., P. Xing, M. Chen, S., *Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts*. Construction and Building Materials, 2013. 40: p. 632-641.
15. Shutang, L.W., C. Jianguo, F. Shujie, S., *Variance analysis and performance evaluation of difference crumb rubber modified (CRM) asphalt*. Construction and Building Materials, 2009. 23: p. 2701-2708.
16. Jeong, K.L., S. Kim, K., *Interaction effect of crumb rubber modified asphalt binders*. Construction and Building Materials. Construction and Building Materials., 2010. 24: p. 824-831.
17. Daryoush, Y.K.R., S.M. and Yaser, G., *Laboratory investigation of the effect of crumb rubber on the characteristics and rheological behavior of asphalt binder*. Road Materials and Pavement Design, 2015: p. 1-11.
18. Peralta, E., *Study of the Interaction Between Bitumen and Rubber*. 2009, Universidade do Minho. p. 227.
19. Navarro, F.J., *Novel recycled polyethylene/ground tire rubber/bitumen blends for use in roofing applications :Thermo-mechanical properties*. Polymer Testing, 2010. 29: p. 588-595.
20. อ่วมพันธ์เจริญ, อ., *วัสดุแอสฟัลต์ที่ดัดแปรด้วยเบนซอกลูซีน*, in *Chemical Engineer*. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. 1995.
22. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Softening point of Bituminous Materials*. 1996.
23. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Viscosity Determination of Unfilled Asphalt Using the Brookfield Thermosel Apparatus*. 1996.
24. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, *มอดิไฟด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง*, in *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม*. 2547.
25. กรมทางหลวง, *ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ*. 2556.
26. กรมทางหลวง, *วิธีการทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องตึง*. 2548.
27. กรมทางหลวง, *ข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเมอร์สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์*. 2536.

28. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. 1996.
29. วิจิตชลชัย, ณ., เปรียบเทียบสมบัติของแอสฟัลท์ธรรมดา กับแอสฟัลท์ผสมยางธรรมชาติในการสร้างถนน. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง, 2544.
30. Isacson, U.J., E and Xiaohu, L., *Low-temperature properties of styrene]butadiene]styrene polymer modified bitumens*. *Construction and Building Materials*, 1998. 12: p. 405-414.



1. ; Available from: <http://irrigation.rid.go.th/rid14/water/engineer14/pararoad.pdf>
2. Zupancic, A.a.Z., M., *Rheological examination of temperature dependence of conventional and polymer-modified road bitumens*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2002. 80: p. 253-263.
3. Nadkarni, V.M., Shenoy, A.V., Mathew, J., *Thermomechanical behavior of modified asphalts*. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev, 1985. 24(3): p. 478-484.
4. de Almeida Júnior, A.F., et al., *Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil*. Journal of Cleaner Production, 2012. 33: p. 236-238.
5. .
6. Read, J.a.W., D. , *The shell bitumen handbook*, ed. 5. 2003, London: Thomas Telford Publishing.
7. Akmaz, S.a.l., O., *The Structural Characterization of Saturate, Aromatic, Resin, and Asphaltene Fractions of Batiraman Crude Oil*. Journal of Petroleum Science and Technology, 2011. 29: p. 160-171.
8. *A Global Perspective: Production, Use, Properties, Specifications and Occupational Exposure The Bitumen Roofing Industry*. Vol. 2. 2011: National Roofing Contractor Assosiation.
9. Becker, Y.M., P.M. and Yajaira R., *Polymer Modified Asphalt*. Vision Technologica, 2001. 9(1): p. 39-50.
10. เจริญสูงเนิน, ร., การเตรียมฟิล์มวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิस्टาไร์นบิวทาไดอีนสไตรีนกับออกแกโนมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยการผสมแบบสารละลาย. 2551, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
11. วิริยะตั้งสกุล, บ., การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์โดยใช้อีลาสโตเมอร์และพลาสติก. 2543, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
12. ศรีสถิต., ฐ., ยางรถยนต์ สารคดี. Vol. 26. 2553. 360.
13. รัตน์อุทัยกุล, ป., การปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์โดยใช้สารเติมแต่งโพลิเมอร์. 2542, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

14. Cong, P.X., P. Xing, M. Chen, S., *Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts*. Construction and Building Materials, 2013. 40: p. 632-641.
15. Shutang, L.W., C. Jianguo, F. Shujie, S., *Variance analysis and performance evaluation of difference crumb rubber modified (CRM) asphalt*. Construction and Building Materials, 2009. 23: p. 2701-2708.
16. Jeong, K.L., S. Kim, K., *Interaction effect of crumb rubber modified asphalt binders*. Construction and Building Materials. Construction and Building Materials., 2010. 24: p. 824-831.
17. Daryoush, Y.K.R., S.M. and Yaser, G., *Laboratory investigation of the effect of crumb rubber on the characteristics and rheological behavior of asphalt binder*. Road Materials and Pavement Design, 2015: p. 1-11.
18. Peralta, E., *Study of the Interaction Between Bitumen and Rubber*. 2009, Universidade do Minho. p. 227.
19. Navarro, F.J., *Novel recycled polyethylene/ground tire rubber/bitumen blends for use in roofing applications :Thermo-mechanical properties*. Polymer Testing, 2010. 29: p. 588-595.
20. อ่วมพันธ์เจริญ, อ., *วัสดุแอสฟัลต์ที่ดัดแปรด้วยเบนซอกลูซีน*, in *Chemical Engineer*. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
21. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. 1995.
22. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Softening point of Bituminous Materials*. 1996.
23. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Viscosity Determination of Unfilled Asphalt Using the Brookfield Thermosel Apparatus*. 1996.
24. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, *มอดิฟายด์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับงานทาง*, in *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม*. 2547.
25. กรมทางหลวง, *ข้อกำหนดแอสฟัลต์ซีเมนต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางธรรมชาติ*. 2556.
26. กรมทางหลวง, *วิธีการทดสอบหาความยืดหยุ่นกลับของวัสดุแอสฟัลต์โดยเครื่องตึง*. 2548.
27. กรมทางหลวง, *ข้อกำหนดสำหรับแอสฟัลต์ปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเมอร์สำหรับแอสฟัลต์ซีเมนต์*. 2536.

28. Material, T.A.S.f.T.a., *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)*. 1996.
29. วิจิตชลชัย, ณ., เปรียบเทียบสมบัติของแอสฟัลท์ธรรมดา กับแอสฟัลท์ผสมยางธรรมชาติในการสร้างถนน. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง, 2544.
30. Isacson, U.J., E and Xiaohu, L., *Low-temperature properties of styrene]butadiene]styrene polymer modified bitumens*. *Construction and Building Materials*, 1998. 12: p. 405-414.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเชาวลิต ประเสริฐสมบุรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2524 ที่จังหวัดนครสวรรค์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จบการศึกษาเมื่อปี 2547

ประสบการณ์ทำงาน

ปี 2547 – 2549 บริษัท บริดจสโตน คาร์บอนแบล็ค (ประเทศไทย) จำกัด

ตำแหน่ง หัวหน้าห้องทดสอบ

ปี 2549 – 2556 บริษัท คาร์ดิแนลเฮลท์ (ประเทศไทย) จำกัด

ตำแหน่ง วิศวกรจัดซื้ออาวุโส

ปี 2556 – ปัจจุบัน บริษัท ไทยออยล์ จำกัด (มหาชน)

ตำแหน่ง ผู้เชี่ยวชาญระบบคุณภาพ