สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนายางล้างแม่แบบ : ชนิดสารทำความสะอาดและเกรดของยางอีพีดีเอ็ม

นายนพรัตน์ ศิริแก้วกาญจน์
นายปรม ศรีวิสุทธิ์
นายอยุทธ์ วิทย์สุธรรมกุล

ปพ.
มีนาคม
2548
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107719
วัน,เดือน,ปี 10 พ.ค. 2553
b.....
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

Development of Mold-Cleaning Compound : Cleaning Agents and EPDM Grades

Mr.Nopparat Sirikaewkarn
Mr.Parom Sriwisut
Mr.Ayut Witsuthammakul

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirement for the Degree
of
Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2005

โครงงานพิเศษเรื่อง การพัฒนายางล้างแม่แบบ : ชนิดสารทำความสะอาดและเกรดของยางอีพีดีเอ็ม

นักศึกษา นายนพรัตน์ ศิริแก้วกาญจน์

นายปรม ศรีวิสุทธิ์

นายอยุทธ์ วิทย์สุธรรมกุล

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน	.....
กรรมการ นายชยุต สุวรรณพิมลกุล	.....
กรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด	.....

.....

(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงงานพิเศษเรื่อง การพัฒนายางล้างแม่แบบ : ชนิดสารทำความสะอาดและเกรดของยางอีพีดีเอ็ม

นักศึกษา นายนพรัตน์ ศิริแก้วกาญจน์ รหัสนักศึกษา 45050109
นายปรม ศรีวิสุทธิ์ รหัสนักศึกษา 45050120
นายอยุทธ์ วิทย์สุธรรมกุล รหัสนักศึกษา 45050169

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสูตรเพื่อลดต้นทุนของยางล้างแม่แบบชนิดอัดขึ้นรูปสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยใช้ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-Propylene Diene rubber ; EPDM) มีซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นสารตัวเติม และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) เป็นสารเชื่อมโยง ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการลดต้นทุนด้วยการเปลี่ยนสารทำความสะอาดจาก AMP (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol) เป็น MEA (Monoethanolamine) จากนั้นศึกษาปริมาณสารทำความสะอาดที่เหมาะสม และปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยเปรียบเทียบยาง EPDM 3 เกรด (Mitsui® EPT 3045,Nordel® IP 4640,Vistalon® 7001) หลังจากทำการผสมยางล้างแม่แบบแต่ละสูตรจะทำการศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น ประสิทธิภาพการทำความสะอาดกับแม่แบบจริง สมบัติการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน เป็นต้น จากนั้นทำการคำนวณต้นทุนและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ จากผลการทดลองพบว่า MEA สามารถใช้เป็นสารทำความสะอาดในยางล้างแม่แบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับ AMP สูตรยางที่มี MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด และใช้ยาง EPDM Vistalon® 7001 มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงสุด สมบัติเชิงกลดีเพียงพอต่อการนำออกจากแม่แบบ และมีต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 86 บาทต่อกิโลกรัม.ต้นทุนลดลง 73.20 % จากต้นทุนเดิม

Speciel Project Title	Development of Mold-Cleaning Compound : Cleaning Agents and EPDM Grades
Student	Mr.Parom Sriwisut
	Mr.Nopparat Sirikaewkarn
	Mr.Ayut Witsuthammakul
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2005
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud

Abstract

The aim of this research was to reduce cost of mold cleaning rubber compound for industrial uses. The compound consisted of Ethylene-Propylene Diene rubber (EPDM) filled by precipitated silica and cured by Dicumyl peroxide (DCP). The compounds were mixed by two-roll mill and tested for mold cleaning efficiency by using compression molding technique. In this research, cost reduction of the compound can be done by changing the cleaning agent from AMP (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol) to MEA (Monoethanolamine). Optimum loading of the cleaning agent and three grades of EPDMs (Mitsui® EPT 3045, Nordel® IP 4640, Vistalon® 7001) were also studied. Then, various properties of the compounds were characterized, such as, cleaning efficiency, cure characteristics, mechanical and thermal properties. Cost estimation and actual testing of mold cleaning efficiency in a rubber company were carried out. It was found that MEA can be used efficiently as the active cleaning agent in the mold cleaning compound as good as the AMP. Optimum loading of the MEA was 30 phr. EPDM Vistalon® 7001 seems to be the best rubber base for the compound in this study compared to the others. As a result of this work, cost of the material was about 86 baht/kg which was reduced about 73 % compared to the previous work.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้จะเสร็จสมบูรณ์มิได้หากขาดการสนับสนุนจากบุคคลและองค์กรเหล่านี้

- รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด อาจารย์ที่ปรึกษา สำหรับคำแนะนำและคำตอบเวลาที่สงสัย

- บริษัท เอส เค โพลิเมอร์ จำกัด โดย คุณชยุต สุวรรณพิมลกุล สำหรับการสนับสนุนด้านวัตถุดิบและสารเคมี

- คุณมนต์สุดา บุรารักษ์ คุณปรีดา ศุภนาม และทีมงานแผนกวิจัยสูตรของ บริษัท เอส เค โพลิเมอร์ จำกัด ทุกท่าน ผู้ช่วยประสานงานและสืบค้นข้อมูล

- เจ้าหน้าที่ฝ่ายผลิตของ บริษัท เอส เค โพลิเมอร์ จำกัด ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทดลองล้างแม่แบบจริง

- คุณกฤษณะ และคุณสุดใจ เจ้าหน้าที่ Polymer Workshop สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้สอนวิธีใช้เครื่องมือและคอยอำนวยความสะดวกทุกอย่าง

- สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สถาบันอันเป็นที่รักของเรา สำหรับความรู้ที่ใช้ทำงานวิจัย

- คุณพ่อ คุณแม่ ที่ประทานสมองอันเฉลียวฉลาดและร่างกายที่แข็งแรงให้ข้าพเจ้าไว้ใช้ทำงาน

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ซ
<u>บทที่ 1</u> บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
<u>บทที่ 2</u> ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 การทำความสะอาดแม่แบบ	4
2.2 ยางล้างแม่แบบ	6
2.2.1 ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (EPDM)	6
2.2.2 สารเติมแต่ง (Additives)	9
2.3 วิธีใช้ยางล้างแม่แบบ	23
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 31

3.1 แผนการดำเนินการ 31

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ 34

3.3 วิธีการทดลอง 37

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 46

4.1 การศึกษาเกรดของยาง EPDM 47

4.2 การศึกษาชนิดของสารทำความสะอาด 53

4.3 การศึกษาปริมาณของสารทำความสะอาด 63

4.4 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูป 70

4.5 การศึกษาช่วงอุณหภูมิใช้งานของยางล้างแม่แบบ 71

4.6 ปริมาณสารทำความสะอาดที่เหลืออยู่ภายหลังการทำความสะอาด 72

4.7 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่แบบที่เตรียมได้ 73

4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้างแม่แบบ 74

บทที่5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 76

5.1 สรุปผลการทดลอง 76

5.2 ข้อเสนอแนะ 79

เอกสารอ้างอิง 80

ภาคผนวก กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบ 82

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการทำความสะอาดแม่แบบวิธีต่างๆ 5

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่าง Nonconjugate Diene ที่ใช้ในการผลิตยาง EPDM 6

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของยาง EPDM 7

ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของซิลิกาชนิดตกตะกอน 16

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของ MEA 22

ตารางที่ 2.6 สูตรยางล้างแม่แบบที่ได้ในงานวิจัยโครงงานพิเศษปี 2546 27

ตารางที่ 2.7 สูตรยางล้างแม่แบบที่ได้ในงานวิจัยโครงงานพิเศษปี 2547 28

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยาง EPDM ที่ใช้ในการทดลอง 35

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของซิลิกา Hi-Sil 255G 35

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของสารทำความสะอาด MEA 36

ตารางที่ 3.4 สูตรผสมยางล้างแม่แบบที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1 38

ตารางที่ 3.5 ลำดับการใส่สารระหว่างการผสมยาง 39

ตารางที่ 3.6 สูตรผสมยางล้างแม่แบบที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 2 40

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

ตารางที่ 4.1 เวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้เกรดของยาง EPDM ต่างกัน 48

ตารางที่ 4.2 เวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารทำความสะอาดต่างๆกัน 54

ตารางที่ 4.3 ค่าการวัดสีที่ D65/10° ของยางล้างแม่แบบที่ผ่านการทำความสะอาด 60

ตารางที่ 4.4 เวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้ปริมาณสารทำความสะอาด MEA ต่างกัน 64

หน้า

ตารางที่ 4.5 ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยางล้างแม่แบบสูตรในงานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบในงานอุตสาหกรรม 74

ตารางที่ 4.6 ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยางล้างแม่แบบ ต่อ 1 กิโลกรัม สำหรับสูตรที่ใช้ AMP 20 phr กับสูตรที่ใช้ MEA 10 20 และ 30 phr 75

บทที่5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ตารางที่ 5.1 สรุปสูตรและต้นทุนของยางล้างแม่แบบที่เหมาะสม 77

ตารางที่ 5.2 สรุปสมบัติของสูตรยางล้างแม่แบบที่เหมาะสม 78

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญรูป

หน้า

<u>บทที่ 2</u> ทฤษฎีและหลักการ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM 7

รูปที่ 2.2 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ 13

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP) 20

รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของโมโนเอทาโนลามีน 21

<u>บทที่ 3</u> วิธีดำเนินการวิจัย

รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการ 33

รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของยางที่วางลงบนแม่แบบก่อนการอัดขึ้นรูป 43

รูปที่ 3.3 มาตราส่วนแสดงค่า L^* ,a^* และ b^* แบบสามมิติ 44

<u>บทที่ 4</u> ผลการทดลองและอภิปรายผล

รูปที่ 4.1 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่อุณหภูมิ 175 °C เมื่อเกรดของยาง EPDM ต่างกัน 47

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM 49

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM 49

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM 50

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM 50

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 200% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM 51

หน้า

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 300% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบ กับเกรดของยาง EPDM 51

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM 52

รูปที่ 4.9 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่อุณหภูมิ 175 °C เมื่อใช้ สารทำความสะอาดชนิดต่าง ๆ 53

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางล้างแม่แบบ กับชนิดของสารทำความสะอาด 55

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางล้างแม่แบบ กับชนิดของสารทำความสะอาด 55

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของ ยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด 56

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบ กับชนิดของสารทำความ สะอาด 56

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 200% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบ กับชนิดของสารทำความสะอาด 57

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 300% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบ กับชนิดของสารทำความสะอาด 57

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางล้างแม่แบบ กับชนิดของสารทำความสะอาด 58

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบยางล้างแม่แบบที่ผ่านการทำความสะอาด เป็นเวลา 5 นาที ที่ 175 °C 59

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไปกับครั้งที่ทำความสะอาด 61

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไปกับครั้งที่ทำความ สะอาด เปรียบเทียบระหว่างสูตรยางที่ใช้ AMP กับ MEA เป็นสารทำความสะอาด 62

รูปที่ 4.20 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่อุณหภูมิ 175 °C เมื่อใช้ ปริมาณสารทำความสะอาด MEA ต่างกัน 63

หน้า

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางล้างแม่แบบ กับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA 64

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางล้างแม่แบบ กับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA 65

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA 65

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบ กับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA 66

รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 200% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบ กับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA 66

รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 300% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบ กับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA 67

รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางล้างแม่แบบ กับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA 67

รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไปกับปริมาณสารทำความสะอาด สำหรับการล้างครั้งแรก 69

รูปที่ 4.29 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้ยาง EPDM Vistalon® 7001 และสารทำความสะอาด MEA 30 phr เป็นส่วนประกอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ 70

รูปที่ 4.30 สัณฐานวิทยาของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 20 phr เป็นสารทำความสะอาด ทำการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า 73

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

ทุกวันนี้การแข่งขันในอุตสาหกรรมแปรรูปยางเพิ่มสูงขึ้นทุกวัน ทำให้ผู้ประกอบการต้องมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อยู่ตลอดเวลา ปัญหาจึงอยู่ที่ว่า "ทำอย่างไรจึงจะได้ของดีราคาถูก" ด้วยเหตุนี้โครงงานที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในอุตสาหกรรมไทยปัจจุบันจึงได้แก่ โครงงานลดต้นทุน ซึ่งคุ้มค่ากับการลงทุนเพราะจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง

กระบวนการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (Compression molding) เป็นวิธีการที่นิยมสำหรับการขึ้นรูปยางในทางอุตสาหกรรม เพราะมีข้อดีคือ สะดวก อุปกรณ์ไม่ซับซ้อนและราคาถูกเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น และที่สำคัญที่สุดคือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปแบบที่หลากหลายเพราะสามารถเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงานได้ตามการออกแบบแม่แบบหรือแม่พิมพ์ (Mold) แต่การขึ้นรูปด้วยวิธีดังกล่าวก็มีข้อเสียคือการเกิดคราบตกค้างของยางและสารเคมีติดอยู่ภายในแม่แบบทำให้เกิดปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น ชิ้นงานที่ได้มีผิวที่ไม่สวยงาม เกิดรอยตำหนิ รูปร่างชิ้นงานเปลี่ยนไป แม่แบบเสียหาย ฯลฯ ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ก่อให้เกิดภาระด้านต้นทุนในการทำความสะอาดแม่แบบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

วิธีที่นิยมใช้ทำความสะอาดแม่แบบในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี แต่ยังไม่มีวิธีใดที่มีความเหมาะสมสำหรับงานอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น การแช่แม่แบบในตัวทำละลายแล้วขัดเอาคราบสกปรกออก วิธีนี้มีข้อดีคือ ต้นทุนต่ำ ทำความสะอาดได้ดี แต่มีข้อเสียคือ ไม่สะดวก ต้องปิดเครื่องจักรเป็นผลทำให้การผลิตหยุดชะงักเป็นเวลานาน สิ้นเปลืองพลังงานเป็นจำนวนมากในการให้ความร้อนแก่แม่แบบเพื่อผลิตต่อ ต้องเคลื่อนย้ายแม่แบบที่มีน้ำหนักมาก ประสิทธิภาพการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับตัวพนักงานเป็นอย่างมาก พนักงานเกิดความเบื่อหน่ายเพราะมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก วิธีดังกล่าวจึงเหมาะกับการทำความสะอาดเมื่อทำการผลิตครบตามคำสั่งและต้องการถอดแม่แบบนำไปเก็บ ด้วยเหตุนี้จึงมีผู้คิดค้นยางล้างแม่แบบ (Mold cleaning compound) ขึ้นทำให้สามารถทำความสะอาดแม่แบบได้ระหว่างทำการผลิต โดยการอัดขึ้นรูปยางล้างแม่แบบเหมือนขึ้นรูปยางทั่วไป จึงช่วยลดความ

สูญเปล่าในด้านเวลาและพลังงาน สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ผลิตได้ ข้อดีบางประการของยางล้างแม่แบบได้แก่

- สะดวกในการใช้ทำความสะอาดแม่แบบ โดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิตเป็นเวลานาน
- ใช้เวลาน้อยกว่าในการทำความสะอาด โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนอุณหภูมิการผลิต ประหยัดพลังงานกว่า เนื่องจากไม่สูญเสียพลังงานในการทำให้แม่แบบเย็น (Cool down) และให้ความร้อนใหม่ (Reheat)
- ใช้ต้นทุนการทำความสะอาดน้อยกว่า และใช้แรงงานน้อยกว่า
- ประสิทธิภาพการทำความสะอาด (Cleaning efficiency) และความสม่ำเสมอในการทำความสะอาดมากกว่า

แต่ยางล้างแม่แบบที่ผลิตได้ในปัจจุบันยังมีต้นทุนที่สูง ไม่เหมาะสมกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ ทำให้ยังไม่มีการนำมาใช้แพร่หลายนัก ด้วยเหตุนี้จึงมีการร่วมมือกันระหว่าง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กับ บริษัท เอส เค โพลิเมอร์ จำกัด เพื่อวิจัยการลดต้นทุนยางล้างแม่แบบ โดยเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงงานพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ปีการศึกษา 2547 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เรื่อง "การปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม" [1] โดย นางสาวณัฐณิชา เฮงประภากร และ นางสาวมลสิริ ชีประวัติชัย ซึ่งมี รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัดเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมกับบริษัท เอส เค โพลิเมอร์ จำกัด

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนาสูตรยางล้างแม่แบบเพื่อลดต้นทุนโดยการเปลี่ยนชนิดสารทำความสะอาดให้ได้ยางล้างแม่แบบที่มีสมบัติเหมาะสมกับการล้างแม่แบบและมีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาผลของการเปลี่ยนสารทำความสะอาด (Cleaning agent) จาก AMP (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol) เป็น MEA (Monoethanolamine)
- ศึกษาปริมาณของสารทำความสะอาดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง
- ศึกษาผลของเกรดของยางต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่แบบ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ยางทำความสะอาดแม่แบบที่มีประสิทธิภาพ ภายหลังการล้างแม่แบบได้ผลิตภัณฑ์ยางคุณภาพสูงขึ้น
- ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตยางล้างแม่แบบลดลง
- มีการนำไปผลิตใช้จริงในภาคอุตสาหกรรม
- เพิ่มกำลังการผลิต เครื่องจักรทำงานต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยชาติประหยัดพลังงาน

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การทำความสะอาดแม่แบบ [2]

วิธีการทำความสะอาดแม่แบบที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมยางทำได้หลายวิธี โดยวิธีการทำความสะอาดแม่แบบที่จะอ้างถึงต่อไปนี้ เป็นข้อมูลการทำความสะอาดแม่แบบอย่างง่ายและใช้ทั่วไป สามารถแบ่งวิธีการทำความสะอาดแม่แบบได้ดังต่อไปนี้

1. การทำความสะอาดแม่แบบโดยการขัด

หลักการคือ เทน้ำมันก๊าดลงบนแม่แบบที่สกปรก ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้เศษยางและคราบเคมีเก่าที่ติดบริเวณผิวแม่แบบเกิดการพองตัว จากนั้นใช้โลหะเส้นแคะบริเวณที่มีคราบสกปรกฝังติดอยู่ แล้วขัดผิวหน้าของแม่แบบด้วยแผ่นขัด เช่น สก๊อตช์ไบรต์

ผลที่ได้รับ

คราบเคมีและเศษยางเก่ายังออกไม่หมด สังเกตได้จากการอัดชิ้นงานในครั้งแรกหลังจากทำความสะอาด ซึ่งพบว่าชิ้นงานมีผิวที่ไม่เรียบ แสดงให้เห็นว่าแม่แบบยังคงมีคราบเคมีและเศษยางเก่าติดค้างอยู่

2. การทำความสะอาดแม่แบบโดยการจ้างบริษัททำความสะอาดแม่แบบ

พนักงานทำความสะอาดได้ใช้หินขัด (Super stone®) ขัดคราบสกปรกในร่องลึกออก แล้วใช้กระดาษทรายขัดบริเวณผิวหน้า

ผลที่ได้รับ

คราบสารเคมีและเศษยางยังออกไม่หมด โดยสังเกตได้จากการอัดชิ้นงานในครั้งแรก หลังจากการทำความสะอาด พบว่าชิ้นงานมีผิวไม่เรียบ จึงต้องใช้พนักงานขัดซ้ำอีกครั้ง แต่ใช้เวลาในการทำความสะอาดน้อยกว่าการใช้พนักงานขัดเองทั้งหมด

จากวิธีการทำความสะอาดแม่แบบที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการทำความสะอาดต่ำ จึงได้ใช้การทำความสะอาดแม่แบบด้วยยางล้างแม่แบบ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดที่สูงกว่า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการทำความสะอาดแม่แบบวิธีต่างๆ [2]

การทำความสะอาดโดยการขัดด้วยพนักงาน	การทำความสะอาดโดยการจ้างบริษัททำความสะอาด	การทำความสะอาดโดยการใช้คอมปาวด์ทำความสะอาดแม่แบบ
1. แม่แบบไม่สะอาด ยังมีคราบยางและเคมีเกาะที่ผิว	1. แม่แบบไม่สะอาดเท่าที่ควร แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้พนักงานขัด	1. แม่แบบสะอาด ไม่มีคราบสารเคมีเกาะที่ผิว
2. รอบในการทำความสะอาด คือ 2-3 วัน ต่อ 1 ครั้ง	2. รอบในการทำความสะอาด คือ 2-3 วัน ต่อ 1 ครั้ง	2. รอบในการทำความสะอาด คือ 4 วัน ต่อ1 ครั้ง ครั้งละ 3 mold
3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด คือ 2-3 วันต่อ1 ครั้ง	3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดคือ 1-2 วัน ต่อ1 ครั้ง	3. ระยะเวลาในการทำความสะอาด คือ 45 นาที ต่อ1 ครั้ง
4. เสียเวลาในการติดตั้งแม่แบบ เพราะต้องเอาแม่แบบลงและต้องเอาแม่แบบติดตั้งใหม่	4. เสียเวลาในการติดตั้งแม่แบบ เพราะต้องเอาแม่แบบลงและต้องเอาแม่แบบติดตั้งใหม่	4. ไม่เสียเวลาในการติดตั้งแม่แบบเพราะไม่ต้องเอาแม่แบบลง
5. เสียเวลาในการรออุณหภูมิเพราะต้องติดตั้งเครื่องใหม่	5. เสียเวลาในการรออุณหภูมิเพราะต้องติดตั้งเครื่องใหม่	5. ประหยัดเวลาในการทำความสะอาด
6. ทำให้การผลิตหยุดชะงักประมาณ 2-3วัน หรือเท่ากับ 504 mold หรือ1,290,240ชิ้น	6. ทำให้การผลิตหยุดชะงักประมาณ 2-3วัน หรือเท่ากับ 496 mold หรือ1,269,760ชิ้น	6. ทำให้การผลิตหยุดชะงักเพียง 1 ชม. หรือ 8 mold หรือ 20,480 ชิ้น
7. ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำความสะอาด 1 ครั้งคือ 338-507 บาท	7. ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำความสะอาด 1 ครั้ง คือ 2000 บาท	7. ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำความสะอาด 1 ครั้ง คือ345.75 บาท

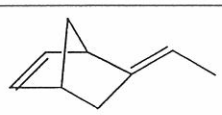
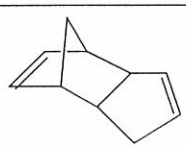
2.2 ยางล้างแม่แบบ

2.2.1 ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber,EPDM) [3,4]

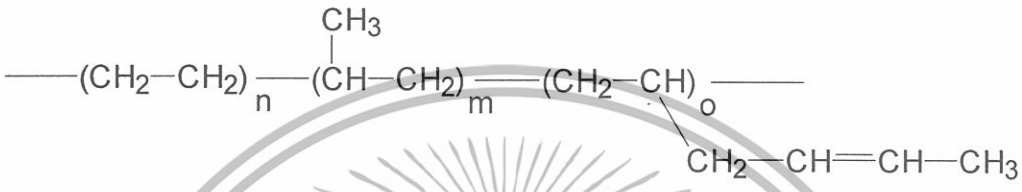
ยาง EPDM เป็นชื่อที่ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) และ ISO (International Standard Organization) โดยอักษร "E" มาจากเอทิลีน (Ethylene) อักษร "P" มาจากพรอพิลีน (Propylene) อักษร "D" มาจากไดอีน ส่วนอักษร "M" ท้ายชื่อใช้เรียกกลุ่มยางที่มีโครงสร้างหลักเหมือนพอลิเมทิลีน (Polymethylene, $-(CH_2)_n-$)

ในระยะแรกได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีนและพรอพิลีน จะได้พอลิเมอร์อสัณฐานเนื่องจากมีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่มจึงมีสมบัติเป็นยางที่เรียกว่า ยาง EPM เนื่องจากยางชนิดนี้ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง จึงทำให้มีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซนและสารเคมี อย่างไรก็ตาม การที่ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างจึงมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้กำมะถัน (Sulfur) ในการเชื่อมโยงได้ ใช้ได้เฉพาะเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) จึงมีการพัฒนายางชนิดนี้โดยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่ 3 คือไดอีนชนิดไม่คอนจูเกต (Nonconjugate Diene) ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่สาม (Terpolymer) ซึ่งมีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้าง ยางจึงสามารถทำการเชื่อมโยงได้ด้วยกำมะถันและเรียกยางชนิดนี้ว่ายาง EPDM

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่าง Nonconjugate Diene ที่ใช้ในการผลิตยาง EPDM [3]

ชื่อ	สมบัติ	โครงสร้าง
1,4 Hexadiene (HD)	เชื่อมโยงช้า แต่ได้ยางที่มีสมบัติใกล้เคียงกับ EPDM	$CH_2{=}CH{-}CH_2{-}CH{=}CH{-}CH_3$
Ethylidene norbornene (ENB)	นิยมใช้มากที่สุด แต่แพง เชื่อมโยงง่าย และเข้าได้ดีกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่นๆ	
Dicyclopentadiene (DCPD)	ราคาถูก เข้าได้ดีกับยางชนิดอื่นๆ แต่เชื่อมโยงช้าที่สุด	

เนื่องจากไดอีนที่เติมลงไปไม่ได้ไปแทรกอยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล แต่จะเกาะอยู่กับสายโซ่หลักเป็นลักษณะของกิ่งก้านสาขา สายโซ่หลักจึงไม่เกิดการเสียหายอันเนื่องมาจากพันธะคู่ที่ถูกทำลายด้วยสภาวะต่างๆ เช่น แสงแดด ออกซิเจน โอโซน ฯลฯ ด้วยเหตุนี้ยาง EPDM จึงมีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อ ความร้อน แสงแดด ออกซิเจน และโอโซนได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM (เกรดที่มี HD เป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่ 3) [3]

ยาง EPDM มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอีน โดยทั่วไป ยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ในช่วง 40-80 %โดยโมล ปริมาณของไดอีนอยู่ในช่วง 3-11 %โดยโมล สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีนในยางก็มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของยาง กล่าวคือ ยางเกรดที่มีปริมาณเอทิลีนสูงจะมีความแข็งแรงก่อนการเชื่อมโยงสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทิลีนลดลง ยางก็จะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น สมบัติทั่วไปของยาง EPDM แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพของยาง EPDM [4]

สมบัติทางกายภาพ	
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($^{o}C^{-1}$)	$2.2x10^{-4}$
ความร้อนจำเพาะ (cal/g·^{o}C)	0.52
การแพร่ความร้อน (cm^2/s)	$9.2x10^{-4}$
การนำความร้อน (cal/cm·s·^{o}C)	$8.5x10^{-4}$
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ohm·cm)	$5\text{-}10x10^{16}$
Dielectric strength (KV/mm)	30-35
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.86-0.87

สมบัติโดยรวมของยาง EPDM สามารถสรุปได้ดังนี้

- ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยาง EPDM มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์หลายๆชนิด แต่ยังต่ำกว่ายางธรรมชาติ
- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่ม ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน ไม่สามารถเกิดผลึกได้
- Compression set ต่ำ โดยเฉพาะยางถูกเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ ส่วนยางที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จะมีค่า Compression set สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- Dynamic property สูงและมีความต้านทานต่อการล้าสูง โดยเฉพาะยางที่ได้รับการเชื่อมโยงด้วยระบบกำมะถันซึ่งจะมีสมบัติด้านนี้ใกล้เคียงกับ SBR
- ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging property) เนื่องจากยาง EPDM ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้มีสมบัติด้านการต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้เป็นอย่างดี (ดีกว่ายาง SBR และ NBR แต่ด้อยกว่ายางซิลิโคน) โดยยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงกว่ายางที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน
- การทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and chemical resistance) ยาง EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว จึงทำให้ไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายไม่มีขั้ว แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี เช่น กรด เบส น้ำ แอลกอฮอล์ เป็นต้น
- ความเป็นฉนวน (Insulation) จากตารางที่ 2.3 พบว่ายางชนิดนี้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้นจึงมีความเป็นฉนวนสูง

สำหรับยาง EPDM สมบัติการเชื่อมโยงขึ้นกับชนิดและปริมาณของไดอีนที่ใช้ ถ้ามีปริมาณของไดอีนมาก ก็จะสามารถเชื่อมโยงยาง EPDM ได้รวดเร็ว ในขณะที่หากต้องการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ จะต้องใช้ยางเกรดที่มีสัดส่วนของพอลิเอทิลีนสูง (มากกว่า 50%) เพราะหมู่เมทิลในพอลิพรอพิลีนจะไปขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์และจะทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลแทน

การผสมยาง EPDM นิยมใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ถ้าใช้เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จะใช้ยางที่มีปริมาณเอทิลีนน้อยหรือพรอพิลีนมาก เพราะพอลิเอทิลีนจะทำให้ความหนืดของยางมากขึ้น ทำให้ผสมด้วยลูกกลิ้งได้ยาก

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ยาง EPDM เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนในรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง-ประตู แก้มยางรถยนต์ ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น หรือใช้ในการผลิตสายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา ฉนวนหุ้มสายเคเบิล นอกจากนี้ ยังสามารถผสมกับพลาสติกในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer,TPEs) ได้ด้วย

2.2.2 **สารเติมแต่ง** (Additives) [3,5]

สารเติมแต่ง คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของยาง (Property enhancement) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) ให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น

(1) **สารเชื่อมโยง** (Crosslinking agent) [3]

สารเชื่อมโยง ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-D Network) โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง เช่น กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ ออกไซด์ของโลหะ

การเชื่อมโยง (Crosslinking) หรือวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดของกระบวนการผลิตขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่าง ๆ ของยางจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ถ้ายางไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยง เพราะยางจะไม่แข็งตัว ไม่คงรูป ไหลได้ เสียสภาพ เหนียวติด ไม่สามารถรับแรงได้

การเชื่อมโยงสามารถทำได้โดยการผสมสารเคมี คือ สารเชื่อมโยง ได้แก่ กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะ นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators) ผสมเข้ากับยางแล้วทำการให้อุณหภูมิสูงในภายหลัง เพื่อทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้สารเชื่อมโยงต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลของยาง เมื่อทำการเชื่อมโยงแล้ว โครงสร้างจะเปลี่ยนจากสายโซ่ตรงเป็นโครงร่างแหสามมิติ ยางจะมีสมบัติที่ดีขึ้น การเชื่อมโยงทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนไป กล่าวคือ

- ความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น

- มอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- ความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- ฮีสเตอรีซิส (Hysterisis) ลดลง
- การเปลี่ยนสภาพถาวร (Permanent set) ลดลง
- การเหนียวติด (Sticky) ลดลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ทนต่อความร้อน แสงและการใช้งานนานขึ้น

การเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) เริ่มมีใช้ตั้งแต่ ค.ศ. 1950 วิธีเชื่อมโยงนี้มีข้อเด่นเหนือการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน คือ

- สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubbers) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) นิยมใช้เชื่อมโยงโดยเฉพาะยางที่อิ่มตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่นยาง EPDM และยางซิลิโคน (Q)
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat – aging properties) ดีกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent set) น้อยกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีกว่า
- สามารถเชื่อมโยงยางที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือสีขาว ไม่เป็นสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร มีการเปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเลต (UV light discoloration) น้อยกว่า
- ไม่เกิดปัญหาการบลูม (Bloom) ซึ่งจะเกิดเมื่อใช้กำมะถัน

เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง มีความเสถียรต่อความร้อนและแรงกระทำใดๆ เทียบกับพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิก (C-S bonds และ S-S bonds ตามลำดับ) ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า อย่างไรก็ดีการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการ คือ

- การเชื่อมยางด้วยเปอร์ออกไซด์ จะเกิดกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงปรารถนาของสารที่ปลดปล่อยออกมา ในระหว่างการเชื่อมโยงยาง และในผลิตภัณฑ์ยาง
- เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีอันตราย ต้องระมัดระวังในการใช้และเก็บรักษา
- สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งชนิดอื่นในยางมากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดและต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมียาง เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่น หรือน้ำมันเป็นต้น
- ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนในการเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cures) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่ของพอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดหมู่ของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคือยางเกิดจากการเสียสภาพ เนื่องจากความร้อนนั่นเอง
- ยางบิวทิล (Butyl rubber,IIR) จะเกิดปฏิกิริยาการเสียสภาพ เมื่อเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากเกิดเป็นอนุมูลของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radicals) ซึ่งไม่เสถียร เกิดการขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสภาพของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อยกเว้น ไม่สามารถใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล (IIR)

มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้เชื่อมโยงยาง เช่น ไดเอซิลเปอร์ออกไซด์ (Diacyl peroxides) และเปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy esters) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติสารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

- ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide , DCP)
- ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-t-butyl peroxide , DBP)
- ไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di(t-butyl-peroxy)hexane)

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีจำหน่ายทั้งในรูปผงของแข็งและของเหลว ความบริสุทธิ์ประมาณ 90-99 % เนื่องจากเปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงมีจำหน่ายในรูปของผสมกับสารตัวกลางเฉื่อยบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เข้มข้น 40-45 % และใช้ในรูปของผสมพร้อมสารเพิ่มเนื้อ ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์นิยมใช้น้อย

กว่า เนื่องจากกลายเป็นไอได้ง่ายขณะใช้งาน ส่วนไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซนนิยมใช้ในการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิสูง (180 °C) เนื่องจากมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า และไม่มีกลิ่นเหม็นของสารอะซิโตฟีโนน (Acetophenone)

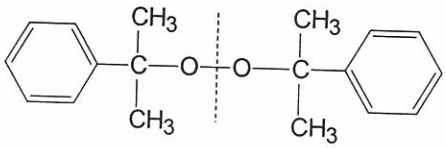
ในการใช้งานสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บสารที่อุณหภูมิสูง (เกิน 40 °C) เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลาย นอกจากนี้ควรเก็บให้ห่างจากแหล่งใช้ความร้อนและไฟฟ้าสถิต เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายและดับไฟยาก

<u>กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์</u>

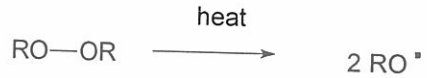
กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มจากปฏิกิริยาโฮโมไลติก – ดีคอมโพซิชัน (Homolytic decomposition) สลายตัวเนื่องจากความร้อน แตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอัลคอกซี (Alkoxy radicals , RO•) สองตัว ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.2 ในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) อนุมูลอิสระที่จะเกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูล (Polymer radicals หรือ Macro radicals) จากนั้นจะเกิดการรวมกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่ เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง

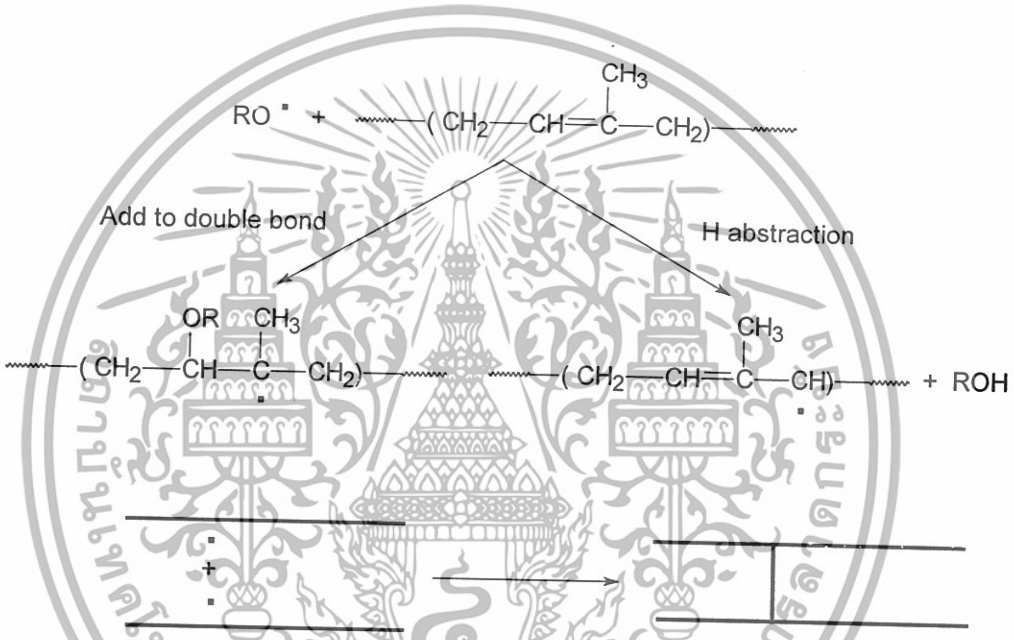
นอกจากอนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางที่ไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาง่าย เช่น Allylic hydrogen เกิดเป็นสายโซ่พอลิมูลที่มีอนุมูล เช่นเดียวกับในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางที่อิ่มตัวแล้ว การรวมกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา การใส่สารเคมีบางชนิด เช่น สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน และสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Antioxidant) อาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระในขณะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นผลให้เกิด "ปรากฏการณ์เจือจางการเชื่อมโยง" (Dilute crosslinking effect) ได้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการใส่สารเติมแต่งยางที่เป็นกรด เช่น สารตัวเติมซิลิกา (Silica) หรือเขม่าดำ (Carbon black) ที่เป็นกรด เนื่องจากกรดสามารถเร่งให้เปอร์ออกไซด์สลายตัวแบบไม่เกิดอนุมูลอิสระ (Nonradical-generating decomposition) ทำให้เกิดการสูญเสียของสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น แอนตี้ออกซิแดนท์ อาจหยุดปฏิกิริยาหรือเปลี่ยนแปลงอนุมูลอิสระระหว่างเกิดปฏิกิริยา เป็นผลให้เกิดพันธะเชื่อมโยงน้อย



Dicumyl peroxide , DCP





รูปที่ 2.2 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ [3]

ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของเปอร์ออกไซด์ในยาง และจำนวนของหมู่ฟังก์ชันและไฮโดรเจนของโครงสร้างที่สามารถถูกจับตัวด้วยอนุมูลอิสระ ปกติในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ปริมาณไม่เกิน 2.5 phr (ส่วนในร้อยส่วนของยาง) ที่อุณหภูมิเชื่อมโยงตั้งแต่ 150-230 °C การใช้อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาน้อยลงประมาณ 2.5 เท่าทุก 10 °C ที่เพิ่มขึ้นแต่จะเสี่ยงกับการเสียสภาพของยางและต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงที่มากจะทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากเกิน (Over- cure)

ทำให้สมบัติบางอย่างลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%elongation at break) ฯลฯ

(2) สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators) [3]

สารกระตุ้นการเชื่อมโยง เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) ในกรณีของการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ซึ่งไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง สารกระตุ้นการเชื่อมโยงจะทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงแทน

สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก (ZnO/Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทุกประเภท ซิงค์ออกไซด์จะเกิดปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็น ซิงค์ไอออน (Zinc ion) ของซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) ซึ่งมีความเป็นด่าง สามารถละลายได้ในยางและช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง

นอกจากซิงค์ออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นแล้ว อาจใช้ลิเทียมออกไซด์ (Li_2O) แมกนีเซียม (MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amines) โดยปกติในอุตสาหกรรมปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ คือ 2-5 phr ได้มีการศึกษาพบว่า การใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์เกิน 4 phr มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกระตุ้นการเชื่อมโยง

ตัวกระตุ้นอีกหนึ่งตัวคือ กรดไขมัน (Fatty acids) ที่มีจำนวนคาร์บอน 12-18 อะตอม เช่น กรดสเตียริก (เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต) กรดลอรีอิก (เกิดเป็นซิงค์ลอรีเอต (Zinc laureate)) โดยปกติใช้กรดสเตียริกในอุตสาหกรรมยางประมาณ 1-3 phr และจะใช้ปริมาณน้อยลงเมื่อใช้ยางที่อิ่มตัว เช่น EPDM นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเชื่อมโยงแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) เนื่องจากมีความเป็นไขมัน ทำให้ความหนืดลดลง

(3) สารตัวเติมซิลิกา (Silica) [3]

ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำชนิดอื่น ๆ ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ข้อดีของซิลิกาคือ มีอนุภาคเล็กทำให้สามารถแทรกและกระจายในยางได้สม่ำเสมอ ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรง

ฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat built up) เพิ่มความต้านการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง

ในการใช้งานซิลิกานิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เช่น สารประกอบไซเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่

- ขนาดอนุภาค และพื้นที่ผิว
- ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration)
- สมบัติทางกายภาพ เช่น pH องค์ประกอบทางเคมี การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) ฯลฯ

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกาและออกซิเจน จึงมีหมู่ไซลานอล (Silanol Group; -SiOH) ชนิดต่าง ๆ บนผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิวและยังมีผลต่อความเป็นกรดบนผิวของซิลิกาอีกด้วย จากความมีขั้วหรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกาทำให้สารเติมแต่งชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางนีโอพรีน (CR) ได้ดีกว่ายางที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ(NR) ยางอีพีดีเอ็ม (EPDM)

ซิลิกามีหลายชนิด เช่น ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) ซิลิกาชนิดรูพรุน (Porous silica) ละอองซิลิกา (Fumed silica) เป็นต้น

<u>ซิลิกาชนิดตกตะกอน</u> (Precipitated silica)

เป็นซิลิกาสังเคราะห์ สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาในสภาวะของเหลว ของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) หรือของผสมของกรดเกลือแร่กับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) สมบัติของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้ง่ายจากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นสารตั้งต้น อัตราการใส่สารตั้งต้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกกรอง ล้างทำความสะอาด ทำให้แห้ง และบดให้มีขนาดที่ต้องการ ซิลิกาชนิดตกตะกอนจะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) น้อยกว่า 94% และมีปริมาณความชื้นสูง (3-9%) สมบัติบางประการของ ซิลิกอนชนิดตกตะกอน แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของซิลิกาชนิดตกตะกอน [3]

สมบัติ	
Primary particle size (micron)	0.01-0.03
Average particle size (micron)	8-10
Density (g/cm^3)	2.2
Surface area, BET N_2 (m^2/g)	60-300
Oil absorption, ASTM D-281	160-200
Mohs hardness	6.5-7.0
% Moisture	6.0
Silanol group ($no./nm^2$)	1.5-10

(4) **สารช่วยกระบวนการผลิต** (Processing aids) [3]

สารช่วยกระบวนการผลิต คือ สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้นนั้นคือ ใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่าง ๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติจะใช้สารช่วยกระบวนการผลิตในปริมาณที่น้อยไม่เกิน 5 phr สารช่วยกระบวนการผลิต ได้แก่

1. เปพไทเซอร์ (Peptizers) ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ (Chain scission) ของยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดลดลง
2. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง และยังช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลเล็ก ที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากับยางได้ดี ไม่แพร่ออกที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ยาง หน้าที่ของพลาสติไซเซอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ช่วยกระบวนการขึ้นรูป การเติมสารตัวเติมต่างๆ เข้าไปในยางทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น พลาสติไซเซอร์จะทำให้ยางทั้งก่อนและหลังการเชื่อมโยงนิ่มตัวลง ความหนืดลดลง ทำให้การไหลของยางเข้าสู่แม่แบบได้ง่ายขึ้น
- เปลี่ยนสมบัติบางประการของยาง ยางที่ใส่พลาสติไซเซอร์จะนิ่มขึ้น ความแข็งลดลง ยางมีค่ามอดุลัสลดลง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น
- ลดต้นทุนการผลิต การใส่สารตัวเติมลงไปในยางปริมาณมากจะทำให้ยางแข็ง ไหลยาก การเติมพลาสติไซเซอร์จะช่วยให้สามารถเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในยางได้อีก
- เพิ่มความสามารถการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากพลาสติไซเซอร์จะไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลง จะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้ดีขึ้น
- ลดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปยาง การใส่พลาสติไซเซอร์ลงไปในยาง ทำให้ยางนิ่มลง ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการผสมยาง รวมทั้งอุณหภูมิในการขึ้นรูปยางลดลง

พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากับยางได้ดี ไม่แพร่ออกที่ผิวของผลิตภัณฑ์ยาง การเลือกพลาสติไซเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับยางสามารถทำได้โดยการพิจารณาค่าตัวแปรการละลาย (Solubility parameter) ของพลาสติไซเซอร์และยางที่ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างพลาสติไซเซอร์สำหรับยางได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acids) น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oils) สารประกอบเอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine) เป็นต้น

น้ำมันปิโตรเลียม เป็นน้ำมันที่เข้ากันได้ดีกับยาง ทำให้ความหนืดลดลง เป็นน้ำมันที่ไม่ระเหย ไม่ติดสี และไม่ตกสี น้ำมันชนิดนี้เมื่อใช้ทำให้ยางมีสมบัติตรงกันข้ามกับการใช้สารตัวเติม คือ มีผลทำให้ความแข็งลดลง ค่ามอดุลัสลดลง น้ำมันที่ใช้กับยางประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ แต่มีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจนบ้านในปริมาณเล็กน้อย โครงสร้างของคาร์บอนและไฮโดรเจนในน้ำมันแตกต่างกัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oils) หมายถึง น้ำมันมีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกไม่อิ่มตัว มีสีคล้ำ ความหนืดสูง
2. น้ำมันแนฟทานิก (Naphthenic oils) หมายถึง น้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนแนฟทานิกอิ่มตัว มีความหนืดปานกลาง

107719

3.น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oils) หมายถึงน้ำมันที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว อาจมีกิ่งบ้าง มีความหนืดต่ำ

(5) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agents) [3]

ยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสภาพได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน การเสื่อมสภาพของยางเกิดเนื่องจากโมเลกุลของยางถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโดยออกซิเจนหรือโอโซนการเสื่อมสภาพของยางนี้เรียกว่า "Degradation" การเสื่อมสภาพของยางเกิดขึ้นช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่ง แต่ในธรรมชาติมีแสงแดด ความร้อน และความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนแต่เป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตช่วงที่มีการอบยาง (Aging) ผลิตภัณฑ์ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่นเกิดรอบแตกที่ผิว ผิวแข็ง และสูญเสียความแข็ง กระบวนการเสื่อมสภาพของยางสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 6 แบบ ดังนี้

1) เสื่อมสภาพเนื่องจากตั้งทิ้งไว้นาน (Self aging)
2) เสื่อมสภาพเนื่องจากการกระตุ้นของโลหะ
3) เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat aging)
4) เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (Light aging)
5) เสื่อมสภาพเนื่องจากการพับงอ (Flex aging)
6) เสื่อมสภาพเนื่องจากบรรยากาศ (Atmosphere aging)

ในผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น จำเป็นต้องมีการเติมสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Antioxidants) หรือสารแอนตี้โอโซแนนท์ (Antiozonants) ซึ่งสารทั้งสองชนิดจะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางนานขึ้น

สารแอนตี้ออกซิแดนท์และแอนตี้โอโซแนนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) สารแอนตี้ออกซิแดนท์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1.สารแอนตี้ออกซิแดนท์ชนิดตกสี (Staining antioxidants)

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ประเภทนี้ เป็นสารประกอบเอมีน หรืออนุพันธ์ของเอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ยาง จะมีสีคล้ำหรือสีตก นิยมใช้กับยางสีดำ

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ประเภทนี้ สามารถแบ่งได้ 3 ชนิดคือ

- Ketone-amine condensates
- Aldehyde-amine condensates
- Secondary aromatic amines

2.สารแอนตี้ออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี (Non-staining antioxidants)

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ที่เป็นสารประกอบฟีนอล (Phenols) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางทั่วไปโดยเฉพาะยางที่ไม่ดำ ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางตกสีและเปลี่ยนสียาง สามารถแบ่งออกได้ 4 ชนิดคือ

- Substituted phenol สมบัติการเป็นแอนตี้ออกซิแดนท์ไม่ดี
- Phenolic sulfide มีความทนต่อความร้อนปานกลาง
- Phenol-aldehyde condensate เป็นสารที่มีสมบัติเท่ากับชนิดเอมีน คือป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ทนทานต่อความร้อน ทนต่อการหักงอ ไม่เปลี่ยนสียาง
- Hydroquinone derivatives เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ที่อ่อนสำหรับยางที่คงรูปแล้ว เหมาะจะใช้กับยางที่ไม่คงรูปและกาว โดยป้องกันไม่ให้ผิวยางที่คงรูปแห้งจนติดกันไม่ได้ เมื่อนำไปประกอบด้วยกัน

(6) **สารคู่ควบ** (Coupling agents) [5]

สารคู่ควบ เป็นสารช่วยยึดติดระหว่างสารตัวเติมกับยางให้ยึดติดกันได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น ไซเลน (Silanes) ผลของไซเลนทำให้มอดุลัส ความต้านทานการสึกหรอ การเปลี่ยนรูปถาวรของยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมดีมากขึ้น

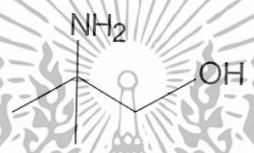
ไซเลนเป็นสารที่มีสูตรทั่วไปเป็น $R'\text{-}Si\text{-}(OR)_3$ หมู่ R' เป็นอะมิโนแคปโต ไวนิล อีพอกซี หรือ Methacryloxy เป็นต้น หมู่ R เป็นอัลคอกซี (alkoxy) จะถูกไฮโดรไลซ์เกิดเป็นไซลานอล ไซลานอลจะไปเกาะอยู่กับสารตัวเติมชนิดอนินทรีย์ เช่น ผิวของซิลิกา เคลย์ (Clay) หรือโลหะออกไซด์ (Metal oxides) เป็นต้น ส่วนอีกด้านหนึ่งคือ R' จะไปทำปฏิกิริยากับยาง ดังนั้น ไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดหรือประสานให้ยางกับสารตัวเติมอนินทรีย์มาเกาะกัน วิธีใช้ไซเลนทำได้โดยการผสมสารตัวเติมกับไซเลน แล้วจึงค่อยผสมกับยาง หรืออาจเอาไซเลนใส่เข้าไปในยางขณะผสมกับสารตัวเติมก็ได้ เช่น

γ -Aminopropyltrimethoxy silane ($H_2NC_3H_6Si(OC_2H_5)$) β-Mercaptoethyltriethoxy silane ($HSC_2H_4Si(OC_2H_5)_3$) ฯลฯ

(7) สารที่ใช้ในการทำความสะอาดแม่แบบ (Cleaning agents)

<u>อะมิโนเมทิลพรอพานอล</u> (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol ; AMP) [6]

โดยปกติจะอยู่ในสภาพของเหลวหนืด ใส สามารถติดไฟได้ มีกลิ่นคล้ายแอมโมเนียอ่อนๆ **สูตรโมเลกุล** คือ $H_4C_{11}NO$ โครงสร้างของ AMP แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol ; AMP [6]

ลักษณะบางประการของ AMP แสดงได้ดังนี้

- น้ำหนักโมเลกุล 89.14 g/mol
- ความถ่วงจำเพาะ 0.934
- จุดเดือด 165 °C
- จุดหลอมเหลว 30-31 °C
- มีความเป็นเบส pH = 11.3

ประโยชน์ของ AMP มีดังต่อไปนี้

- ใช้ในการสังเคราะห์แอกทีฟเอเจนท์ (Active agents)
- **เป็นองค์ประกอบของยางคอมปาวด์ทำความสะอาด** (Cleaning compound)
- **เป็นตัวเร่งในการเชื่อมโยง**
- **ใช้ในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะ** โดย AMP จะดูดซับ CO_2 และลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของเหล็ก

- ช่วยรักษา pH และความหนืดให้คงที่
- ช่วยให้เม็ดสีกระจายตัวได้ดีขึ้น

โมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine , MEA) [7]

ที่อุณหภูมิห้อง MEA จะมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายแอมโมเนียอ่อนๆ สามารถละลายได้ดีในน้ำและเอทานอล เกิดปฏิกิริยาได้ดีกับสารจำพวกกรดหลายชนิดเกิดเป็น Ester amide salt มีจุดเดือดประมาณ 170 °C มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของโมโนเอทาโนลามีน [7]

ได้มีการนำ MEA มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทซึ่งพอจะสรุปประโยชน์ของ MEA ได้ดังนี้ [8]

- ใช้เป็นสารฟอกสีให้ขาวสว่างในอุตสาหกรรมสิ่งทอ
- ใช้สังเคราะห์ยาต่อต้านเชื้อราในอุตสาหกรรมยา
- ใช้สังเคราะห์สีย้อมคุณภาพสูงในอุตสาหกรรมสีย้อม
- ใช้ล้างหมึกพิมพ์และยางในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์และอุตสาหกรรมยาง
- ใช้เป็นสารสำหรับล้างสนิม
- ใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์หลายชนิด
- ใช้เป็นสารดูดซับก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรด (Acid gases)
- ใช้เป็นสารป้องกันการกัดกร่อนและสารขจัดคราบมัน (Degrease) ในงานโลหะ
- สารควบคุมความเป็นกรดด่าง (pH regulation agent)
- เป็นส่วนผสมในสารทำความสะอาดต่างๆ เช่นสารทำความสะอาดผนังและห้องน้ำ สารทำความสะอาดชะล้างท่อ

เนื่องจาก MEA มีฤทธิ์เป็นด่างจึงมีสมบัติเป็นตัวเร่งสำหรับการเชื่อมโยงยางได้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ MEA แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของ MEA [7]

สมบัติ	
จุดเดือด	170 °C
จุดเยือกแข็ง	10 °C
ความถ่วงจำเพาะ	1.02
ความเป็นกรด-ด่าง(ที่ 20°C)	12.1

การใช้งาน MEA กับโลหะควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับทองแดงหรือโลหะผสมทองแดง อะลูมิเนียมและโลหะที่เป็นกรดเนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยากันได้ แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับเหล็กและสแตนเลส การเก็บรักษาควรหลีกเลี่ยงจากไฟและความชื้น เก็บในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวกการใช้งาน MEA มีข้อควรระวังคือ ควรทำในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก เพราะการหายใจเอาไอระเหยเข้าไปอาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจและมีอาการปวดศีรษะได้ ควรสวมถุงมือให้มิดชิด เพราะการสัมผัสผิวหนังจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองและมีผื่นแดงได้

(8) **สารให้สี (Pigments)** [9]

เป็นสารที่เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ให้มีสีสวยงามตามต้องการ สารให้สีที่ใช้ในยางล้างแม่แบบ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงแป้งละเอียด ผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำหรือตัวทำละลายใดๆ ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ว่องไวต่อสารเคมี มีสมบัติทางแสงดีมาก มีความมันเงาสูง มีความสว่างและความทึบแสงดีมาก สามารถกระจายตัวได้ดีและทนต่อสภาวะอากาศสูง

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารให้สีในยางล้างแม่แบบ ทำให้ได้ยางล้างแม่แบบสีขาว ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นคราบสกปรกได้ชัดเจน หลังจากทำความสะอาดแม่แบบแล้ว

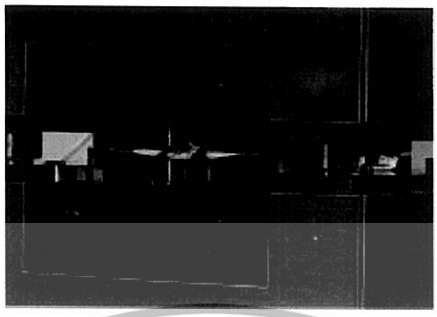
การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารให้สีในยางล้างแม่แบบ ทำให้ได้ยางล้างแม่แบบสีขาว ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นคราบสกปรกได้ชัดเจน หลังจากทำความสะอาดแม่แบบแล้ว

2.3 **วิธีใช้ยางล้างแม่แบบ** [1]

ยางล้างแม่แบบมีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

1. แม่แบบก่อนทำความสะอาด

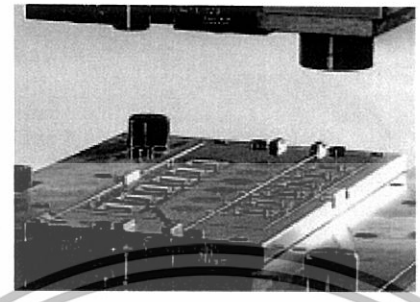
2. ตัดยางล้างแม่แบบให้มีขนาดเหมาะสมกับโพรงแม่แบบ (สามารถอัดได้เต็มแม่แบบ) จากนั้นนำมาวางบนโพรงแม่แบบ บริเวณกึ่งกลาง



3. ทำการอัดขึ้นรูปยางล้างแม่แบบเหมือนการขึ้นรูปยางปกติ โดยใช้อุณหภูมิเชื่อมโยงของยางล้างแม่แบบ

4. เปิดแม่แบบออกเมื่อการขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์

5. นำยางล้างแม่แบบที่ขึ้นรูปแล้วออกจากแม่แบบ คราบสกปรกจะติดออกมาพร้อมกับยางล้างแม่แบบ



6. แม่แบบหลังจากทำความสะอาด

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นางสาวขนิษฐา ศรีประทุม และนางสาวมนต์สุดา บุรารักษ์ [2] โครงงานพิเศษเรื่อง การศึกษายางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม ปีการศึกษา 2546 ได้ศึกษายางล้างแม่แบบ โดยใช้ยาง EPDM และ ใช้ AMP เป็นสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาด ใช้ DCP เป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งในงานวิจัยจะศึกษาถึงชนิดและปริมาณของสารตัวเติม (Filler) ได้แก่ ละอองซิลิกา (Fumed silica) และซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite Na-A) ปริมาณสารที่ใช้ทำความสะอาด อุณหภูมิที่เหมาะกับการขึ้นรูป ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม และสมบัติต่างๆ ของยางล้างแม่แบบ

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่แบบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ใส่ในยางล้างแม่แบบ ทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้น ซึ่งปริมาณของละอองซิลิกา ที่เหมาะสมเท่ากับ 40 phr ส่วนซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงซึ่งจะเพิ่มเนื้อเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงเลือกซิลิกาที่ปริมาณ 40 phr เป็นสารตัวเติม

จากการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป พบว่าอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ 175 ^{o}C เนื่องจากที่อุณหภูมินี้ AMP สลายตัวได้ดี ทำให้ประสิทธิภาพของการทำความสะอาดดี

จากการศึกษาปริมาณ AMP พบว่า ประสิทธิภาพการทำความสะอาดจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ AMP แต่มีผลต่อสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น มอดุลัส และความแข็งกดลดลง อีกทั้งในการนำไปใช้งานจริงจะต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิต ดังนั้น ปริมาณ AMP ที่เหมาะสมเท่ากับ 20 phr

การปรับปรุงความขาวของยางล้างแม่แบบ สามารถทำได้โดยเติม TiO_2 โดยจากการทดลองสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ยางล้างแม่แบบที่ได้จะมีสีขาวมากขึ้น แต่สมบัติเชิงกลด้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก TiO_2 เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ดังนั้นปริมาณTiO_2 ที่เหมาะสมเท่ากับ 2 phr เนื่องจากมีความขาวเพียงพอและไม่ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงมากนัก

ดังนั้นจึงสามารถสรุปสูตรจากงานวิจัยได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สูตรยางล้างแม่แบบที่ได้ในงานวิจัยโครงงานพิเศษปี 2546 [2]

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง ; phr)
EPDM	100
ZnO	5
Stearic acid	1
Silica	40
DCP	7
Paraffinic oil	5
BHT	1
SR-350	3
AMP	20
TiO_2	2

นางสาวณัฐณิชา เฮงประภากร และ นางสาวมลสิริ ชีประวัติชัย [1] โครงงานพิเศษ เรื่อง การปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม ปีการศึกษา 2547 ได้ศึกษาสูตรยางล้างแม่แบบชนิดอัดขึ้นรูปสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยใช้ยาง EPDM และใช้ AMP เป็นสารทำความสะอาด ใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมโยง โดยในงานวิจัยได้ศึกษาชนิดของสารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Antioxidants) ซึ่งเปรียบเทียบระหว่าง BHT กับ Wingstay®L และสารตัวเติมได้ศึกษาชนิดของซิลิกา ส่วนขั้นตอนในการผสมยางล้างแม่แบบ จะศึกษาลำดับการใส่ AMP ซึ่งเทียบระหว่างการใส่ AMP เป็นขั้นสุดท้ายกับการนำซิลิกามาแช่ใน AMP เพื่อให้เกิดการดูดซับแล้วจึงใส่

จากการเปรียบเทียบยางล้างแม่แบบที่ใช้ BHT กับ Wingstay®L เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ยางล้างแม่แบบที่ใช้ BHT เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์จะมีสีเหลืองขึ้นมาก แต่ยางล้างแม่แบบที่ใช้ Wingstay®L เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์จะมีสีเหลืองขึ้นเพียงเล็กน้อย Wingstay® L จึงเป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ที่เหมาะสมกว่า BHT

ส่วนการศึกษาสมบัติของสารตัวเติม โดยเปรียบเทียบระหว่าง Hi-Sil®233 ซึ่งมีมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด Hi-Sil®HOA และ Hi-Sil®255 ซึ่งจะมีขนาดอนุภาคเล็กลงตามลำดับ พบว่า ยางล้างแม่แบบที่ใช้ Hi-Sil®233 เป็นสารตัวเติมจะมีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งกด และมอดุลัสสูงที่สุดเมื่อเทียบกับยางล้างแม่แบบที่ใช้สารตัวเติมชนิดอื่น ๆ ส่วนยางล้างแม่แบบที่ใช้ซิลิกา Hi-Sil®255 เป็นสารตัวเติมจะมีค่าความแข็งแรงฉีกขาดมากที่สุด ซึ่งความแข็งแรงฉีกขาดนี้เป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญ เพราะส่งผลต่อความสามารถในการดึงยางออกจากแม่แบบหลังการทำความสะอาด

ในขณะที่การเปรียบเทียบขั้นตอนการใส่ AMP ระหว่างใส่เป็นขั้นตอนสุดท้ายกับนำซิลิกามาแช่ใน AMP ก่อนเพื่อทำการดูดซับแล้วนำไปผสมสูตรยาง พบว่ายางล้างแม่แบบที่นำซิลิกาไปผสมใน AMP ก่อนนำมาผสมสูตรยาง จะมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่า ส่วนสมบัติด้านอื่น ๆ ขั้นตอนในการใส่ AMP ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลที่ชัดเจนนัก

ดังนั้นจึงสามารถสรุปสูตรจากงานวิจัยได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สูตรยางล้างแม่แบบที่ได้ในงานวิจัยโครงงานพิเศษปี 2547 [1]

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง, phr)
EPDM	100
ZnO	5
Stearic acid	1
Silica	50
DCP	7
Paraffinic oil	5
Wingstay ®L (Antioxidant)	1
SR-350 (Coupling agent)	3
AMP	20
TiO_2	2

Botros S.H.[10] ทำการศึกษาถึงการปรับปรุงความทนทานต่อความร้อนและโอโซนของยางบิวทิล ปรับปรุงยาง EPDM ผสมกับยางบิวทิล เนื่องจากยาง EPDM มีโครงสร้างหลักที่เป็นโครงสร้างที่อิ่มตัวทั้งหมด จึงทนต่อความร้อน โอโซน และการเกิดออกซิเดชันมาก ยางEPDM ที่ศึกษามี 4 ชนิด คือ Buna AP-447,Vistalon-6505,Keltan-820 และระบบการเชื่อมโยงที่ศึกษามี 3 ระบบ ได้แก่ การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน/ZDEDC การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน/TMTD/MBT และการเชื่อมโยงด้วย Phenolformaldehyde resin-1054/neoprene-w จากการวิจัยพบว่า การเชื่อมโยงโดยใช้เรซินทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนและโอโซนดีที่สุด ตามด้วย การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน/ZDEDC และการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน/TMTD/MBT เมื่อนำยางบิวทิลมาผสมกับยาง EPDM พบว่ายางบิวทิลและยาง EPDM ชนิด Kaltan-820 ในสัดส่วน70:30 ให้ยางที่มีความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนดีที่สุด และจากการทดสอบทางความร้อน โดยนำไปอบที่ 165°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่ามีความแข็งแรงดึงและสมบัติเชิงกลอื่นๆ ที่ไม่เปลี่ยนแปลง จากการวิจัยนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในงานที่อุณหภูมิสูง คือ ที่ 165 °C

Poh B.T. และ NG C.C. [11] ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อเวลาการเชื่อมโยง (Mooney Scorch time) ของยางธรรมชาติ โดยใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ไซเลนที่ศึกษานี้มี 2 ชนิดคือ γ-Mercaptopropyltrimethoxysilane (A-189) และ Bis(triethoxysilylpropyl)tetrasulfide (Si-69) ใช้อุณหภูมิการเชื่อมโยงที่ 110-160 °C พบว่าที่อุณหภูมิการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า 120 °C เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ A-189 ส่งผลให้เวลาก่อนการเชื่อมโยงลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากหมู่ Thiol ซึ่งจะเพิ่มอัตราในการเชื่อมโยง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Si-69 ส่งผลให้เวลาก่อนการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เนื่องมากจากความเกะกะของหมู่ Triethoxysilylpropyl ซึ่งจะหน่วงการเชื่อมโยงให้ช้าลง และที่อุณหภูมิการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น เวลาก่อนการเชื่อมโยงไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไซเลน เนื่องมาจากพลังงานทางความร้อนที่ให้มีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น

United States Patent 5563119 [12] สิทธิบัตรฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวันที่ 8 ตุลาคม 1996 คิดค้นโดย Irl E. Ward มีสาระสำคัญคือ ได้มีการนำสารจำพวก Alkanolamine (ในสิทธิบัตรกล่าวอ้างถึง Monoethanolamine) มาเป็นส่วนผสมในสารละลายสำหรับชะล้างแทนไฮดรอกซิลามีน โดยใช้ร่วมกับ Tetraalkylammonium hydroxide และ Corrosion inhibitor โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. ใช้สำหรับชะล้างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ตกค้างบนชิ้นงานและวัสดุต่างๆ

2. ใช้สำหรับลอกสารเคลือบต่างๆ ที่ทำจากพอลิเมอร์ เช่น สี แลคเกอร์ หรือสารเคลือบที่ใช้กับแผงวงจรอิเลคทรอนิกส์

การใช้ Alkanolamine มีข้อดีเหนือกว่าการใช้สารจำพวกไฮดรอกซิลามีน คือ มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานมากกว่า เนื่องจากการสัมผัสกับไฮดรอกซิลามีนโดยตรง จะทำให้ผิวหนังถูกทำลายอย่างถาวร หากหายใจเอาไอระเหยเข้าไป อาจถึงแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้ Alkanolamine ยังมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงงานพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ปีการศึกษา 2546 [2] และ 2547 [1] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นการปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม ร่วมกับ บริษัท เอส.เค.โพลิเมอร์ จำกัด ซึ่งจะทำการศึกษาสูตรยางที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้ผลิตยางล้างแม่แบบและปรับปรุงลดต้นทุนยางล้างแม่แบบให้ถูกขึ้นและยังมีประสิทธิภาพดีดังเดิม ขั้นตอนในการทำการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกสูตรยางล้างแม่แบบ
3. ศึกษาผลของตัวทำความสะอาดแม่แบบ (Cleaning Agent) ชนิดใหม่ ว่าจะมีผลอย่างไรต่อการทำความสะอาดแม่แบบ สารทำความสะอาดแม่แบบที่ใช้ได้แก่
    1. AMP (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol)
    2. MEA (Monoethanolamine)
4. ศึกษาปริมาณของสารทำความสะอาดที่เหมาะสม โดยแปรผันปริมาณสารทำความสะอาดในสูตรยาง 10 , 20 และ 30 phr ตามลำดับ
5. ศึกษาผลของเกรดยางที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง โดยเปรียบเทียบยาง EPDM 3 เกรด
    1. Mitsui® EPT 3045
    2. Nordel® IP 4640
    3. Vistalon® 7001
6. ทำการผสมและอัดขึ้นรูปยางล้างแม่แบบ

ทำการผสมและอัดขึ้นรูปยางล้างแม่แบบด้วยเครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และทำการอัดขึ้นรูปยางล้างแม่แบบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น LP20

7. ทำการทดสอบสมบัติของยางล้างแม่แบบที่เตรียมได้

   7.1 การทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง

   7.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

   - การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D412
   - การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear test) ตามมาตรฐาน ASTM D624
   - ทดสอบความแข็งแรงกด (Hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM D2240

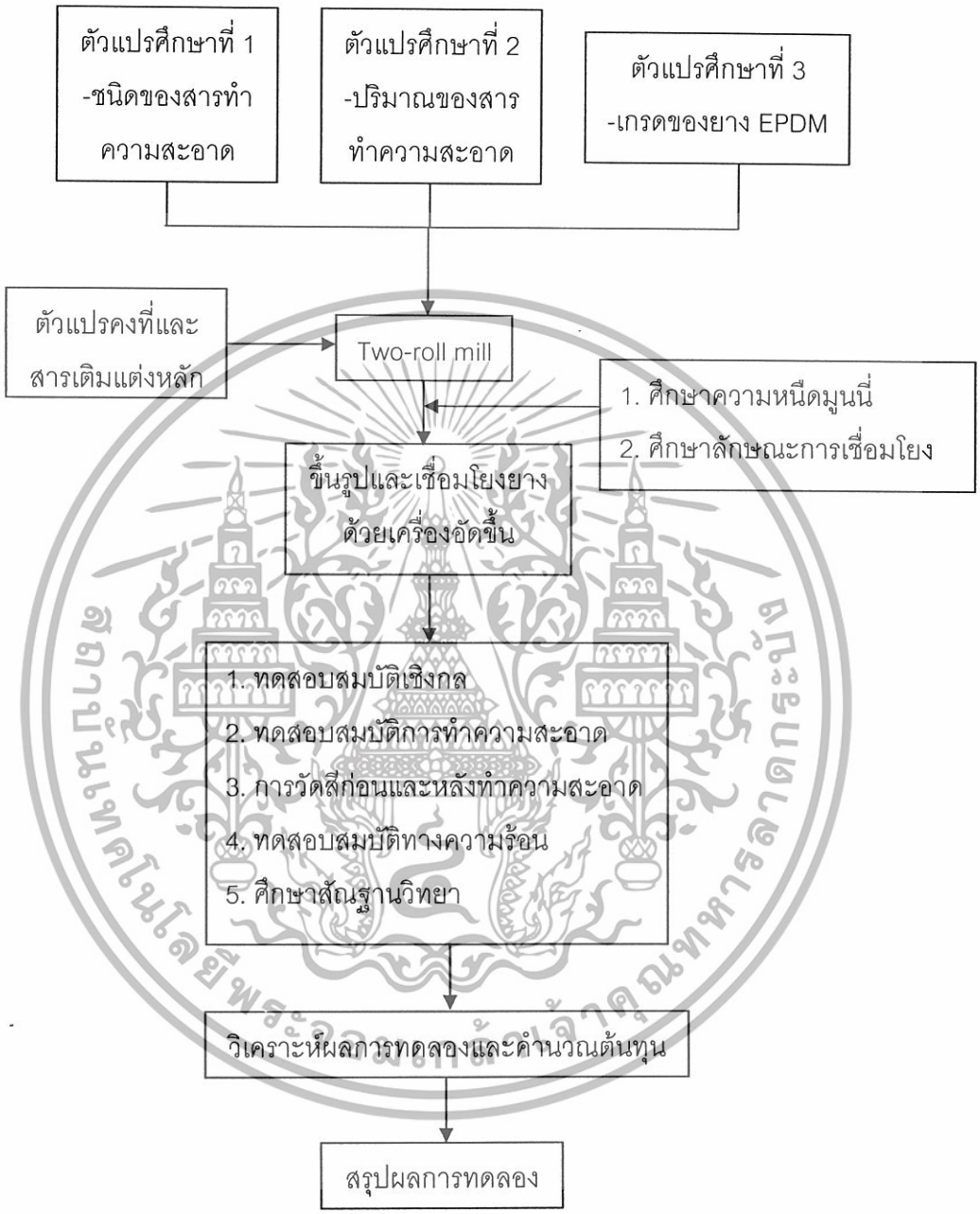
   7.3 การทดสอบสมบัติการทำความสะอาดแม่แบบ

   7.4 การทดสอบสี

   7.5 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

   7.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา

8. การวิเคราะห์ต้นทุน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินการ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขอบเขตการศึกษาออกเป็น 2 ตอนหลักๆ ด้วยกันคือ

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของสารทำความสะอาด (Cleaning agent) ชนิดใหม่ต่อการทำความสะอาดแม่แบบ และหาปริมาณที่เหมาะสม

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของเกรดยางที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมี

1. ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-propylene rubber ; EPDM) เกรดทางการค้า Mitsui® EPT 3045 บริษัท Onlx Limited Co.,Ltd.
2. ยางเอทิลีนพรอพิลีน เกรดทางการค้า Nordel® IP 4640 บริษัท Dupont Dow Elastomers LLC.
3. ยางเอทิลีนพรอพิลีน เกรดทางการค้า Vistalon® 7001 บริษัท ExxonMobil Chemical Company.
4. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรดการค้า บริษัท Global Chemical Co.,Ltd.
5. กรดสเตียริก (Stearic acid) บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
6. ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) เกรดการค้า Hisil® 255 G
7. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) ความเข้มข้น 98% เกรดการค้า บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
8. น้ำมันพาราฟิน (Parafinic oil) Oil P-150 บริษัท Union Link Co.,Ltd.
9. สารคู่ควบ (Coupling agent) SR-350 บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
10. สารแอนตี้ออกซิแดนท์ TMQ (Trimethyl quinoline) เกรดการค้า
11. PEG (Polyethylene glycol)
12. ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO_2)บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
13. สารทำความสะอาด อะมิโนเมทิลโพรพานอล (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol; AMP) เกรดทางการค้า บริษัท Merck Co,.Ltd.
14. สารทำความสะอาด โมโนเอทาโนลามีน (Monoethanolamine; MEA) เกรดการค้า บริษัท Dow Chemical Thailand Limited.

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยาง EPDM ที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 เกรด

สมบัติ	Mitsui® EPT 3045	Nordel® IP 4640	Vistalon® 7001	หน่วย	มาตรฐานทดสอบ
Mooney Viscosity ML(1+4)100 ^{0}C	40	n/a	n/a	ไม่มีหน่วย	-
Mooney Viscosity ML(1+4)125 ^{0}C	n/a	40	58	ไม่มีหน่วย	ASTM D1646
ปริมาณ Ethylene	56.5	55.2	73	wt %	ASTM D3900
ปริมาณ Diene (ENB)	4.5	5.04	5.0	wt %	ASTM D1646
Total Volatiles	0.20	0.2	n/a	wt %	PQ-E-007

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต , n/a = ไม่มีข้อมูล

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของซิลิกา Hi-Sil® 255G

Analysis item	หน่วย	ค่าที่ได้	มาตรฐานทดสอบ
SiO_2 content	Hydrated basis,%	93.05	ISO 3262-19
pH (5% suspension)	-	6.8	ISO 787/9
Moisture (as packed)	%	5.6	ISO 787/2
Na_2SO_4	%	1.15	X-Ray
Apparent density	g/cm^3	0.314	ISO 787-11
BET Surface Area (5 pt.)	m^2/g	160	ISO 9277

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของสารทำความสะอาด MEA

ส่วนประกอบ	ค่าที่ได้	หน่วย	การทดสอบ
Monoethanolamine	99.8	wt %	1B-17A-0.1
Diethanolamine	0.0	wt %	1B-17A-0.1
Water	0.2	wt %	1B-17A-0.2

หมายเหตุ ข้อมูลจากผู้ผลิต

อุปกรณ์

1. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น LP20 บริษัท แลบเทคเอนจิเนียริง จำกัด
2. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท แลบเทคเอนจิเนียริง จำกัด
3. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) บริษัท Shimadzu จำกัด Model SMV - 201
4. เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Moving Die Rheometer : Curelastometer®) บริษัท Nichigo Shigi Model II F
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal tester) บริษัท Intro LLOYD Instruments จำกัด
6. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester) บริษัท Intro Enterprise จำกัด
7. เครื่องอัดขึ้นรูปยาง (Compression molding machine) บริษัท Kuemin Machinery Co.,Ltd. รุ่น VO-200 ความดัน 200 psi
8. เครื่องวัดสี (Colormeter) รุ่น Mini Scan®XE plus 6.11 บริษัท Color Associates Co.,Ltd.

3.3 วิธีการทดลอง

1. การศึกษาผลของสารทำความสะอาดชนิดใหม่ต่อการทำความสะอาดแม่แบบ และหาปริมาณที่เหมาะสม

<u>การเตรียมยางผสมสูตร</u>

1.1 ชั่งสารเคมีต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.4

1.2 ทำการผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่เปิดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้แคบที่สุดโดยใส่สารตามลำดับในตารางที่ 3.5 เริ่มจากลำดับที่ 1 นำยาง EPDM มาทำการบดย่อย (Mastication) ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้งทำการกรีดพับยางจนกระทั่งยางนิ่มขึ้น ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ค่อย ๆ เติม Filler ต่างๆจากลำดับที่ 2 ถึง 5 โดยในแต่ละลำดับให้เติมสารจำพวกของแข็งและสารจำพวกของเหลวสลับกันไปเพื่อช่วยให้ง่ายในการผสม ระหว่างผสมสารให้กรีดพับยางตลอดจนสารเคมีกระจายทั่วทั้งอนุภาคยาง โดยสังเกตความสม่ำเสมอของการกระจายได้จากความสม่ำเสมอของสียาง

1.3 นำยางผสมสูตรออกจากลูกกลิ้ง เพิ่มความกว้างของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร รีดยางผสมสูตรให้เป็นแผ่น จากนั้นตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2×2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่นนำมาวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100 °C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4(100 °C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง

1.4 นำยางผสมสูตรที่เหลือมาผสมต่อด้วยลูกกลิ้งที่เปิดแคบสุด เติมสารเชื่อมโยง DCP และสารทำความสะอาดลงไปตามลำดับ ทำการผสมโดยการกรีดพับยางตลอดจนกระทั่งสารเคมีผสมเข้ากันดีกับเนื้อยาง โดยใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 10 นาที จากนั้นนำยางผสมสูตรออกจากลูกกลิ้ง

1.5 ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร รีดยางผสมสูตรให้เป็นแผ่น ตัดแผ่นยางผสมสูตรเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2×2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยางเพื่อหาเวลา

ก่อนการเชื่อมโยงยาง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time; t_{s2}) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time; t_{90}) ที่อุณหภูมิ 175 ^{0}C

1.6 พับยางที่เหลือทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บใส่ถุงพลาสติกรอการขึ้นรูปและทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ตารางที่ 3.4 สูตรผสมยางล้างแม่แบบที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1

สารเคมี (ส่วนในร้อยส่วนของยาง;phr)	สูตรที่			
	1	2	3	4
EPDM Vistalon® 7001	100	100	100	100
ZnO (RA)	5	5	5	5
Stearic acid	2	2	2	2
Hisil® 255 G	60	60	60	60
DCP 98%	3	3	3	3
Oil P-150	10	10	10	10
TMQ	1	1	1	1
SR-350	3	3	3	3
TiO_2	2	2	2	2
PEG	3.6	3.6	3.6	3.6
*สารทำความสะอาด AMP	20	-	-	-
*สารทำความสะอาด MEA	-	10	20	30

<u>หมายเหตุ</u> * คือตัวแปรที่ศึกษา

- สูตรที่ 1 กับ 3 เปรียบเทียบชนิดของสารทำความสะอาด
- สูตรที่ 2,3 และ 4 ศึกษาปริมาณสารทำความสะอาดที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.5 ลำดับการใส่สารระหว่างการผสมยาง

ลำดับการใส่	สารเคมี
1	ยาง EPDM
2	TMQ
3	Silica Hisil® 255 G PEG Oil P-150
4	SR-350 ZnO Stearic acid
5	TiO_2
6	DCP
7	สารทำความสะอาด

<u>หมายเหตุ</u> หากในลำดับใดมีสารหลายชนิดให้แบ่งใส่สารที่เป็นของแข็งและของเหลวสลับกัน

<u>การขึ้นรูปยาง</u>

1.7 ตั้งสภาวะของเครื่องอัดขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิเดียวกับการทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง แต่ใช้เวลาขึ้นรูปเป็น $t_{90} \times 1.2$

1.8 ตัดยางผสมสูตรให้มีปริมาณเพียงพอสามารถไหลได้เต็มแม่แบบ นำไปใส่ในแม่แบบ จากนั้นทำการอัดขึ้นรูป

1.9 เมื่อยางเชื่อมโยงสมบูรณ์ดึงยางออกจากแม่แบบ นำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

2. ศึกษาผลของเกรดยางที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยาง

<u>การเตรียมผสมยางสูตร</u>

2.1 ชั่งสารเคมีต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.6

2.2 ทำการผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ที่เปิดช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้แคบที่สุดโดยใส่สารตามลำดับในตารางที่ 3.5 เริ่มจากลำดับที่ 1 นำยาง EPDM มาทำการบดย่อย (Mastication) ที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้งทำการกรีดพับยางจนกระทั่งยางนิ่มขึ้น ใช้เวลาประมาณ 3 นาที ค่อย ๆ เติม Filler ต่าง ๆ จากลำดับ

ตารางที่ 3.6 สูตรผสมยางล้างแม่แบบที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 2

สารเคมี	น้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง;phr)
*EPDM (Mitsui® EPT 3045 , Nordel® IP 4640 หรือ Vistalon® 7001)	100
ZnO (RA)	5
Stearic acid	2
Hisil® 255 G	60
DCP 98%	3
Oil P-150	10
TMQ	1
SR-350	3
TiO_2	2
PEG	3.6
สารทำความสะอาด MEA	20

<u>หมายเหตุ</u> * คือตัวแปรที่ศึกษา

ที่ 2 ถึง 5 โดยในแต่ละลำดับให้เติมสารจำพวกของแข็งและสารจำพวกของเหลวสลับกันไปเพื่อช่วยให้ง่ายในการผสม ระหว่างผสมสารให้กรีดพับยางตลอดจนสารเคมีกระจายทั่วทั้งอนุภาคยาง โดยสังเกตความสม่ำเสมอของการกระจายได้จากความสม่ำเสมอของสียาง

2.3 นำยางผสมสูตรออกจากลูกกลิ้ง เพิ่มความกว้างของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร รีดยางผสมสูตรให้เป็นแผ่น จากนั้นตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2×2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่นนำมาวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100 °C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4(100 °C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง

2.4 นำยางผสมสูตรที่เหลือมาผสมต่อด้วยลูกกลิ้งที่เปิดแคบสุด เติมสารเชื่อมโยง DCP และสารทำความสะอาดลงไปตามลำดับ ทำการผสมโดยการกรีดพับยางตลอดจนกระทั่งสารเคมีผสมเข้ากันดีกับเนื้อยาง โดยใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 10 นาที จากนั้นนำยางผสมสูตรออกจากลูกกลิ้ง

2.5 ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 5 มิลลิเมตร รีดยางผสมสูตรให้เป็นแผ่น ตัดแผ่นยางผสมสูตรเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2×2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยางเพื่อหาเวลาก่อนการเชื่อมโยงยาง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time; t_{s2}) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time; t_{90}) ที่อุณหภูมิ 175 ^{0}C

2.6 พับยางที่เหลือทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บใส่ถุงพลาสติกรอการขึ้นรูปและทดสอบสมบัติต่าง ๆ

<u>การขึ้นรูปยาง</u>

2.7 ตั้งสภาวะของเครื่องอัดขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิเดียวกับการทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง แต่ใช้เวลาขึ้นรูปเป็น t_{90} x 1.2

2.8 ตัดยางผสมสูตรให้มีปริมาณเพียงพอสามารถไหลได้เต็มแม่แบบ นำไปใส่ในแม่แบบ จากนั้นทำการอัดขึ้นรูป

2.9 เมื่อยางเชื่อมโยงสมบูรณ์ดึงยางออกจากแม่แบบ นำไปทดสอบสมบัติเชิงกล

3. การศึกษาสมบัติของยางล้างแม่แบบที่เตรียมได้

3.1 การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่แบบ

3.1.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้านการดึงยืด

ด้วยเครื่อง Universal Tester ตามมาตรฐาน ASTM D412 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ (Dumbell shape) กำหนดสภาวะเครื่อง ทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยืด	500	มิลลิเมตรต่อวินาที
ความยาวเกจ	25	มิลลิเมตร
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	8	ชิ้นงาน

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เท่ากับความเค้นสูงสุด (Maximum stress) ของวัสดุที่รับได้เมื่อให้แรงดึง (หน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่) หาจากสมการ

   ความแข็งแรงดึง = F / A

   เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดสูงสุด (N)

   A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

2. มอดุลัสของยาง (Rubber modulus) เป็นค่าความเค้น (Stress) ที่เปอร์เซ็นต์ 100 (M100), 200 (M200) และ 300 (M300)

3. เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) หาได้จากสมการ

   เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด = $(l - l_0) / l_0 \times 100$

   เมื่อ l = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (m)

   เมื่อ l_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (m)

3.1.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear test)

ด้วยเครื่อง Universal Tester ตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนกตามมาตรฐาน ASTM Die C กำหนดสภาวะในการทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยืด	500	มิลลิเมตรต่อวินาที
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	8	ชิ้นงาน

3.1.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load hardness tester) ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องจากการกดที่ตัวอย่างที่หนาอย่างน้อย ¼ นิ้ว รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยต่อ 10 ครั้ง ในการตรวจสอบต่อ 1 ชิ้นงานตัวอย่าง

3.2 การศึกษาสมบัติการทำความสะอาดแม่แบบ

3.2.1 การทดสอบการทำความสะอาดกับแม่แบบที่ใช้งานจริง

นำยางล้างแม่แบบที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมาอัดกับแม่แบบที่ใช้งานจริงด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปยางรุ่น VO-200 เป็นเวลา 5 นาที ที่อุณหภูมิ 175 °C และทำซ้ำ 5 รอบ ซึ่งจะทำการทดสอบกับแม่แบบเดียวกันแต่ต่างจุดกันเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบ ยางล้างแม่แบบที่นำมาทดสอบกับแม่แบบจริงนี้ มี 4 สูตร คือ ยางผสมสูตรที่มีปริมาณ AMP 20 phr ยางผสมสูตรที่มีปริมาณ MEA 10 20 และ 30 phr โดยวางล้างแม่แบบในแต่ละมุมของแม่แบบ ดังรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของยางที่วางลงบนแม่แบบก่อนการอัดขึ้นรูป

3.2.2 การวัดสี

นำยางที่อัดทำความสะอาดแล้วมาวัดสี เพื่อดูสีที่เปลี่ยนแปลงไปจากสีของยางล้างแม่แบบเริ่มต้น โดยใช้ความสว่างของแสงที่ D65/10° ทำการวัดชิ้นงานละ 10 จุด ไม่ซ้ำตำแหน่งกัน เพื่อหาค่าเฉลี่ย เริ่มจากการวัดสีของยางล้างแบบที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดแม่แบบ จากนั้นนำยางล้างแม่แบบที่ผ่านการทำความสะอาดแม่แบบครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2 ครั้งที่ 3 ครั้งที่ 4 และครั้งที่ 5 มาวัดสีเพื่อเปรียบเทียบความสกปรกในแต่ละครั้ง โดยวัดออกมาในค่า

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

เมื่อ ΔE^* = ความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไป

ΔL^* = ความสว่าง

Δa^* = เฉดสีเขียว-แดงโดยค่าลบคือ สีเขียว และค่าบวกคือ สีแดง

Δb^* = เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง โดยค่าลบคือ สีน้ำเงิน และค่าบวกคือสีเหลือง

รูปที่ 3.3 มาตราส่วนแสดงค่า L^* ,a^* และ b^* แบบสามมิติ

3.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางล้างแม่แบบ

นำยางล้างแม่แบบมาทดสอบ TGA โดยใช้สภาวะดังนี้

- ชั่งตัวอย่างยางประมาณ 5 มิลลิกรัม
- อัตราการให้ความร้อน 20 °C / min
- ช่วงอุณหภูมิ 50 - 800 °C

3.4 <u>การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่แบบ</u>

ศึกษาสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่แบบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) โดยดูจากภาพตัดขวางตัวอย่างที่แตกหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) สามารถเตรียมตัวอย่างได้ดังนี้

- นำยางล้างแม่แบบที่เตรียมได้มาหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) โดยแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 20 นาที แล้วหักชิ้นงานเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยอย่าให้รอยที่หักถูกสัมผัส
- ทำการเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำ
- นำชิ้นงานไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

5. ทำการวิเคราะห์ถึงต้นทุน ความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

เปรียบเทียบต้นทุนของยางล้างแม่แบบแต่สูตรในงานวิจัยนี้กับยางล้างแม่แบบที่เคยมีการวิจัยมาแล้วว่าสามารถลดต้นทุนได้มากเพียงใด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้กับต้นทุนการผลิตของแต่ละสูตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในอุตสาหกรรมยาง มักจะประสบปัญหาในเรื่องการทำความสะอาดแม่แบบ วิธีที่ใช้ทั่วไป คือ การใช้แรงงานคนในการขัด ซึ่งต้องใช้เวลาในการทำความสะอาดนาน ส่งผลให้กำลังการผลิตลดลง ในงานวิจัยนี้จึงได้ผลิตยางคอมปาวด์ล้างแม่แบบขึ้น เพื่อลดเวลาในการทำความสะอาดและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแม่แบบมากขึ้น

ยางคอมปาวด์ล้างแม่แบบมีลักษณะที่ต้องคำนึงถึง ดังนี้

- สามารถเก็บสารที่ใช้ทำความสะอาดได้ เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของยางล้างแม่แบบคือ สารที่ใช้ทำความสะอาด ซึ่งจะทำงานได้เมื่อยางเกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นยางล้างแม่แบบนี้ต้องสามารถเก็บสารที่ใช้ทำความสะอาดไว้ได้จนถึงยางเกิดการเชื่อมโยง
- มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส เพื่อป้องกันการฉีกขาดระหว่างการดึงยางออกจากแม่แบบเนื่องจากแม่แบบมีลักษณะที่ซับซ้อน
- มีสีอ่อน ๆ หรือสีขาว เพื่อที่จะได้เห็นถึงคราบสกปรกที่ติดออกมากับยางล้างแม่แบบได้ง่าย
- สิ่งที่สำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึง คือ อุณหภูมิที่ยางเกิดการเชื่อมโยง จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับจุดเดือดของสารทำความสะอาด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงสุด

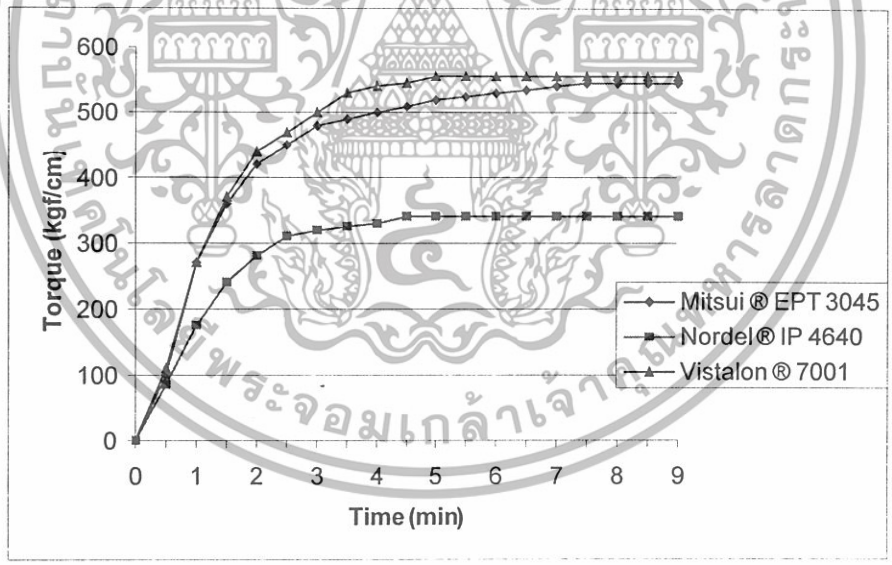
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกรดของยาง EPDM ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลโดยตรง เนื่องจากเกรดของยาง EPDM มีหลายเกรด และส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่แบบ พร้อมทั้งทำการศึกษาชนิดและปริมาณของสารทำความสะอาด โดยสารทำความสะอาดที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิดคือ AMP (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol) และ MEA (Monoethanolamine) จากนั้นนำยางล้างแม่แบบที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติการทำความสะอาด ผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาเกรดของยาง EPDM

เกรดของยาง EPDM มีหลายเกรด ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมอนอเมอร์เอทิลีนต่อพรอพิลีน และปริมาณไดอีนที่มีในโครงสร้างซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกลของยาง แต่จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด ซึ่งยางที่นำมาใช้ในการศึกษาคือ ยาง EPDM เกรด Mitsui® EPT 3045, Nordel® IP 4640 และ Vistalon® 7001

1) ลักษณะการเชื่อมโยง

ในยางการสังเคราะห์ยาง EPDM จะมีการใส่ไดอีน (Diene) เข้าไปเป็นโพลิเมอร์ร่วมชนิดที่สาม นอกเหนือจากเอทิลีนและพรอพิลีน โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ยางสามารถเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น ดังนั้น หากใช้ยางเกรดที่มีปริมาณไดอีนในโครงสร้างมาก ยางจะเชื่อมโยงได้เร็ว ดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 ยาง EPDM เกรด Nordel® IP 4640 ที่มีไดอีนในโครงสร้างมากที่สุด (5.04 wt %) จึงใช้เวลาเชื่อมโยงน้อยที่สุด รองลงมาคือ Vistalon® 7001 (5.0 wt %) และ Mitsui® EPT 3045 (4.5 wt %) ใช้เวลาเชื่อมโยงนานสุด



รูปที่ 4.1 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่อุณหภูมิ 175 °C เมื่อเกรดของยาง EPDM ต่างกัน

ตารางที่ 4.1 เวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้เกรดของยาง EPDM ต่างกัน

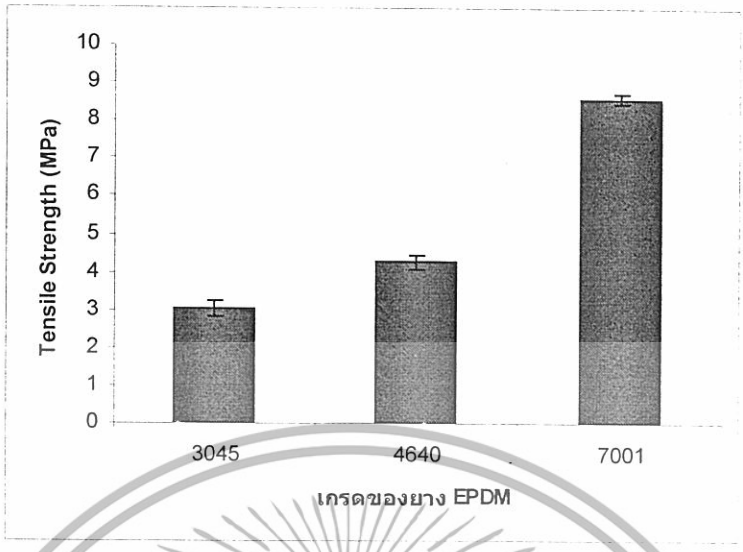
เกรดของยาง EPDM	Cure time; t_{90} (min)
Mitsui® EPT 3045	3.80
Nordel® IP 4640	2.46
Vistalon® 7001	3.00

2) สมบัติเชิงกล

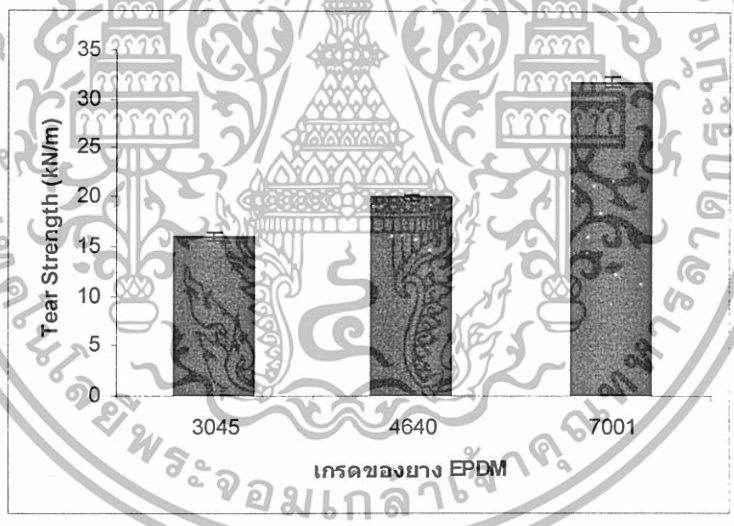
จากตารางที่ 3.1 ยาง EPDM เกรด Vistalon® 7001 มีปริมาณเอทิลีนในโครงสร้างมากที่สุด (73 %wt) รองลงมาคือ ยาง EPDM เกรด Mitsui® EPT 3045 (56.5 %wt) และ ยาง EPDM เกรด Nordel® IP 4640 (55.2 %wt) ตามลำดับ การมีปริมาณเอทิลีนในโครงสร้างมาก จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ดังรูปที่ 4.2 – 4.8 ยางล้างแม่แบบที่ใช้ยาง EPDM เกรด Vistalon® 7001 มีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัสและความแข็งกด สูงกว่า ยางล้างแม่แบบที่ใช้ยาง EPDM เกรด Nordel® IP 4640 และเกรด Mitsui® EPT 3045 แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ต่ำกว่า ส่วนยาง EPDM เกรด Mitsui® EPT 3045 ซึ่งมีปริมาณเอทิลีนในโครงสร้างมากกว่าเกรด Nordel® IP 4640 เล็กน้อย แต่กลับมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่า เนื่องจากยาง EPDM เกรด Nordel® IP 4640 มีปริมาณไดอีน (5.04 %wt) ที่มากกว่าเกรด Mitsui® EPT 3045 (4.5 %wt) การมีปริมาณไดอีนมากจะทำให้ยางมีการเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

อย่างไรก็ตามข้อเสียของการมีเอทิลีนในองค์ประกอบสูงคือ การผสมยางจะยากขึ้น เนื่องจากยางมีส่วนของโมเลกุลเอทิลีนที่ติดกันในสายโซ่พอลิเมอร์มาก ทำให้เกิดเป็นส่วนที่เป็นระเบียบในโครงสร้างมาก ยางมีความแข็งสูง และไหลเปลี่ยนรูปยาก ส่งผลให้ต้องใช้เวลาผสมยางนาน ใส่สารได้น้อยลง และสภาวะที่ใช้ผสมต้องพิถีพิถันมากขึ้น จึงต้องนำปัจจัยเหล่านี้มาพิจารณาประกอบกับสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นด้วย

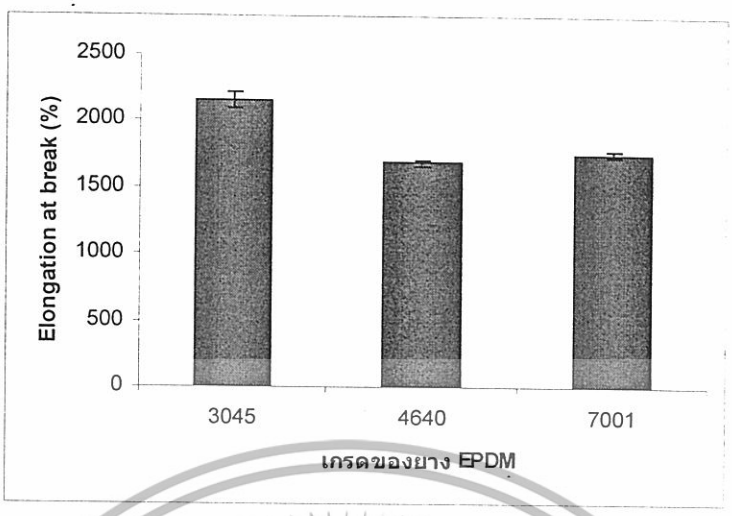
จากผลการทดลองเปรียบเทียบยางล้างแม่แบบที่เตรียมจากยาง EPDM ทั้งสามเกรด พบว่ายาง EPDM Vistalon® 7001 ให้ยางผสมสูตรที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ดังนั้นจึงใช้ยางเกรดนี้ในงานวิจัยตอนต่อไป



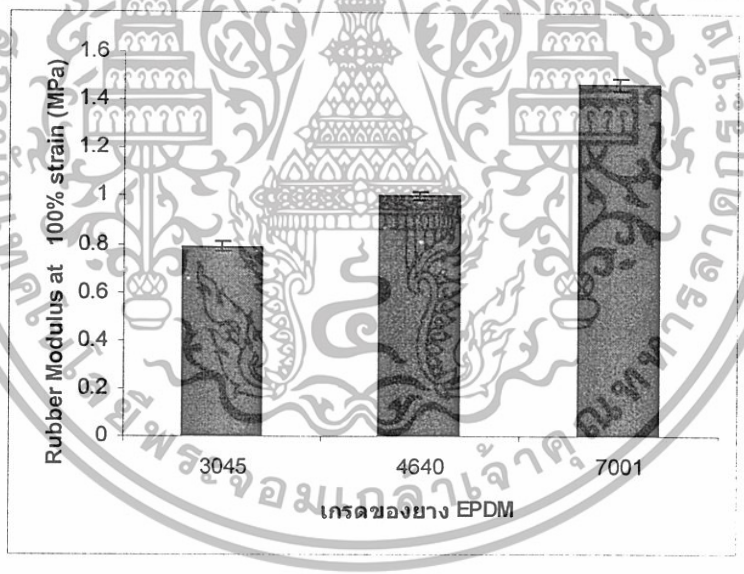
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM



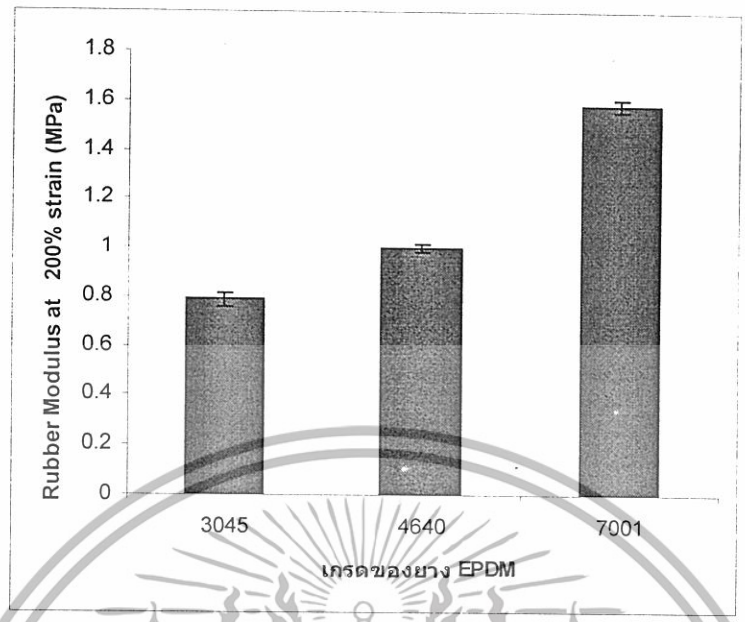
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM



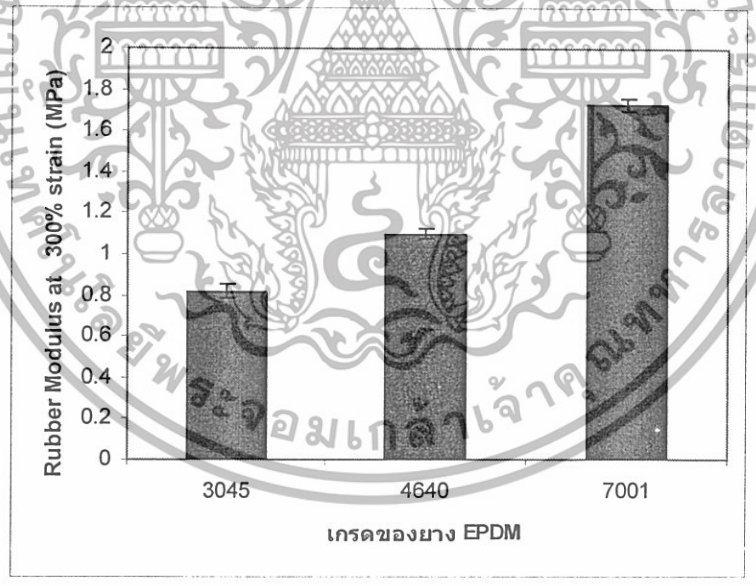
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM



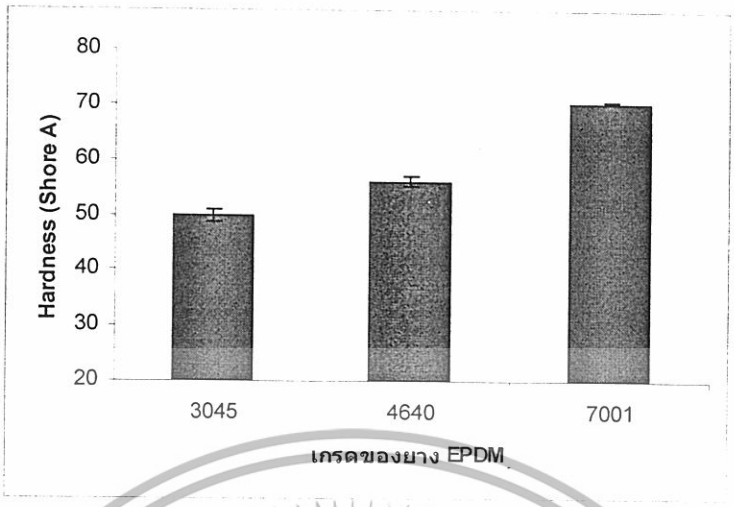
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 200% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 300% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางล้างแม่แบบกับเกรดของยาง EPDM

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

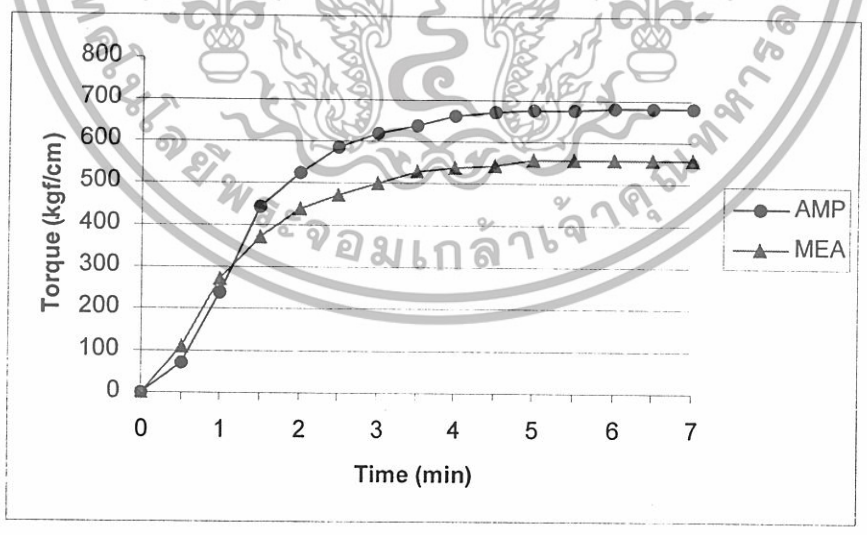
4.2 การศึกษาชนิดของสารทำความสะอาด

การเลือกใช้ชนิดของสารทำความสะอาดมีความสำคัญอย่างมากซึ่งนอกจากจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการทำความสะอาดแล้ว ยังมีผลต่อต้นทุนการผลิตของยางคอมปาวด์ล้างแม่แบบด้วย เนื่องจากสารทำความสะอาดเป็นสารเติมแต่งที่มีราคาสูงมากสำหรับยางล้างแม่แบบ สารทำความสะอาดที่ใช้ในการศึกษาคือ AMP (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol) ซึ่งเป็นสารทำความสะอาดที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยเรื่อง การศึกษายางล้างแม่แบบสำหรับอุตสาหกรรม [2] และการปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบในงานอุตสาหกรรม [1] กับ MEA (Monoethanolamine) ซึ่งเป็นสารประเภทเดียวกัน แต่มีฤทธิ์เป็นเบสสูงกว่าเล็กน้อย มีต้นทุนต่ำกว่า และหาได้ง่ายกว่า AMP

1) ลักษณะการเชื่อมโยง

จากผลการทดลองพบว่าการใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาดจะทำให้ยางมีการเชื่อมโยงเร็วกว่า AMP เล็กน้อยดังรูปที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.2 อาจมีสาเหตุมาจาก

- โดยปกติสารตัวเติมซิลิกาจะมีความเป็นกรดเล็กน้อย (pH = 6.8) ซึ่งจะสามารถเร่งให้เปอร์ออกไซด์สลายตัวแบบไม่เกิดอนุมูลอิสระ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงช้าลงได้ ทั้ง AMP



รูปที่ 4.9 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่อุณหภูมิ 175 °C เมื่อใช้สารทำความสะอาดชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 เวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้สารทำความสะอาดต่างๆกัน

ชนิดของสารทำความสะอาด	Cure time; t_{90} (min)
AMP 20 phr	3.10
MEA 20 phr	3.00

(pH = 11.3) และ MEA (pH = 12.1) ต่างมีความเป็นเบสทั้งคู่จึงช่วยลดความเป็นกรดของซิลิกาได้ แต่ MEA มีความเป็นเบสมากกว่าจึงสามารถลดความเป็นกรดของซิลิกาได้มากกว่า ส่งผลให้การสลายตัวให้อนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ถูกรบกวนน้อยกว่า การเชื่อมโยงจึงเกิดขึ้นเร็วกว่า

- สารทำความสะอาดที่มีความเป็นเบสอาจเกิดปฏิกิริยารบกวนการสลายตัวของสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ได้ทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้ดีขึ้น แต่ด้วยการที่ MEA มีความเป็นเบสมากกว่า AMP จึงส่งผลให้ยางเชื่อมโยงได้เร็วกว่า

การที่ยางเชื่อมโยงได้เร็วนั้นจะช่วยให้ใช้เวลาขึ้นรูปน้อยลง และประหยัดพลังงาน ดังนั้นในด้านการเชื่อมโยง MEA จึงมีความเหมาะสมกว่า

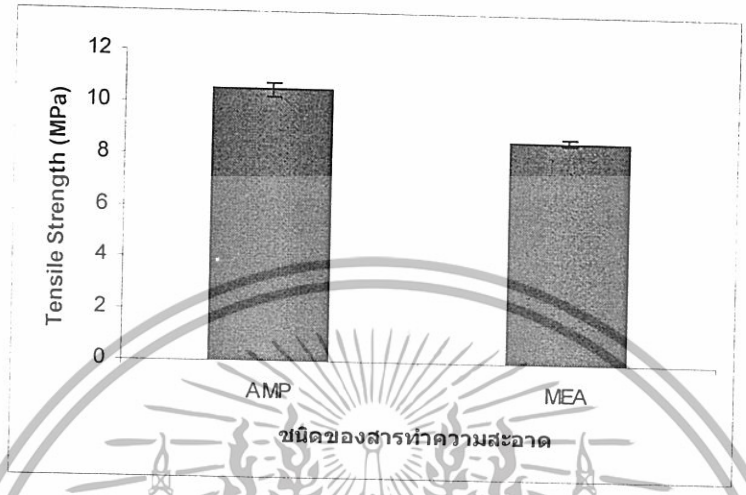
จากรูปที่ 4.9 พบว่าหลังจากเวลาเชื่อมโยงยาง (Overcure phase) กราฟมีลักษณะคงที่แสดงว่ายางล้างแม่แบบที่ใช้สารทำความสะอาดทั้งสองชนิดมีเสถียรภาพทางความร้อนดี มีองศาการเชื่อมโยงคงที่ ไม่เกิดการเสื่อมสลายทั้งแบบเชื่อมโยงและแบบตัดสายโซ่ ซึ่งจะมีประโยชน์ในกรณีที่ต้องการเพิ่มเวลาขึ้นรูปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาด และสะดวกในการใช้งาน เพราะสามารถปรับเวลาขึ้นรูปตามอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปได้ตามความเหมาะสม

2) สมบัติเชิงกล

เนื่องจากโมเลกุลของ MEA มีขนาดเล็กกว่า AMP จึงสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในสายโซ่ของยางได้ดีกว่า ทำให้สายโซ่ของยางที่ใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาดเกิดการบวมตัวได้มากกว่า สายโซ่ยางอยู่ห่างกันมากขึ้น เมื่อทำการเชื่อมโยงยาง ความหนาแน่นเชื่อมโยงจึงลดลง ส่งผลให้ล้างแม่แบบที่ใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาดมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่ายางที่ใช้ AMP ดังรูปที่ 4.10 – 4.16 การใช้ MEA จะให้ยางมีความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัสของยางและความแข็งกด ต่ำกว่า แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มากกว่า

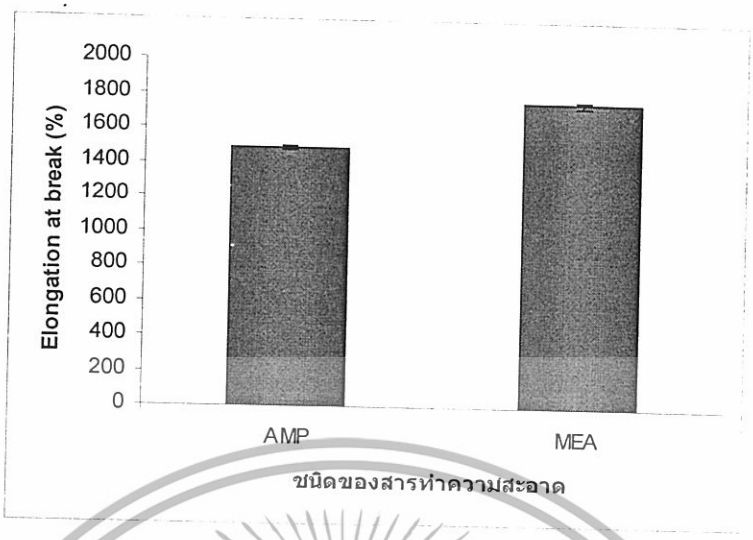
การใช้ AMP จะส่งผลให้สามารถดึงออกจากแม่แบบได้ง่ายกว่า ใช้งานกับแม่แบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี แต่อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลที่ต้องการคือเพียงพอต่อการนำออกจากแม่แบบ

จำเป็นต้องสูงที่สุด ดังนั้นการพิจารณาต้องดูสมบัติอื่น เช่นการทดลองใช้งานจริง ราคา และประสิทธิภาพการทำความสะอาดประกอบด้วย



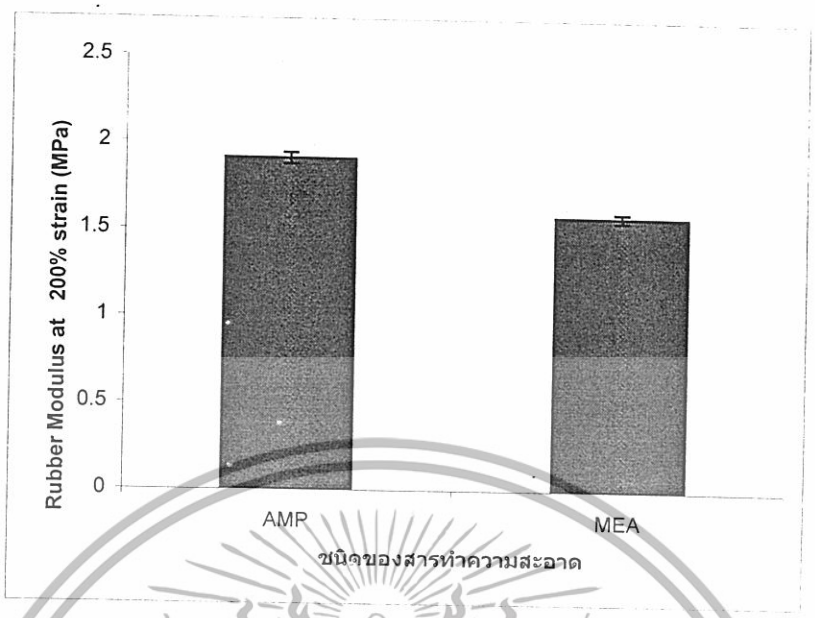
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด

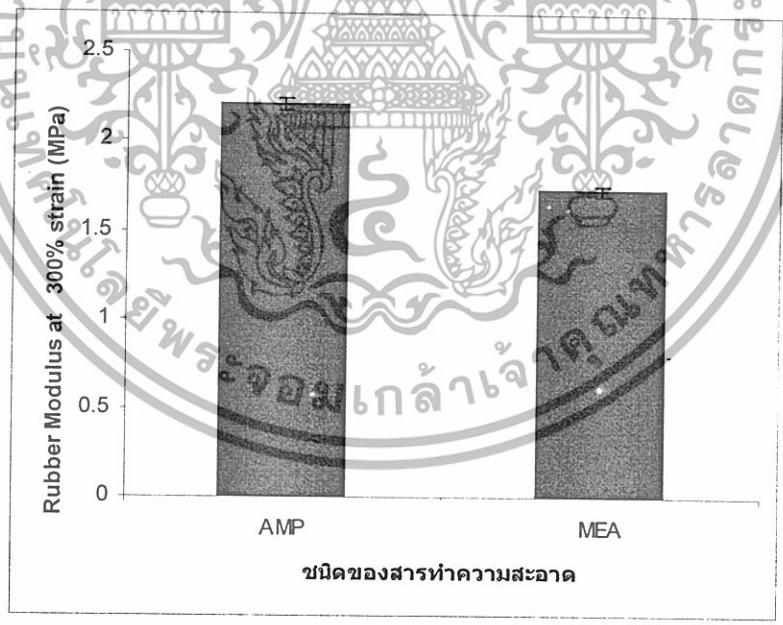


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด

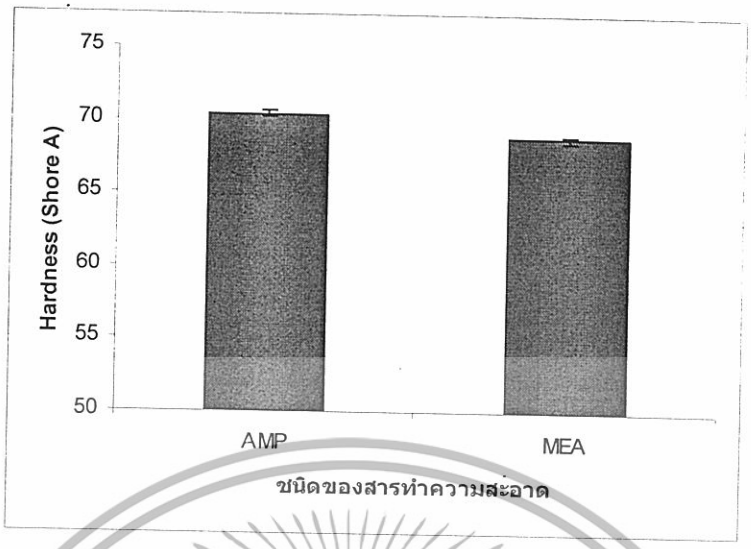
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 200% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 300% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด

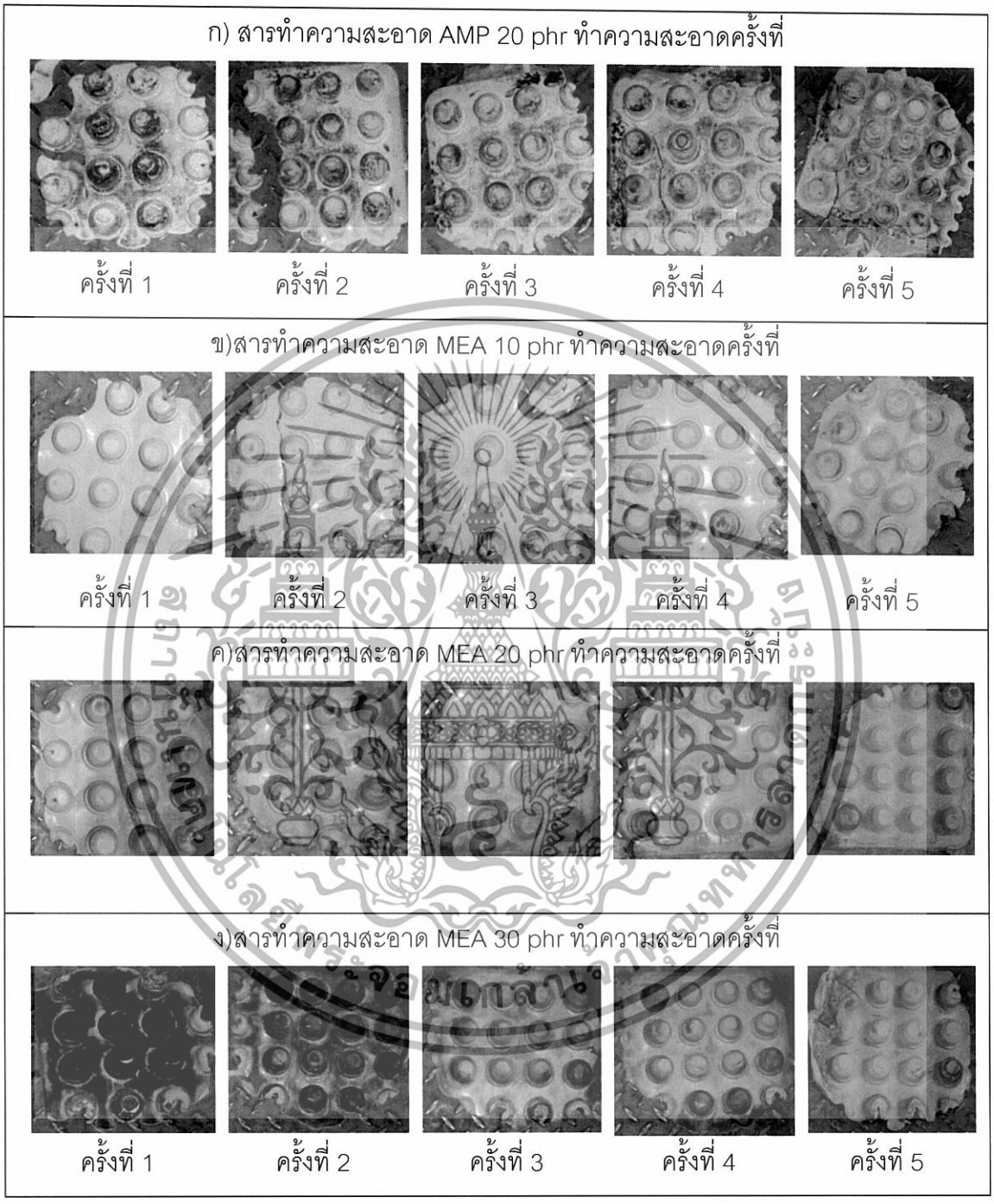


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางล้างแม่แบบกับชนิดของสารทำความสะอาด

3) ประสิทธิภาพการทำความสะอาด

จากการทดสอบการทำความสะอาดกับแม่แบบจริง (รูปที่ 4.17 ก และ ค) เมื่อสังเกตด้วยสายตาจะพบว่ายางล้างแม่แบบที่ใช้ AMP และ MEA จะมีคราบสกปรกติดออกมาใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถยืนยันได้จาผลการวัดสี ดังรูป 4.18 และ 4.19 จะเห็นได้ว่าค่า ΔE^* ในการล้างแม่แบบทั้ง 5 ครั้ง ของยางล้างแม่แบบทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในด้านการทำความสะอาดจึงสามารถนำ MEA มาใช้แทน AMP ได้

สำหรับสีของยางภายหลังการใช้งาน พบว่ายางล้างแม่แบบที่มี MEA เป็นสารทำความสะอาดจะมีความเหลืองมากกว่ายางล้างแม่แบบที่มี AMP เป็นสารทำความสะอาด โดยเป็นผลมาจากสีเหลืองอ่อน ๆ โดยธรรมชาติของ MEA ซึ่งเป็นสารจำพวกเอมีน ไม่ได้เกิดจากการเสียสภาพของยางแต่อย่างใด พิสูจน์ได้จากการนำยางที่ผ่านการใช้งานมาแช่ในเอทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมเป็นเวลานานพอสมควร คราบเหลืองที่เกาะอยู่ที่ผิวชิ้นงานจะละลายออกมา ทำให้ได้ยางที่มีสีขาวและสารละลายสีเหลือง ยิ่งมีปริมาณ MEA ในสูตรยางมาก ภายหลังใช้งานยางก็จะมีสีเหลืองมากตาม

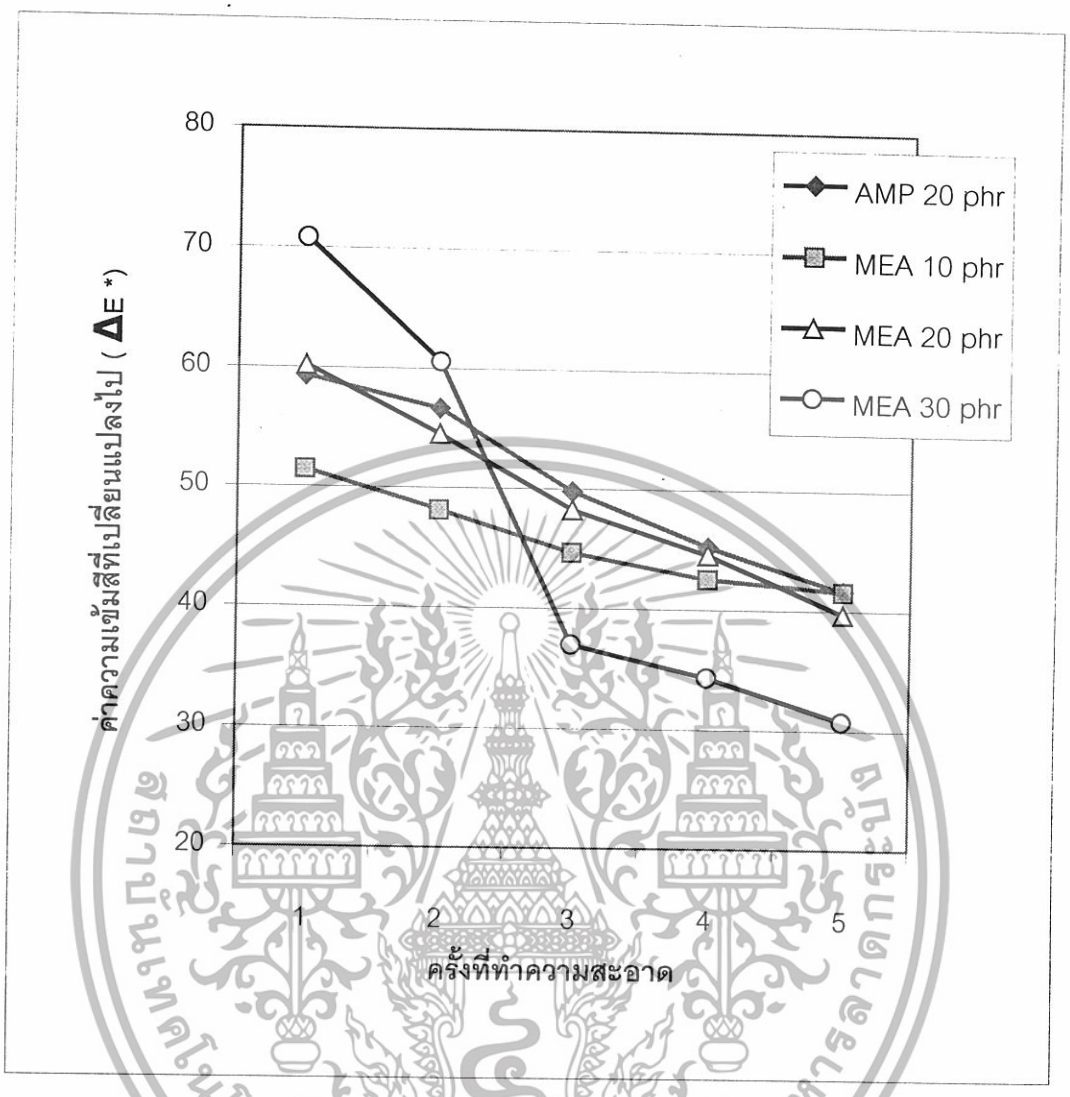


รูปที่ 4.17 รูปถ่ายจากการล้างแม่แบบจริง เปรียบเทียบยางล้างแม่แบบที่ใช้สารทำความสะอาด ก) AMP 20 phr ข) MEA 10 ค) MEA 20 และ ง) MEA30 phr ผ่านการทำความสะอาดเป็นเวลา 5 นาที ที่ 175 °C

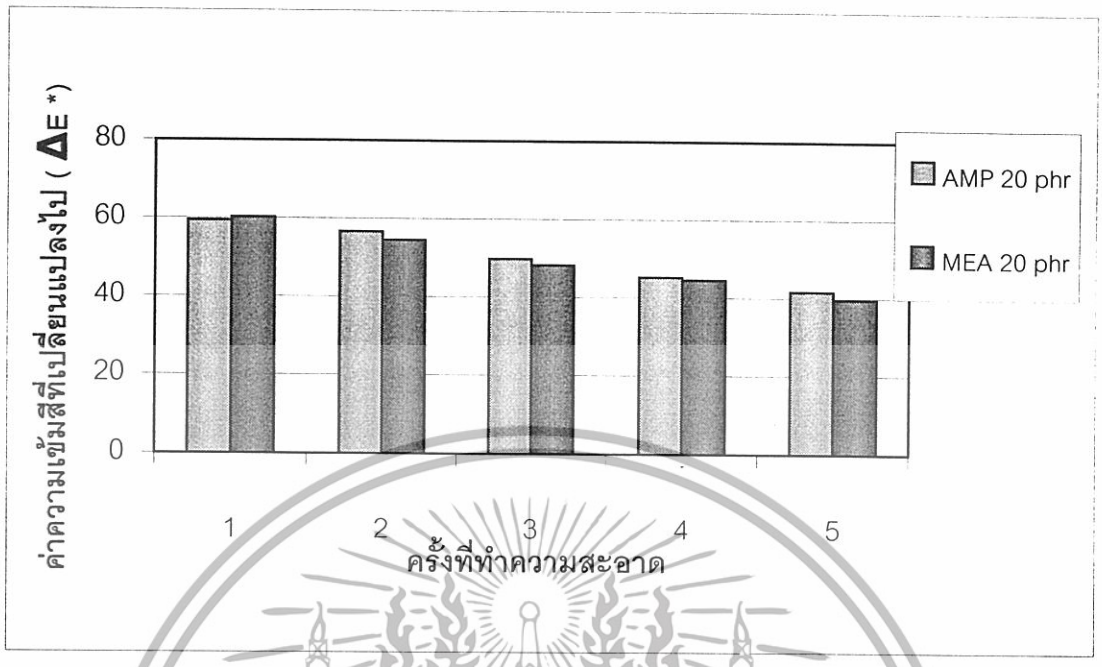
ตารางที่ 4.3 ค่าการวัดสีที่ D65/10° ของยางล้างแม่แบบที่ผ่านการทำความสะอาด

สูตร	ครั้งที่	L*	a*	b*	Δ E*
AMP 20 phr	1	28.14	2.13	11.81	59.35
	2	30.61	2.36	14.45	56.64
	3	37.55	2.40	13.95	49.78
	4	41.97	2.03	15.28	45.25
	5	45.62	2.20	15.46	41.61
	Blank	87.05	0.33	18.84	
MEA 10 phr	1	34.65	1.73	16.83	51.46
	2	38.02	3.69	18.14	48.13
	3	41.86	1.54	13.08	44.65
	4	43.63	1.80	16.18	42.55
	5	44.56	1.65	16.46	41.59
	Blank	86.02	0.42	19.57	
MEA 20 phr	1	23.37	2.53	11.74	60.23
	2	27.98	2.35	17.06	54.52
	3	34.57	2.44	16.33	48.24
	4	38.15	2.69	17.05	44.59
	5	43.38	1.98	16.49	39.72
	Blank	81.41	3.98	17.78	
MEA 30 phr	1	9.37	2.78	5.93	70.83
	2	17.25	7.30	14.69	60.60
	3	39.74	7.30	22.06	37.00
	4	42.32	4.89	22.42	34.35
	5	46.86	3.25	20.07	30.78
	Blank	75.59	5.14	30.95	

<u>หมายเหตุ</u> Blank คือการทำความสะอาดแม่แบบที่สะอาด เพื่อนำค่าความเข้มสีที่ได้มาหักออกจากค่าที่ได้จากการทำความสะอาดจริง



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไป (Δ E*) กับครั้งที่ทำความสะอาด



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไป (Δ E*) กับครั้งที่ทำความสะอาด เปรียบเทียบระหว่างสูตรยางที่ใช้ AMP กับ MEA เป็นสารทำความสะอาด

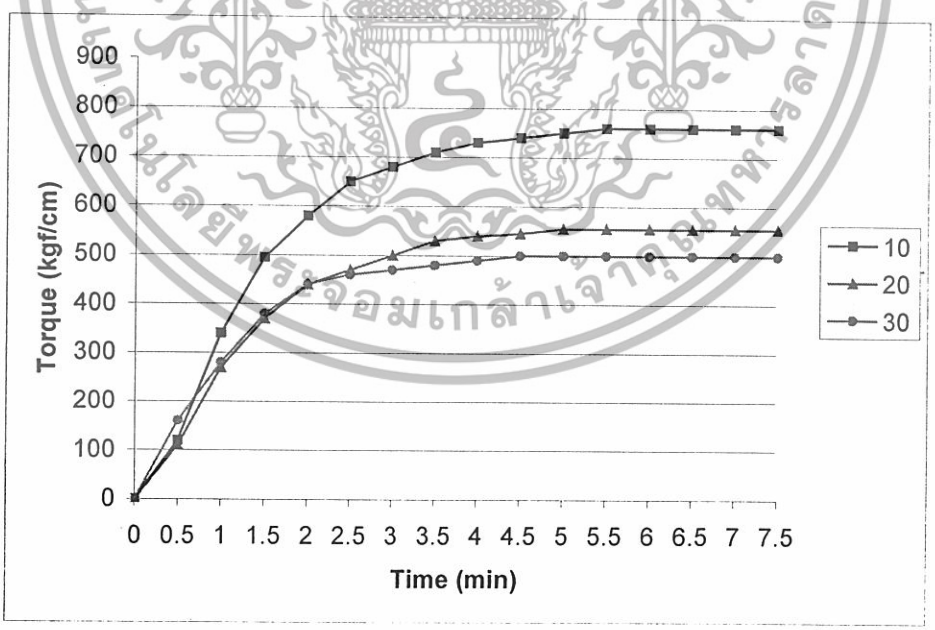
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.2 การศึกษาปริมาณของสารทำความสะอาด

การศึกษาถึงปริมาณของสารทำความสะอาดมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล สมบัติด้านการทำความสะอาด และต้นทุนการผลิต จากการศึกษาชนิดของสารทำความสะอาด แม้ว่า MEA จะทำให้ยางล้างแม่แบบมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางล้างแม่แบบที่ใช้ AMP เป็นสารทำความสะอาด แต่ MEA มีต้นทุนถูกกว่า ด้านประสิทธิภาพการทำความสะอาดสามารถใช้แทน AMP ได้ การทดลองนี้จึงใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาด โดยมีข้อจำกัดคือสามารถผสม MEA ลงในเนื้อยางได้สูงสุด 30 phr ด้วยเหตุนี้จึงปรับเปลี่ยนปริมาณของ MEA เป็น 10 20 และ 30 phr ตามลำดับ

1) ลักษณะการเชื่อมโยง

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าความเป็นเบสของ MEA อาจช่วยป้องกันการแตกตัวแบบไม่เกิดอนุมูลอิสระของเปอร์ออกไซด์ หรือความเป็นเบสของ MEA รบกวนการสลายตัวของเปอร์ออกไซด์ ทำให้เปอร์ออกไซด์สลายตัวได้เร็วขึ้น ดังนั้นถ้าปริมาณ MEA มาก จะกระจายในเนื้อยางได้อย่างทั่วถึงยิ่งขึ้น การแตกตัวของเปอร์ออกไซด์จึงเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่า จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.20 จึงเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณสารทำความสะอาด MEA จะทำให้ยางเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น



รูปที่ 4.20 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรที่อุณหภูมิ 175 °C เมื่อใช้ปริมาณสารทำความสะอาด MEA ต่างกัน

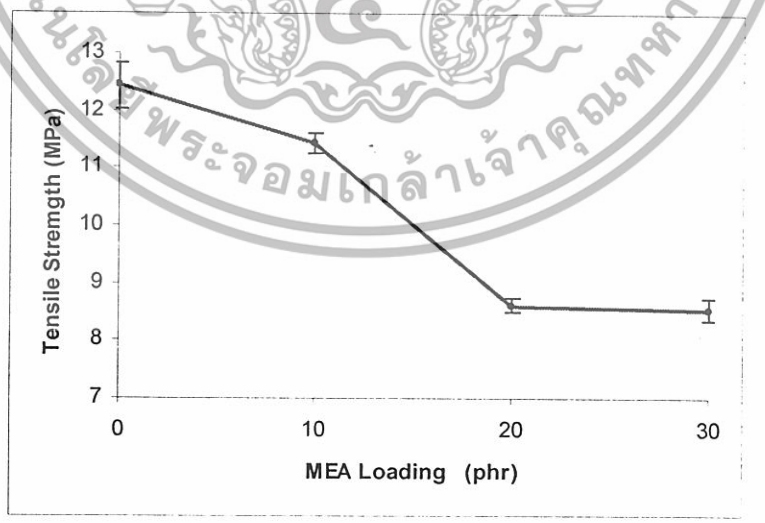
ตารางที่ 4.4 เวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้ปริมาณสารทำความสะอาด MEA ต่างกัน

ปริมาณสารทำความสะอาด MEA (phr)	Cure time; t_{90} (min)
10	3.28
20	3.00
30	2.40

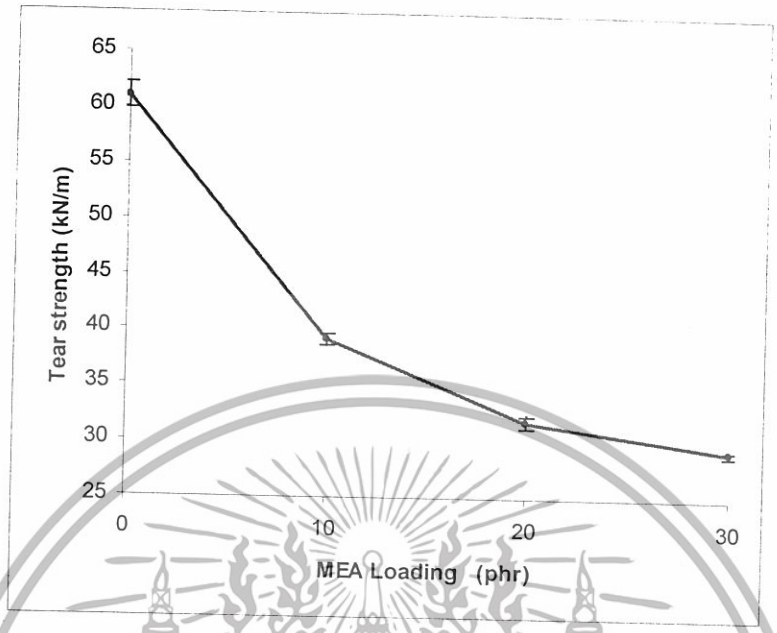
2) **สมบัติเชิงกล**

เนื่องจากสารทำความสะอาดที่ใช้เป็นสารที่มีขนาดเล็กสามารถแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ได้ง่าย ทำหน้าที่คล้ายพลาสติไซเซอร์ ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนไหว ยืดหยุ่น และเปลี่ยนโครงรูป (Conformation) ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารทำความสะอาดมากขึ้น จะทำให้สมบัติเชิงกลของยางล้างแม่แบบด้อยลง ดังรูป 4.21 – 4.27 ยางจะมีความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัสของยางและความแข็งกดลดลง แต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น

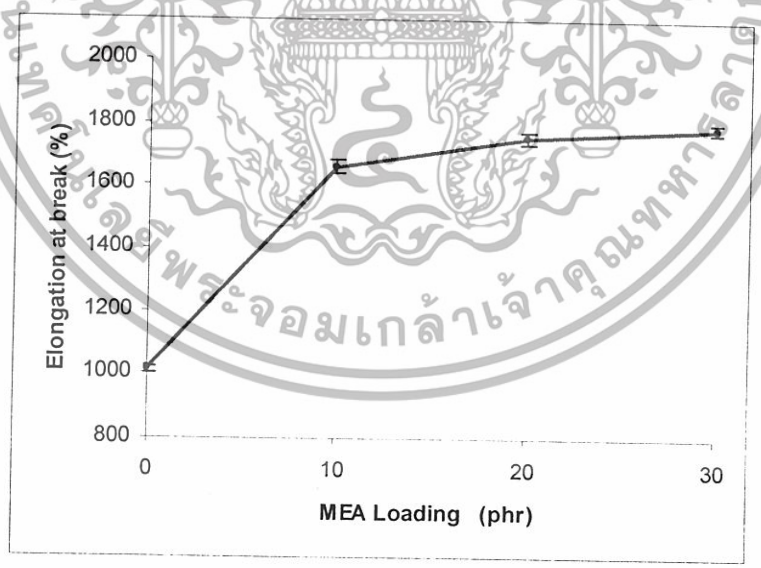
จากรูป 4.21 – 4.27 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารทำความสะอาด ในช่วงปริมาณที่น้อย (จาก 0 – 20 phr) สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงอย่างมาก แต่ในช่วงปริมาณที่มากขึ้น (จาก 20 – 30 phr) สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงวิเคราะห์แนวโน้มได้ว่ายิ่งมีการเพิ่มปริมาณ MEA มากขึ้น ผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลจะยิ่งลดลง



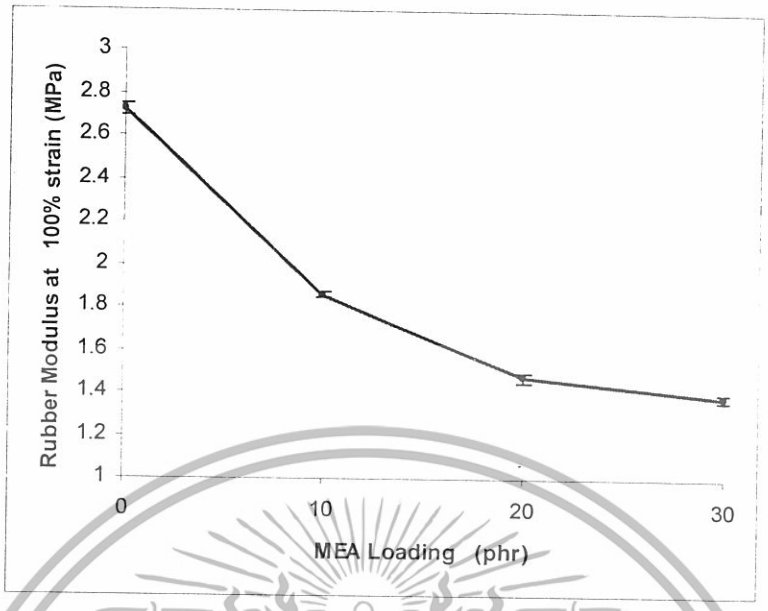
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึงของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA



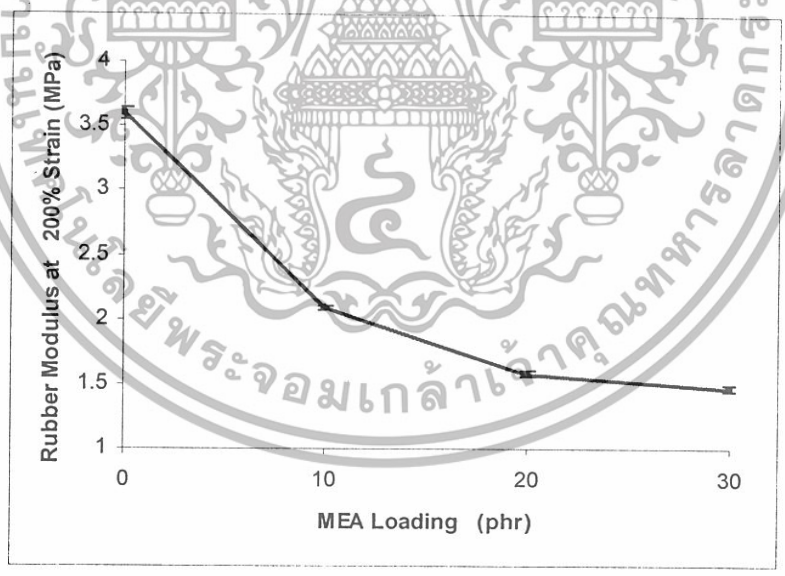
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA



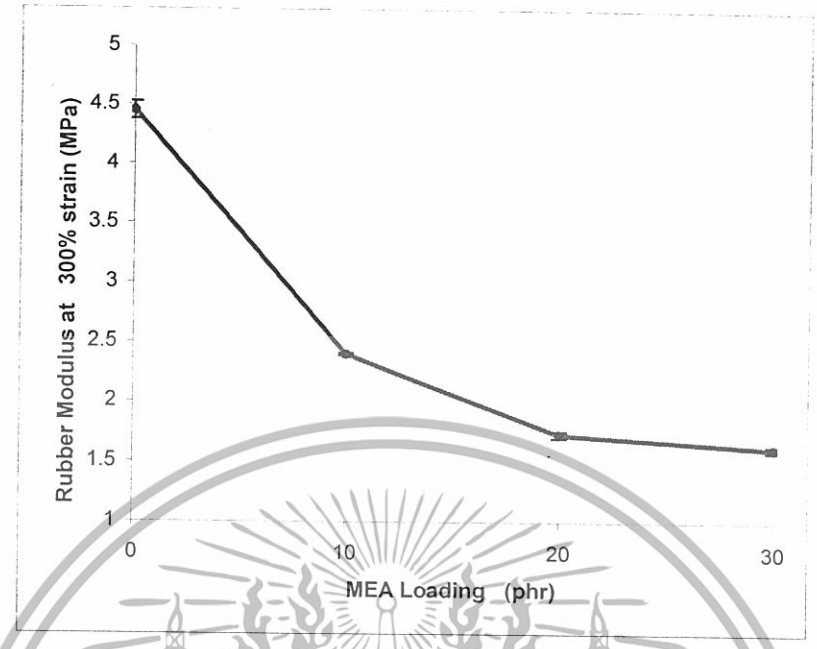
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA



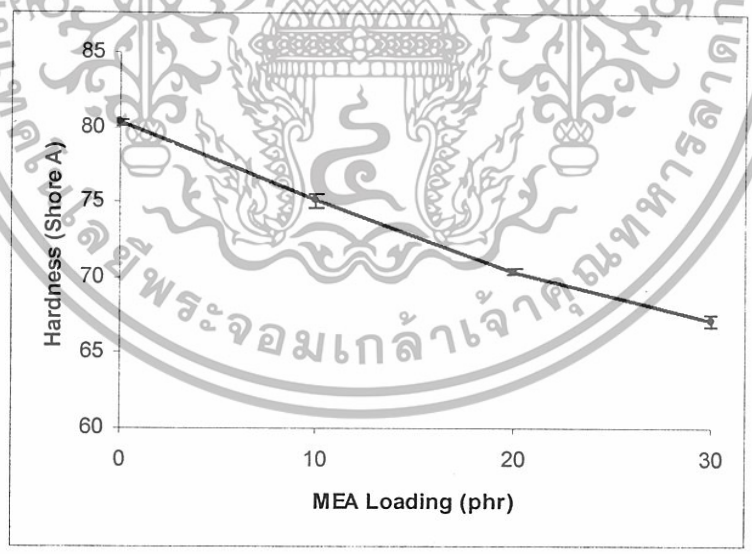
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 100% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 200% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า 300% มอดุลัสของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของยางล้างแม่แบบกับปริมาณของสารทำความสะอาด MEA

3) ประสิทธิภาพการทำความสะอาด

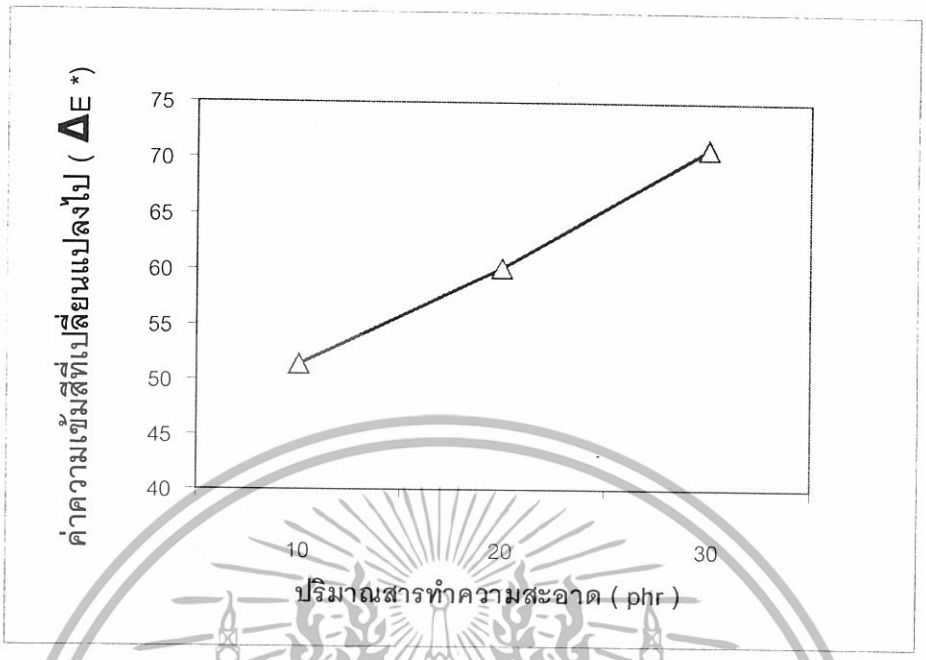
จากการทำความสะอาดแม่แบบด้วยยางล้างแม่แบบที่มีปริมาณสารทำความสะอาด MEA 10 , 20 และ 30 phr (รูปที่ 4.17 ข – ง) โดยใช้อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 5 นาที พบว่ายางล้างแม่แบบที่ใช้ปริมาณ MEA 30 phr สามารถทำความสะอาดได้มากที่สุด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากคราบสกปรกที่ติดออกมากับยาง อีกทั้งคราบสกปรกที่ติดมากับยางจากการทำความสะอาดยางครั้งต่อ ๆ มามีน้อยลง รองลงมาคือยางล้างแม่แบบที่ใช้ปริมาณสารทำความสะอาด MEA 20 phr ส่วนยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 10 phr ทำความสะอาดได้น้อยที่สุด

เมื่อนำยางล้างแม่แบบที่ผ่านการใช้งานมาวัดสีเพื่อหาปริมาณสารทำความสะอาด MEA ที่ให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงสุด พบว่าการเพิ่มปริมาณ MEA จะทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดของยางล้างแม่แบบสูงขึ้น สังเกตได้จาก

- เมื่อให้ปริมาณคราบสกปรกที่ติดกับแม่แบบก่อนล้างมีมากเกินพอ จะได้ว่าปริมาณคราบสกปรกที่ติดออกมากับยางล้างแม่แบบในการล้างครั้งแรกคือปริมาณคราบสกปรกสูงสุดที่ยางล้างแม่แบบสามารถทำความสะอาดได้ต่อครั้ง จากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มปริมาณ MEA ค่า ΔE^* ในการล้างครั้งแรกจะเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.28 แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารทำความสะอาดทำให้ยางสามารถดูดคราบสกปรกออกมาได้มากขึ้น ยางจึงมีสีที่เข้มขึ้น

- ยางล้างแม่แบบที่มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดดี ต้องสามารถขจัดคราบสกปรกต่อครั้งได้มาก และใช้การล้างน้อยครั้ง ดังนั้นเมื่อนำผลค่าการวัดสีทั้งหมดมาเปรียบเทียบสมบัติด้านการทำความสะอาด ดังรูปที่ 4.18 ยางล้างแม่แบบที่มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีจะมีค่า ΔE^* สูงในการล้างครั้งแรก ๆ และค่า ΔE^* ต่ำในครั้งหลัง ๆ ความแตกต่างระหว่างช่วง ΔE^* สูง กับช่วง ΔE^* ต่ำ มีมาก กราฟจึงมีความชันมาก จากผลการทดลองพบว่า การใช้ MEA ปริมาณ 30 phr จะมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงที่สุด เนื่องจากมีค่า ΔE^* สูงในการล้างครั้งแรกๆ (ครั้งที่ 1 และ 2) และค่า ΔE^* น้อยในครั้งหลังๆ (ครั้งที่ 3,4 และ 5) กราฟมีความชันมาก ซึ่งหมายถึงสามารถดูดคราบสกปรกออกมาได้มากที่สุด และใช้จำนวนครั้งในการล้างน้อยที่สุด ในขณะที่การใช้ AMP 20 phr และ MEA 10 phr กราฟมีความชันน้อยกว่า ความแตกต่างของสีในแต่ละครั้งก็น้อยกว่า จึงมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดต่ำกว่า

แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสารทำความสะอาดมากที่สุดที่ผสมลงในยางได้คือ 30 phr ดังนั้นปริมาณ MEA ที่ให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงสุดจึงเป็น 30 phr

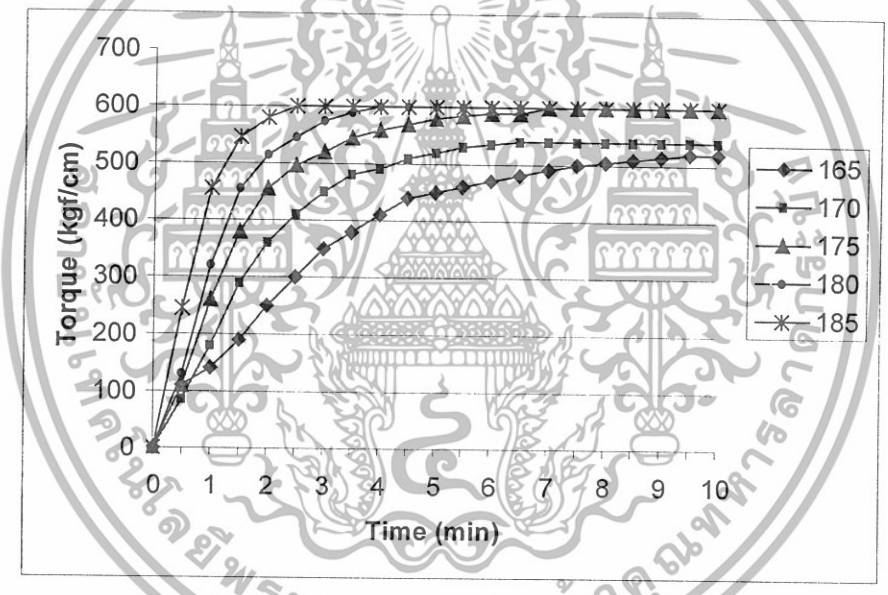


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงไป (ΔE^*) กับปริมาณสารทำความสะอาด สำหรับการล้างครั้งแรก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4.4 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูป

การศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปจะทดสอบกับสูตรยางที่เหมาะสมกับการล้างแม่แบบที่สุดคือ สูตรที่มียาง EPDM Vistalon® 7001 และ MEA 30 phr เป็นส่วนประกอบ ศึกษาที่อุณหภูมิต่างๆกัน คือ 165 170 175 180 และ 185 °C พบว่า ที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปยางล้างแม่แบบที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิเชื่อมโยงต่ำที่สุดที่สูงกว่าจุดเดือดของสารทำความสะอาด และเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่ให้ค่าแรงบิด (Torque) สูงสุด ซึ่งจะทำให้ใช้พลังงานในการขึ้นรูปน้อยแต่เชื่อมโยงได้มีประสิทธิภาพและสารทำความสะอาดสามารถระเหยได้ แต่อย่างไรก็ตามก็สามารถขึ้นรูปที่อุณหภูมิอื่นได้เช่นกันขึ้นช่วงอุณอุณหภูมิที่ใช้งานของยางล้างแม่แบบและอุณหภูมิของแม่แบบก่อนการทำความสะอาด



รูปที่ 4.29 กราฟการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเมื่อใช้ยาง EPDM Vistalon® 7001 และสารทำความสะอาด MEA 30 phr เป็นส่วนประกอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.5 การศึกษาช่วงอุณหภูมิใช้งานของยางล้างแม่แบบ

การศึกษาช่วงการใช้งานมีประโยชน์มากเนื่องจากการเชื่อมโยงยางทำได้ที่หลายอุณหภูมิขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของยาง ระบบการเชื่อมโยง เป็นต้น การใช้งานยางล้างแม่แบบจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นรูปขณะผลิตแล้วพยายามล้างแม่แบบโดยให้มีการปรับอุณหภูมิของเครื่องจักรให้น้อยที่สุด เพราะการปรับอุณหภูมิเครื่องจักรเพียง 5 ^{0}C อาจต้องใช้เวลารอหลายนาที และสิ้นเปลืองพลังงานเป็นจำนวนมาก

การใช้งานยางล้างแม่แบบต้องมี 2 องค์ประกอบ คือ ยางต้องเกิดการเชื่อมโยงและสารทำความสะอาดต้องทำงานได้ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตรที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยงและขึ้นรูป พบว่าสารทำความสะอาด MEA มีช่วงของการระเหยอยู่ที่ประมาณ 120 –200 ^{0}C (ดูกราฟ TGA ในภาคผนวกประกอบ) จึงถือได้ว่าช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่สารทำความสะอาดสามารถทำงานได้ ประกอบกับการเชื่อมโยงยางด้วย DCP สามารถทำได้ในช่วง 150 – 230 ^{0}C ดังนั้นช่วงอุณหภูมิที่สามารถใช้งานยางล้างแม่แบบได้จึงอยู่ที่ 150 – 200 ^{0}C อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงประกอบการใช้งานอีกประการคือการลดอุณหภูมิ จะส่งผลให้ใช้เวลาในการขึ้นรูปนานขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ใช้เวลาขึ้นรูปน้อยลง อันเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงและอัตราการระเหยของสารทำความสะอาด

4.6 ปริมาณสารทำความสะอาดที่เหลืออยู่ภายหลังการทำความสะอาด

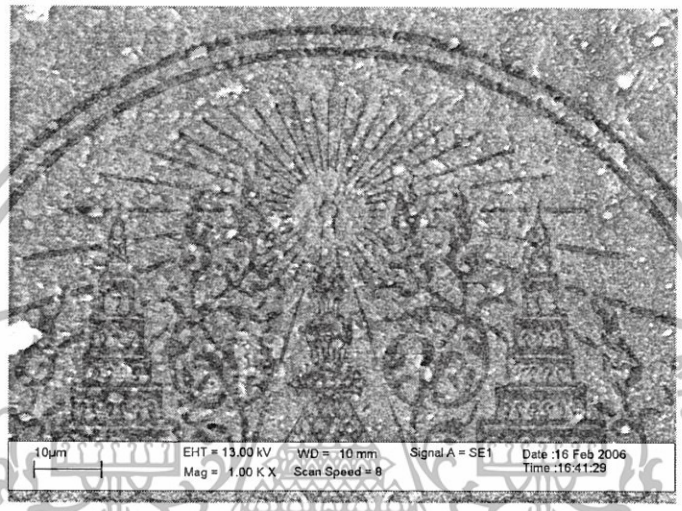
การศึกษาปริมาณสารทำความสะอาดที่เหลืออยู่ในยางล้างแม่แบบที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะช่วยทำให้ทราบว่าที่สภาวะทดลองสามารถใช้สารทำความสะอาดได้มีประสิทธิภาพเพียงใด เพราะหากยังคงมีสารทำความสะอาดเหลืออยู่ แสดงว่ามีส่วนที่ยังไม่ทำงานเหลืออยู่ จึงเกิดความสูญเปล่า นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถปรับปรุงสภาวะการใช้งานได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตรที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยงและขึ้นรูป พบว่าอุณหภูมิระเหยของสารทำความสะอาดอยู่ในช่วง 120 –200 ^{0}C เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับยางล้างแม่แบบซึ่งผ่านการใช้งานที่ 175 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที แล้วในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน จะเห็นได้ว่ายางล้างแม่แบบที่ใช้งานแล้วยังคงมีการสูญเสียมวลสาร แสดงว่ายังคงมีสารทำความสะอาดที่ยังไม่ทำงานเหลืออยู่ ดังนั้นจึงควรเพิ่มเวลาการขึ้นรูปที่ 175 ^{0}C ให้นานกว่า 5 นาที

จากกราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด หลังจากผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 175 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที (ภาคผนวก ง) จะเห็นได้ว่ามีมวลสาร 3.75 % ที่สูญเสียไปในช่วง 120 –200 ^{0}C เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณสารทำความสะอาดที่เหลืออยู่จะพบว่า ในยางล้างแม่แบบที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีปริมาณ MEA เหลืออยู่ 7.4 phr หรือคิดเป็น 24.7 %

4.7 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่แบบที่เตรียมได้

ผลของการศึกษาสัณฐานวิทยา จากยางล้างแม่แบบที่ทำการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อดูการกระจายตัวของสารตัวเติม โดยใช้เทคนิค SEM ดังรูปที่ 2.32 พบว่ายางล้างแม่แบบมีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ แสดงว่าสภาวะของการผสมมีความเหมาะสม สามารถกระจายส่วนผสมได้อย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.30 สัณฐานวิทยาของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 20 phr เป็นสารทำความสะอาด ทำการแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า

4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้างแม่แบบ

การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้างแม่แบบนี้ จะวิเคราะห์ 5 สูตร คือ ยางล้างแม่แบบสูตรของงานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบในงานอุตสาหกรรม [1] (ตารางที่ 4.5) กับยางล้างแม่แบบสูตรที่มีปริมาณ AMP 20 phr ยางล้างแม่แบบสูตรที่มีปริมาณ MEA 10 20 และ 30 phr (ตารางที่ 4.6) จากการวิเคราะห์มีข้อสังเกตดังนี้

- ราคาของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาดมีราคาต้นทุนต่ำกว่าที่ใช้ AMP เป็นสารทำความสะอาดถึง 3.4 เท่า

- การเพิ่มปริมาณ MEA ทุก 10 phr จะทำให้ต้นทุนสูงขึ้นประมาณ 3 บาท/กก. ซึ่งถือว่าคุ้มค่าเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.5 ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยางล้างแม่แบบสูตรในงานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบในงานอุตสาหกรรม [1]

สารเคมี	phr	ราคาวัตถุดิบ/กก. (บาท)	ราคาสูตรยาง(บาท)
EPDM Mitsui EPT® 3045	100	115	60.53
ZnO (RA)	5	34	0.18
Hisil® 255 G	50	29	7.63
DCP 40 %	7	150	5.53
Oil P-150	5	37.15	0.98
Wingstay® L	1	134	1.18
SR-350	3	380	6.00
TiO_2	2	95	1.00
Stearic acid	1	28	0.15
AMP	20	2312	243.37
รวม			320.55

หมายเหตุ - ราคาขาย ณ เดือนกุมภาพันธ์ 2549

- ราคานี้ไม่รวมค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเครื่องจักร

- เมื่อเทียบกับสูตรยางล้างแม่แบบ จากงานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบในงานอุตสาหกรรม [1] พบว่ายางล้างแม่แบบสูตรที่ใช้ MEA 30 phr ซึ่งมีประสิทธิภาพดีที่สุดมีต้นทุนต่ำกว่าถึง 73.20 %

ด้วยเหตุนี้สูตรยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด จึงมีความเหมาะสมที่สุดในด้านต้นทุนเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้

ตารางที่ 4.6 ต้นทุนของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตยางล้างแม่แบบ ต่อ 1 กิโลกรัม สำหรับสูตรที่ใช้ AMP 20 phr กับสูตรที่ใช้ MEA 10 20 และ 30 phr

สารเคมี	phr	ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท/กก.)	ต้นทุนสูตร (บาท/กก.)			
			AMP 20 phr	MEA 10 phr	MEA 20 phr	MEA 30 phr
EPDM Vistalon® 7001	100	98.5	49.00	49.35	49.00	44.85
ZnO (RA)	5	34	0.81	0.85	0.81	0.77
Hisil® 255 G	60	29	8.30	8.72	8.30	7.92
DCP 98 %	3	150	2.14	2.25	2.14	2.05
Oil P-150	10	37.15	1.77	1.86	1.77	1.69
TMQ	1	134	0.64	0.67	0.64	0.61
SR-350	3	380	5.44	5.71	5.44	5.19
TiO_2	2	95	0.90	0.95	0.90	0.87
PEG	3.6	115	1.97	2.07	1.97	1.89
Stearic acid	2	28	0.27	0.28	0.27	0.26
AMP	20	2312	220.61	-	-	-
MEA	10-30	145	-	7.26	13.84	19.81
รวม			289.85	80.01	83.08	85.91

หมายเหตุ - ราคาขาย ณ เดือนกุมภาพันธ์ 2549

- ราคานี้ไม่รวมค่าแรง ค่าไฟฟ้า และค่าเครื่องจักร

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

- MEA (Monoethanolamine) มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดใกล้เคียงกับ AMP (2-Amino-2-methyl-1-propanol) ซึ่งถูกใช้เป็นสารทำความสะอาดเดิม แม้ว่าการใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาดจะทำให้สมบัติเชิงกลที่สำคัญต่อการนำยางออกจากแม่แบบ ได้แก่ ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ AMP ในปริมาณที่เท่ากัน แต่สมบัติเชิงกลที่ได้ยังคงเพียงพอต่อการนำยางออกจากแม่แบบ MEA จึงสามารถทำหน้าที่เป็นสารทำความสะอาดแทน AMP ได้

- การเพิ่มปริมาณสารทำความสะอาดในสูตรยางมีข้อดีคือ จะทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงขึ้น และจำนวนครั้งที่ใช้ทำความสะอาดลดลง แต่มีข้อเสียคือทำให้สมบัติเชิงกลที่สำคัญต่อการนำยางออกจากแม่แบบลดลงและยากต่อการผสมเพราะไม่สามารถใส่ของเหลวจำนวนมากในยางได้ จุดเหมาะสมสำหรับปริมาณ MEA ในสูตรยางจึงอยู่ที่ 30 phr เพราะเป็นปริมาณสูงสุดที่สามารถผสมลงในยางได้ มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงสุดเมื่อเทียบกับการใส่ในปริมาณที่น้อยกว่า และสมบัติเชิงกลยังคงเพียงพอต่อการนำออกจากแม่แบบ

- สำหรับยางที่ใช้ในสูตรยางคอมปาวด์ ถ้าเลือกใช้เกรดที่มีปริมาณเอทิลีน ในโครงสร้างมากจะมีข้อดีคือให้ความแข็งแรงสูง ทำให้ดึงออกจากแม่แบบได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือผลิตได้ยาก เพราะยางจะแข็งไหลเปลี่ยนรูปยากจึงต้องใช้เวลาผสมนาน เมื่อพิจารณาพบว่าปัญหาด้านการผลิตมีผลกระทบน้อยกว่า ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน และลดลงได้ด้วยการปรับสภาวะการผลิตให้เหมาะสม จึงเลือกใช้ยาง EPDM Vistalon® 7001 ซึ่งมีปริมาณ Ethylene ในโครงสร้างมากที่สุด (73 wt%)

- ผลของการปรับปรุงสูตรยางล้างแม่แบบ จากงานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบในงานอุตสาหกรรม [1] เป็นยางล้างแม่แบบสูตรที่ใช้ MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด ทำให้ต้นทุนลดลงจาก 320.55 เป็น 85.91 บาท/กิโลกรัม จึงถือเป็นการปรับปรุงสูตรให้เหมาะสมกับการผลิตเชิงพาณิชย์ยิ่งขึ้น

ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปสูตรยางล้างแม่แบบที่เหมาะสมและสมบัติของยางสูตรดังกล่าวได้ดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 สรุปสูตรและต้นทุนของยางล้างแม่แบบที่เหมาะสม

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	ต้นทุน (บาท/กิโลกรัม)
ยาง EPDM Vistalon® 7001	100	44.85
ZnO (RA)	5	0.77
Steric acid	2	0.26
Silica Hisil® 255 G	60	7.92
DCP 98 %	3	2.05
Oil P-150	10	1.69
TMQ	1	0.61
SR-350	3	5.19
TiO_2	2	0.87
PEG	3.6	1.89
MEA	30	19.81
รวม	219.6	85.91

ตารางที่ 5.2 สรุปสมบัติของสูตรยางล้างแม่แบบที่เหมาะสม

สมบัติ	ค่า	หน่วย
Tensile strength	8.55	MPa
Tear strength	29.24	kN/m
% Elongation at break	1,788	%
Rubber Modulus	-	
- M 100	1.38	MPa
- M 200	1.47	MPa
- M 300	1.62	MPa
Hardness (Shore A)	67.2	-
Cure time (ที่ 175 ^{0}C)	2.40	Min
Mooney viscosity (ML1+4)100^{0}C	134.9	-
ช่วงอุณหภูมิใช้งาน	150 – 200	^{0}C
อุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสม	175	^{0}C

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองมีข้อเสนอแนะซึ่งจะสามารถปรับปรุงสูตรยางล้างแม่แบบให้มีคุณสมบัติดีขึ้น ดังนี้

- การศึกษาโดยใช้เครื่องผสมที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เช่น เครื่องผสมแบบ Internal mixers และปรับปรุงสภาวะการผสม เพื่อเพิ่มปริมาณสารทำความสะอาดที่ใส่ได้สูงสุดในสูตรยาง แล้วเปรียบเทียบความเหมาะสมกับสมบัติเชิงกลที่สูญเสียไป

- การศึกษาเวลาในการขึ้นรูปยางที่เหมาะสม เพื่อลดปริมาณสารทำความสะอาดที่เหลืออยู่ภายหลังการใช้งาน เพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาด

- การศึกษาการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมซิลิกา เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและลดต้นทุน เนื่องจากต้นทุนราคายางมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกวัน

- การศึกษาการนำยางชนิดอื่น เช่น ยางธรรมชาติ มาผสมเพื่อลดปริมาณการใช้ยาง EPDM เนื่องจากปัจจุบันยาง EPDM มักขาดตลาดอยู่เสมอตามสภาวะน้ำมันในตลาดโลก

- การศึกษาอายุการเก็บรักษาของยางล้างแม่แบบซึ่งใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาด และผลของอายุการเก็บรักษาต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด เนื่องจากระหว่างการเก็บรักษา MEA การระเหยออกไปอยู่ตลอดแม้ว่าจะเป็นที่อุณหภูมิห้องก็ตาม อีกทั้งการศึกษาต้องใช้เวลานาน ผู้วิจัยจึงไม่ได้ทำการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

1. ณัฐณิชา เฮงประภากร และ มลสิริ ชีประวัติชัย. **โครงงานพิเศษเรื่องการปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. ขนิษฐา ศรีประทุม และมนต์สุดา บุรารักษ์. 2546. **โครงงานพิเศษเรื่องการศึกษายางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. อิทธิพล แจ้งชัด. 2542. **เทคโนโลยียางยาง**. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
4. พงษ์ธร แซ่อุย. 2547. **ยาง : ชนิด สมบัติและการใช้งาน**. กรุงเทพฯ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
5. พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. **สารเคมีสำหรับยาง**. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
6. Mallinckrodt Baker, Inc. 2004. **2-Amino-2-metyl-1-propanol**. [Online]. Available: http://jtbaker.com/titaniumdioxide.htm
7. Chemical Data Bank. 2005. **2-Amino ethanol**.[Online]. Available: http://www.msds.pcd.go.th/
8. SCORECARD. 2004. **Consumer products**. [Online]. Available: www.scorecard.org/chemical-profiles/
9. MORAKA PTE. LTD. 2004. **Titaniumdioxide Rutile**. [Online]. Available: www.moraka.com/pdfs/MC-A.pdf
10. Botros S.H. 1998. **Thermal Stability of Butyl/EPDM Rubber Blend Vulcanizates**. Polymer degradation and Stability. Vol. 62: 471-477.

11. Poh B.T. and NG C.C. 1998. **Effect of Silane Coupling Agents on the Mooney Scorch Times of Silica filled Natural Rubber Compound.** European Polymer journal. Vol. 34:975-979.

12. UNITED STATES PATENT. 2004. **United States Patent 5563119.** [Online]. Available: www.freepatentsonline.com/5563119.html

ภาคผนวก
กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบ

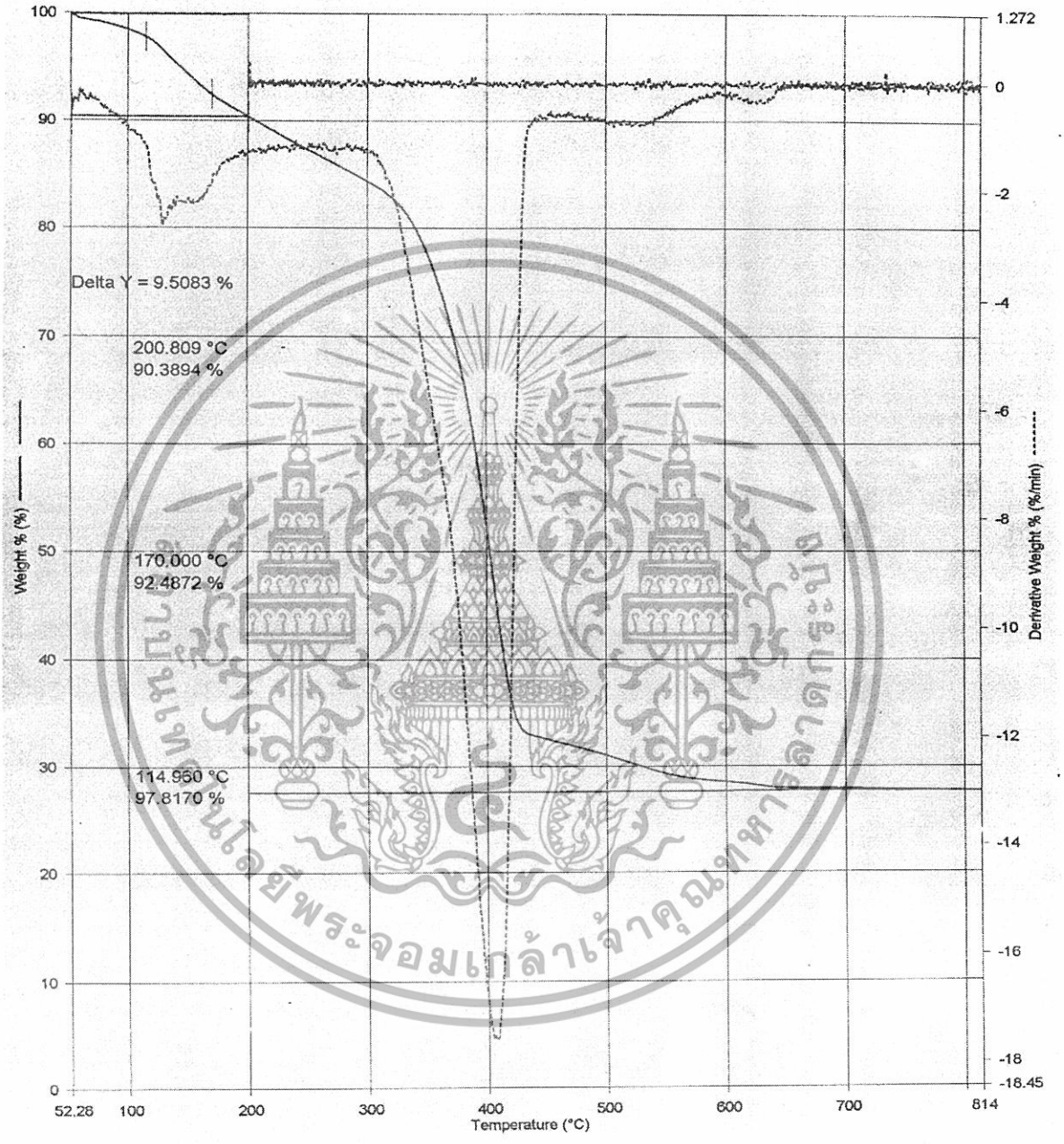
ภาคผนวก ก กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 20 phr เป็นสารทำความสะอาด ก่อนการใช้งาน

ภาคผนวก ข กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 20 phr เป็นสารทำความสะอาด หลังจากผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 175 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที

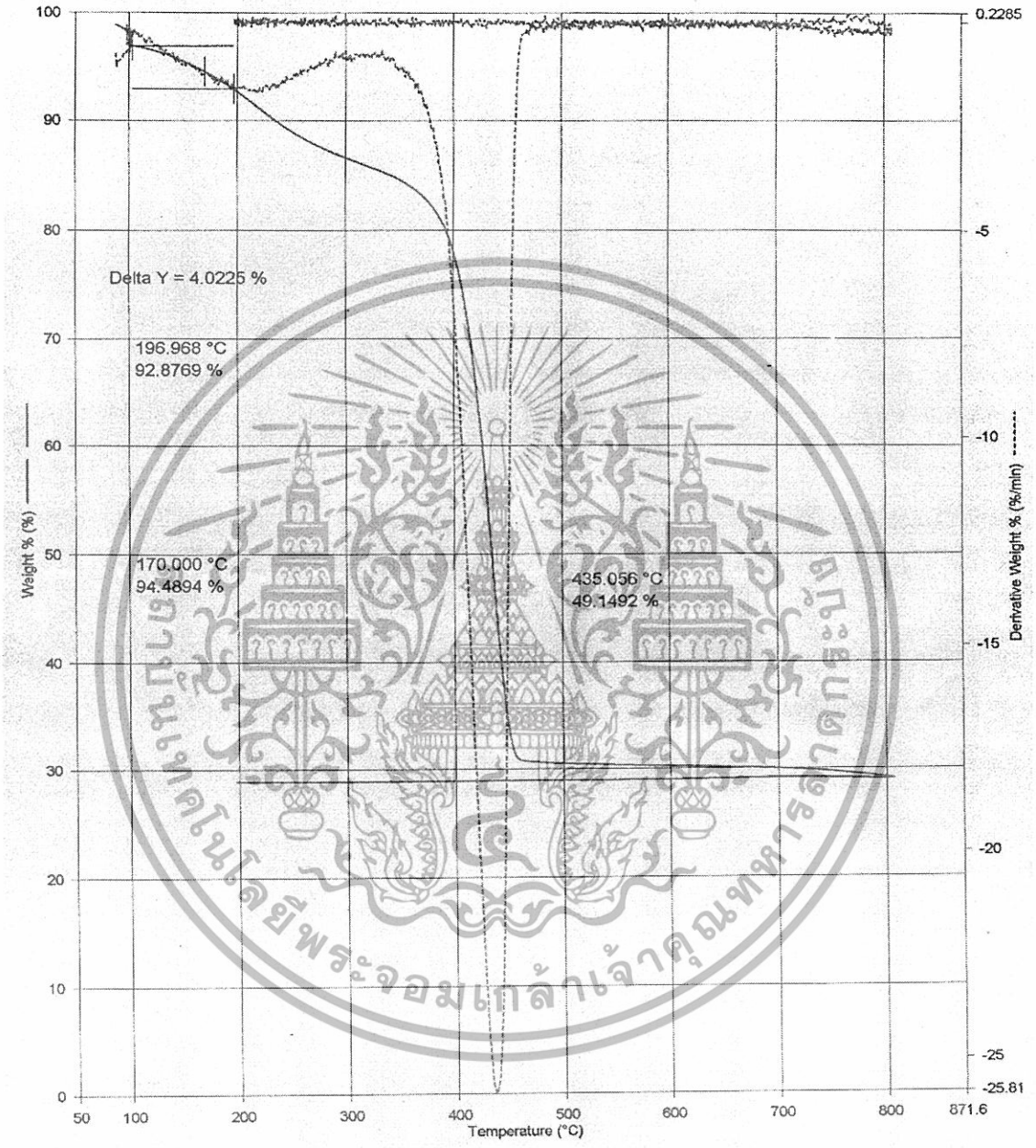
ภาคผนวก ค กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด ก่อนการใช้งาน

ภาคผนวก ง กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด หลังจากผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 175 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที

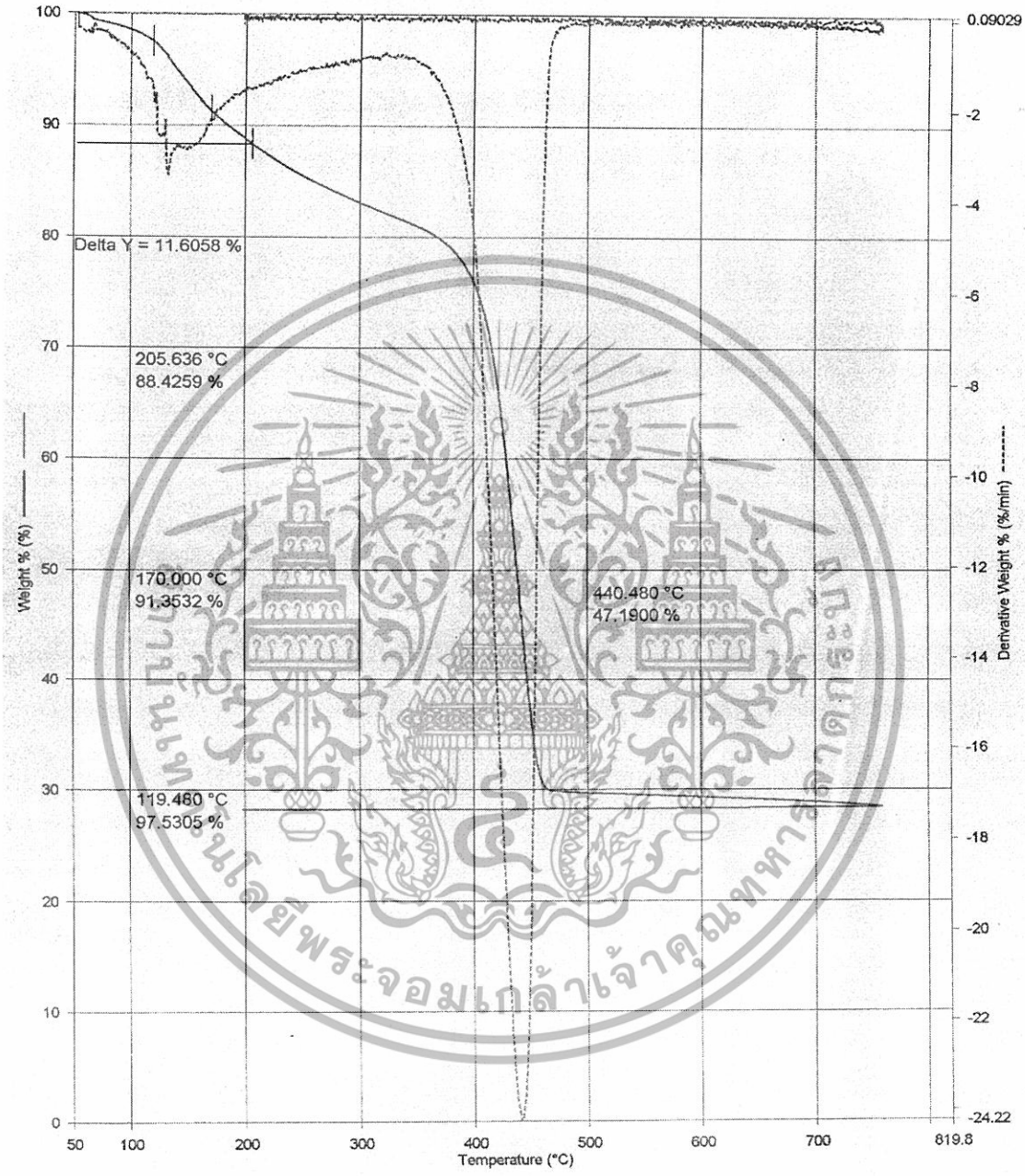
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



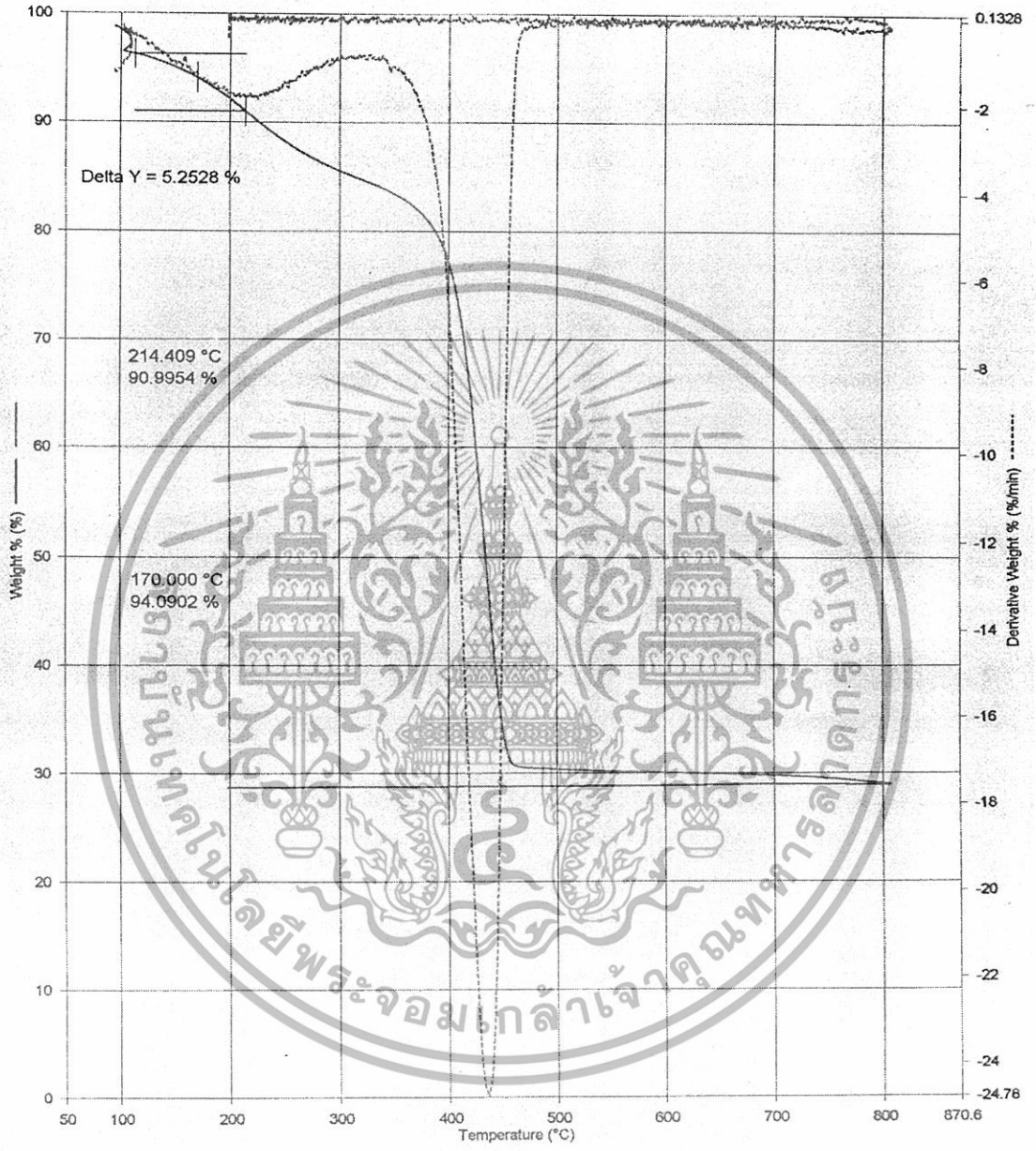
ภาคผนวก ก กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 20 phr เป็นสารทำความสะอาด ก่อนการใช้งาน



ภาคผนวก ข กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 20 phr เป็นสารทำความสะอาด หลังจากผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 175 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที



ภาคผนวก ค กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด ก่อนการใช้งาน



ภาคผนวก ง กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางล้างแม่แบบที่ใช้ MEA 30 phr เป็นสารทำความสะอาด หลังจากผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 175 ^{0}C เป็นเวลา 5 นาที