สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษายางล้างแม่พิมพ์สูตรลดต้นทุน : ผลของชนิดยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม

นางสาววรลักษณ์ สุรัติมงคลวงศ์
นายสมภพ พึ่งฉิม
นายปวริศร์ ทองรอด

วพ.
ว275ก
2550
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 107880
วัน,เดือน,ปี - 8 ส.ค. 2553
b 12213548
i.....

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Low–cost Formula of Mold Cleaning Compound : Types of Rubber, Fillers and Filler Loading

Miss Voraluck Surattimongkolwong
Mr.Somphob Phuengchim
Mr.Pavaris Thongrod

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การศึกษายางล้างแม่พิมพ์สูตรลดต้นทุน : ผลของชนิดยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม

นักศึกษา นางสาววรลักษณ์ สุริติมงคลวงศ์ รหัสนักศึกษา 47050084

นายสมภพ พึ่งฉิม รหัสนักศึกษา 47050095

นายปวริศร์ ทองรอด รหัสนักศึกษา 47050638

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2550

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี	.....
กรรมการ	ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์	.....
กรรมการ	รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด	.....

.....

(ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การศึกษายางล้างแม่พิมพ์สูตรลดต้นทุน : ผลของชนิดยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม

นักศึกษา นางสาววรลักษณ์ สุรัติมงคลวงศ์ รหัสนักศึกษา 47050084

นายสมภพ พึ่งฉิม รหัสนักศึกษา 47050095

นายปวริศร์ ทองรอด รหัสนักศึกษา 47050638

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

ปีการศึกษา 2550

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสูตรยางล้างแม่พิมพ์เพื่อลดต้นทุน โดยแบ่งเป็น 2 ตอน ซึ่งในตอนที่ 1 ได้ศึกษาถึงผลของชนิดยางที่มีต่อสมบัติของยางล้างแม่พิมพ์ โดยจะทำการเปลี่ยนชนิดยางหลักจากยางอีพีดีเอ็มเป็นยางเอสบีอาร์ (Styrene-Butadiene Rubbers, SBR) ส่วนตอนที่ 2 ทำการเปลี่ยนชนิดสารตัวเติมจากซิลิกาเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ โดยผสมในปริมาณรวม 60 phr และศึกษาถึงอัตราส่วนสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับสารตัวเติมชนิดอื่นในอัตราส่วน 100/0, 30/70, 50/50, 70/30 และ 0/100 ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมระบบเปิดแบบสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเทคนิคอัดขึ้นรูป จากการทดลองพบว่ายางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ยางเอสบีอาร์เป็นยางหลักมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่ายางอีพีดีเอ็ม เนื่องจากสูตรยางผสมนี้พัฒนาสำหรับยางอีพีดีเอ็มเท่านั้น สำหรับยางเอสบีอาร์ต้องมีการศึกษาและปรับสูตรยางเพื่อป้องกันการเสียสภาพระหว่างการเชื่อมโยง เมื่อทำการเปลี่ยนชนิดสารตัวเติมจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดอื่น พบว่าสมบัติเชิงกลต่ำกว่าสูตรยางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติม เนื่องจากซิลิกามีประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น เมื่อทำการศึกษาถึงอัตราส่วนสารตัวเติมผสม พบว่าเมื่อลดสัดส่วนซิลิกา จะทำให้สมบัติเชิงกลต่ำลง จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดกับแม่พิมพ์สกปรกในโรงงานยาง พบว่ายางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้สารตัวเติมผสมยังคงมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่ดีใกล้เคียงกับยางล้างแม่พิมพ์ที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเดียว แต่การใช้สารตัวเติมผสม มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่า น่าจะเหมาะที่จะใช้ยางล้างแม่พิมพ์ชนิดนี้กับแม่พิมพ์ที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน เพื่อหลีกเลี่ยงการฉีกขาดขณะดึงยางล้างแม่พิมพ์ ออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study of Low–cost Formula of Mold Cleaning Compound : Types of Rubber, Fillers and Filler Loading
Student	Miss Voraluck Surattimongkolwong
	Mr.Somphob Phuengchim
	Mr.Pavaris Thongrod
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2007
Special Project Adisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud

Abstract

This research work was focused on development of rubber formula in order to lower cost of "mold cleaning compound". Two methods were selected to achieve low – cost compounds, i.e., changing based rubber from EPDM to SBR and changing fillers from silica to $CaCO_3$, clay or pumice. By mixing the filler loading at 60 phr, ratios of silica to other fillers were also studied,i.e. 100/0, 70/30, 50/50, 30/70.and 0/100 The mold cleaning compounds can be prepared by compounding the rubber formula using a two -roll mill and shaping samples by compression molding technique. It was found that mechanical properties of the cleaning compound using SBR based rubber were much worsen than those of the compound using EPDM based rubber. Since the formula has been developed for EPDM only, therefore, SBR formula has to be adjusted to prevent the overcure and need more works to carry out. When the fillers were changed from silica to the others, it was found that the mechanical properties were lower than those of silica filled compound. This can be explained by the better reinforcing effect of silica than the other fillers. When the ratios of silica filler were studied, the mechanical properties were in agree with those ratios. The lower the silica loading, the worsen the mechanical properties. The studied formulas were also tested for mold cleaning efficiency with dirty molds in a rubber factory. It was found that the mixed filler compound had cleaning efficiency as good as the silica filled compound. However, it is recommended to use the mixed filers loaded compounds with less complex mold in order to guarantee removal of the cleaning cleaning compound out of the mold.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ้งชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการตลอดจนให้คำแนะนำโครงการพิเศษนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท เอส เค พอลิเมอร์ จำกัด โดย คุณชยุต สุวรรณพิมลกุล สำหรับการสนับสนุนด้านวัตถุดิบและสารเคมี

ขอขอบคุณ คุณจรูญรัตน์ ธิรักษพันธ์ คุณธวัชชัย ชาติชำนาญ และเจ้าหน้าที่ฝ่ายผลิตของบริษัท เอส เค พอลิเมอร์ จำกัด ทุกท่าน ที่ช่วยประสานงานด้านข้อมูลและช่วยอำนวยความสะดวกในการทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแม่พิมพ์

ขอขอบคุณ คุณปัญญา สุริยะฉาย และห้างหุ้นส่วนจำกัด คลองยาง สำหรับการสนับสนุนด้านวัตถุดิบ(พัมมิซ)

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ Polymer workshop สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้สอนวิธีใช้เครื่องมือ และคอยอำนวยความสะดวกทุกอย่าง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นแรงใจแรงกายที่สำคัญ และให้การสนับสนุนด้านการศึกษามาจนประสบความสำเร็จ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

วรลักษณ์ สุรัติมงคลวงศ์
สมภพ พึ่งฉิม
ปวริศร์ ทองรอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ข

กิตติกรรมประกาศ ค

สารบัญ ง

สารบัญตาราง ฉ

สารบัญรูป ช

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 4

2.1 การทำความสะอาดแม่พิมพ์ 4

2.2 ยางล้างแม่พิมพ์ 6

2.2.1 ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber,EPDM) 6

2.2.2 ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน (Styrene-Butadiene Rubbers, SBR) 9

2.3 สารเติมแต่ง 10

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 25

3.1 แผนการดำเนินงาน 25

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ 26

3.3 วิธีการทดลอง 28

3.3.1 การศึกษาและเปรียบเทียบชนิดของยางหลัก และชนิดของสารตัวเติม 28

3.3.2 การศึกษาผลของสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ 30

3.3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ 32

3.3.4 การทดสอบการทำความสะอาดกับแม่พิมพ์ที่ใช้งานจริง 32

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 33

4.1 ตอนที่ 1 ศึกษาการลดต้นทุนโดยการเปรียบเทียบชนิดของยางหลัก 33

4.2 ตอนที่ 2 ศึกษาการลดต้นทุนด้วยสารตัวเติมซึ่งมี 4 ชนิด 35

4.2.1 ผลของชนิดสารตัวเติม 35

4.2.2 ผลของอัตราส่วนสารตัวเติม 38

4.2.3 ผลของสารทำความสะอาดที่มีต่อยางล้างแม่พิมพ์ 42

4.3 สัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ 45

4.4 ประสิทธิภาพการทำความสะอาดแม่พิมพ์ 50

4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้างแม่พิมพ์ 52

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 56

5.1 สรุปผลการทดลอง 56

5.2 ข้อเสนอแนะ 57

เอกสารอ้างอิง ญ

ภาคผนวก ฎ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	การเปรียบเทียบการทำความสะอาดแม่พิมพ์วิธีต่างๆ	5
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่าง Nonconjugate Diene ที่ใช้ในการผลิตยาง	6
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางกายภาพบางประการของยางอีพีดีเอ็ม	7
ตารางที่ 2.4	สมบัติบางประการของซิลิกาชนิดตกตะกอน	17
ตารางที่ 3.1	สูตรผสมยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1	29
ตารางที่ 3.2	สูตรผสมยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 2	30
ตารางที่ 4.1	การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางหลัก 2 ชนิด (ยางอีพีดีเอ็ม กับยางเอสบีอาร์)	34
ตารางที่ 4.2	การคำนวณราคายางล้างแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัม โดยมีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว (60 phr) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.12	52
ตารางที่ 4.3	การคำนวณราคายางล้างแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัม โดยมีสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนต (50 / 50 รวม 60 phr) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.145	53
ตารางที่ 4.4	การคำนวณราคายางล้างแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัม โดยมีสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับดินขาว (50 / 50 รวม 60 phr) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.135	54
ตารางที่ 4.5	แสดงราคายางล้างแม่พิมพ์รวม โดยมีสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกากับดินขาว	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM (เกรดที่มี HD เป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่ 3) 7

รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางสไตรีน-บิวตะไดอีน 9

รูปที่ 2.3 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ 14

รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย 25

รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม 35

รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม 36

รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม 36

รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rubber modulus (M100) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม 37

รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกด (Hardness) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม 37

รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์ 39

รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์ 39

รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์ 40

รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rubber modulus (M100) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์ 40

รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกด (Hardness) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์ 41

รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของสูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด 43

รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด 43

รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rubber modulus (M100) ของยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด 44

รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับที่ใส่สารทำความสะอาด 44

รูปที่ 4.16 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ โดยใช้ยางอีพีดีเอ็มที่มีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 45

รูปที่ 4.17 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ โดยใช้ยางเอสบีอาร์ที่มีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 46

รูปที่ 4.18 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมพัมมิซชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 46

รูปที่ 4.19 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมดินขาวชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 47

รูปที่ 4.20 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 47

รูปที่ 4.21 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมซิลิกาผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 50 / 50 (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมซิลิกาผสมกับพัมมิซในอัตราส่วน 50 / 50 (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 48

รูปที่ 4.23 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมซิลิกาผสมกับดินขาวในอัตราส่วน 50 / 50 (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) 49

รูปที่ 4.24 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ผสมสูตรที่แตกต่างกันในการล้าง 5 ครั้ง 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการแปรรูปยางมีการเจริญเติบโตอย่างกว้างขวาง และรวดเร็ว การแปรรูปยางส่วนใหญ่ นิยมใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป (Compression molding) หรือการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วยเทคนิคเหล่านี้จะมีหลากหลายรูปแบบและขนาด ขึ้นกับความต้องการในการนำไปใช้งานและลักษณะของแม่พิมพ์ที่ใช้ แต่ปัญหาที่มักพบเสมอคือ คราบสกปรกที่มักติดตามแม่พิมพ์เมื่อทำการขึ้นรูปหลายๆ ครั้ง ปัญหาที่พบนี้เป็นผลมาจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (150-175°C) เพื่อเชื่อมโยง (Crosslinking) ผลิตภัณฑ์ยางให้กลายเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติหรือเทอร์โมเซต (Thermoset) ความร้อนจากการขึ้นรูปซ้ำหลายๆ ครั้งทำให้เกิดสารเคมีที่ตกค้างไหม้หรือเสื่อมสลายเป็นคราบสกปรกติดที่ผิวแม่พิมพ์ในกระบวนการอุตสาหกรรม ด้วยเหตุนี้จึงจำต้องมีการทำความสะอาดแม่พิมพ์กำจัดคราบสกปรกที่ผิวแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดรอยตำหนิบนผลิตภัณฑ์ โดยในขั้นต้นมีการใช้แรงงานคนในการขัดทำความสะอาดซึ่งจะเสียเวลาและค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างมาก อีกทั้งยังทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงัก เมื่อสังเกตแม่พิมพ์ที่ทำความสะอาดแล้ว พบว่ายังมีคราบสกปรกติดอยู่และเกิดรอยขีดข่วนบริเวณที่ขัดถู ทำให้ปัจจุบันมีการพัฒนาการทำความสะอาดด้วยยางล้างแม่พิมพ์ซึ่งมีความสะดวกสบาย ใช้เวลาน้อยและลดต้นทุนในการทำความสะอาด แต่เนื่องจากยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในปัจจุบันมีราคาสูงเนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ด้วยเหตุนี้จึงมีการร่วมมือกันระหว่าง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) กับ บริษัทเอส-เคพอลิเมอร์ จำกัด เพื่อวิจัยการลดต้นทุนยางล้างแม่พิมพ์ โดยเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงงานพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ของ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล.[4-7] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของยางล้างแม่พิมพ์ขึ้น โดยสามารถนำยางล้างแม่พิมพ์ไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย

งานวิจัยนี้จะช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพของยางล้างแม่พิมพ์ โดยจากโครงงานพิเศษที่ผ่านมาจะใช้ยางอีพีดีเอ็ม (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) เป็นยางหลัก แต่ในที่นี้จะทำการศึกษาในเชิงเปรียบเทียบโดยจะใช้ยาง 2 ชนิดคือ ยางอีพีดีเอ็ม และยางเอสบีอาร์ (Styrene butadiene rubber, SBR) แล้วเลือกชนิดยางเพื่อนำมาศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติม (Filler)ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ซิลิกา
- แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)
- ดินขาว (Clay)
- หินภูเขาไฟหรือพัมมิซ (Pumice)
- สารตัวเติมแบบผสม (ซิลิกาผสมกับสารตัวเติมชนิดอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม)

1.2 วัตถุประสงค์

1.ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ยางล้างแม่พิมพ์สูตรยางผสมอีพีดีเอ็ม และเอสบีอาร์ ซึ่งมีผลต่อสมบัติและประสิทธิภาพการทำความสะอาดของยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้

2. ศึกษาความเป็นไปได้ของการปรับปรุงสูตรยางล้างแม่พิมพ์เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพ โดยการใช้สารตัวเติมซึ่งได้แก่ ซิลิกา, แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$), ดินขาว (Clay), พัมมิซ (Pumice) และสารตัวเติมแบบผสม (ซิลิกาผสมกับสารตัวเติมชนิดอื่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกสูตรยางล้างแม่พิมพ์แล้วทำการผสมและอัดรูปยางล้างแม่พิมพ์
3. ทำการทดสอบสมบัติของยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้
   - 3.1 ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)
   - 3.2 ทำการทดสอบเชิงกล
     - ทดสอบการดึงยืด (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D412
     - ทดสอบการฉีกขาด (Tear test) ตามมาตรฐาน ASTM D624
     - ทดสอบความแข็งกด (Hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM D2240
   - 3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
   - 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้กับแม่พิมพ์จริงในภาคอุตสาหกรรม
4. การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้างแม่พิมพ์จากงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีชนิดและปริมาณสารตัวเติมที่ดีที่สุด เพื่อช่วยในการลดต้นทุนด้านการทำความสะอาดแม่พิมพ์ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง

- ได้ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูง สามารถใช้งานได้จริงในกระบวนการอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ยางหลังทำความสะอาดแม่พิมพ์มีคุณภาพดีขึ้น มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

- เพิ่มกำลังการผลิต เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยประหยัดพลังงาน ลดปัญหาโลกร้อน (Global warming) ได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตให้กับอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางในประเทศไทย รวมทั้งส่งออกเพื่อเพิ่มรายได้ให้กับประเทศ

- สามารถนำความรู้และยางล้างแม่พิมพ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการทำความสะอาดอุปกรณ์ขึ้นรูปพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การทำความสะอาดแม่พิมพ์ [4]

วิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมยางทำได้หลายวิธี โดยวิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ที่จะอ้างถึงต่อไปนี้ เป็นข้อมูลการทำความสะอาดแม่แบบอย่างง่ายและใช้ทั่วไป สามารถแบ่งวิธีการทำความสะอาดแม่แบบได้ดังต่อไปนี้

1) **การทำความสะอาดแม่แบบโดยการขัด**

หลักการคือ เทน้ำมันก๊าดลงบนแม่แบบที่สกปรก ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้เศษยางและคราบเคมีเก่าที่ติดบริเวณผิวแม่แบบเกิดการพองตัว จากนั้นใช้โลหะเส้นแคะบริเวณที่มีคราบสกปรกฝังติดอยู่ แล้วขัดผิวหน้าของแม่แบบด้วยแผ่นขัด เช่น สก๊อตช์ไบรต์

ผลที่ได้รับ

คราบเคมีและเศษยางเก่ายังออกไม่หมด สังเกตได้จากการอัดชิ้นงานในครั้งแรกหลังจากทำความสะอาด ซึ่งพบว่าชิ้นงานมีผิวไม่เรียบ แสดงให้เห็นว่าแม่แบบยังคงมีคราบเคมีและเศษยางเก่าติดค้างอยู่

2) **การทำความสะอาดแม่แบบโดยการจ้างบริษัททำความสะอาดแม่แบบ**

พนักงานทำความสะอาดได้ใช้หินขัด (Super stone®) ขัดคราบสกปรกในร่องลึก แล้วใช้กระดาษทรายขัดบริเวณผิวหน้า

ผลที่ได้รับ

คราบสารเคมีและเศษยางยังออกไม่หมด โดยสังเกตได้จากการอัดชิ้นงานในครั้งแรกหลังจากการทำความสะอาด พบว่าชิ้นงานมีผิวไม่เรียบ จึงต้องใช้พนักงานขัดซ้ำอีกครั้ง แต่ใช้เวลาในการทำความสะอาดน้อยกว่าการใช้พนักงานขัดเองทั้งหมด

จากวิธีการทำความสะอาดแม่แบบที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำความสะอาดต่ำ จึงได้ใช้การทำความสะอาดแม่แบบด้วยยางล้างแม่แบบ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการทำความสะอาดแม่พิมพ์วิธีต่างๆ[4]

การทำความสะอาดโดยการขัดด้วยพนักงาน	การทำความสะอาดโดยการจ้างบริษัททำความสะอาด	การทำความสะอาดโดยการใช้ยางผสมสูตรทำความสะอาดแม่แบบ
1. แม่แบบสะอาด ยังมีคราบยางและเคมีเกาะที่ผิว	1. แม่แบบไม่สะอาดเท่าที่ควร แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้พนักงานขัด	1.แม่แบบไม่สะอาด ไม่มีคราบสารเคมีเกาะที่ผิว
2. รอบในการทำความสะอาด คือ 2-3 วัน ต่อ 1 ครั้ง	2. รอบในการทำความสะอาด คือ 2-3 วัน ต่อ 1 ครั้ง	2. รอบในการทำความสะอาด คือ 4 วัน ต่อ 1 ครั้ง ครั้งละ 3 mold
3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด คือ 2-3 วันต่อ 1 ครั้ง	3. ระยะเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดคือ 1-2 วัน ต่อ 1 ครั้ง	3. ระยะเวลาในการทำความสะอาด คือ 45 นาที ต่อ 1 ครั้ง
4. เสียเวลาในการติดตั้งแม่แบบ เพราะต้องเอาแม่แบบลงและต้องเอาแม่แบบติดตั้งใหม่	4. เสียเวลาในการติดตั้งแม่แบบเพราะต้องเอาแม่แบบลงและต้องเอาแม่แบบติดตั้งใหม่	4. ไม่เสียเวลาในการติดตั้งแม่แบบพราะไม่ต้องเอาแม่แบบลง
5. เสียเวลาในการรออุณหภูมิเพราะต้องติดตั้งเครื่องใหม่	5. เสียเวลาในการรออุณหภูมิเพราต้องติดตั้งเครื่องใหม่	5. ประหยัดเวลาในการทำความสะอาด
6. ทำให้การผลิตหยุดชะงักประมาณ 2-3 วัน หรือเท่ากับ 504 mold หรือ 1,290,240 ชิ้น	6. ทำให้การผลิตหยุดชะงักประมาณ 2-3 วัน หรือเท่ากับ 496 mold หรือ1,269,760 ชิ้น	6. ทำให้การผลิตหยุดชะงักเพียง 1 ชม. หรือ 8 mold หรือ 20,480 ชิ้น
7. ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำความสะอาด 1 ครั้งคือ 388 - 507 บาท	7. ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำความสะอาด 1 ครั้ง คือ 2,000 บาท	7. ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทำความสะอาด 1 ครั้ง คือ 345.75 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

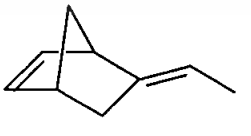
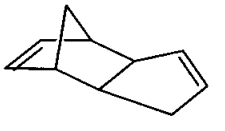
2.2 ยางล้างแม่พิมพ์

2.2.1 ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber,EPDM) [1,2]

ยางอีพีดีเอ็ม เป็นชื่อที่ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Meterials) และ ISO (International Standard Organization) โดยอักษร "E" มาจากเอทิลีน (Ethylene) อักษร "P" ย่อมาจากพรอพิลีน (Propylene) อักษร "D" มาจากไดอีน ส่วนอักษร "M" ท้ายชื่อเรียกกลุ่มยางที่มีโครงสร้างหลักเหมือนพอลิเมทิลีน (Polymethylene, $-(CH_2)_n-$)

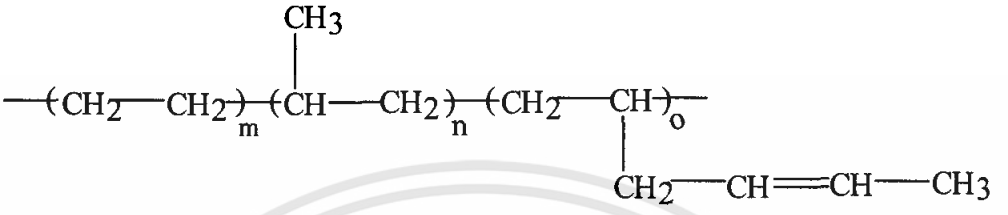
ในระยะแรกได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทีลีนและพรอพิลีน จะได้พอลิเมอร์อสัณฐานเนื่องจากมีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่มจึงมีสมบัติเป็นยางที่เรียกว่า ยางอีพีเอ็ม (EPM) เนื่องจากยางชนิดนี้ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างจึงทำให้มีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซนและสารเคมี อย่างไรก็ตามการที่ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างจึงมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้กำมะถัน (Sulfur) ในการเชื่อมโยงได้ ใช้ได้เฉพาะเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) จึงมีการพัฒนายางชนิดนี้โดยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่ 3 คือ ไดอีนชนิดไม่คอนจูเกต (Nonconjugate Diene) ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่สาม (Terpolymer) ซึ่งมีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้าง ยางจึงสามารถทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันและเรียกยางชนิดนี้ว่า ยางอีพีดีเอ็ม

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่าง Nonconjugate Diene ที่ใช้ในการผลิตยางอีพีดีเอ็ม[1]

ชื่อ	สมบัติ	โครงสร้าง
1,4 Hexadiene (HD)	เชื่อมโยงช้า แต่ได้ยางที่มีสมบัติใกล้เคียงกับอีพีดีเอ็ม	$CH_2=CH-CH_2-CH=CH-CH_3$
Ethylidene Norbornene (ENB)	นิยมใช้มากที่สุด แต่แพงเชื่อมโยงง่าย และเข้าได้ดีกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่นๆ	
Dicyclopentadiene (DCPD)	ราคาถูก เข้าได้ดีกับยางชนิดอื่นๆแต่เชื่อมโยงช้าที่สุด	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง อีพีดีเอ็ม (เกรดที่มี HD เป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่ 3) [1]

ยาง อีพีดีเอ็ม มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอีน โดยทั่วไป ยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ในช่วง 40 – 80 %โดยโมล ปริมาณของไดอีนอยู่ในช่วง 3 – 11 % โดยโมล สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีนในยางก็มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติของยางกล่าวคือ ยางเกรดที่มีปริมาณเอทิลีนสูงจะมีความแข็งแรงก่อนการเชื่อมโยงสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทิลีนลดลง ยางก็จะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น สมบัติทั่วไปของยาง อีพีดีเอ็ม แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพบางประการของยางอีพีดีเอ็ม [2]

สมบัติทางกายภาพ	
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($°C^{-1}$)	$2.2x10^{-4}$
ความร้อนจำเพาะ (cal/g. °C)	0.52
การแพร่ความร้อน (cm^2/s)	$9.2x10^{-4}$
การนำความร้อน (cal/cm.s. °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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติโดยรวมของยางอีพีดีเอ็ม สามารถสรุปได้ดังนี้

- ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางอีพีดีเอ็ม มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์หลายๆชนิด แต่ยังต่ำกว่ายางธรรมชาติ
- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่ม ทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน ไม่สามารถเกิดผลึกได้
- Compression set ต่ำ โดยเฉพาะยางถูกเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ ส่วนยางที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จะมีค่า Compression set สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- Dynamic property สูงและมีความต้านทานต่อการล้าสูง โดยเฉพาะยางที่ได้รับการเชื่อมโยงด้วยระบบกำมะถันซึ่งจะมีสมบัติด้านนี้ใกล้เคียงกับยางเอสบีอาร์
- ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging property) เนื่องจากยางอีพีดีเอ็ม ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง ทำให้สมบัติด้านการต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้เป็นอย่างดี (ดีกว่ายางเอสบีอาร์ แต่ด้อยกว่ายางซิลิโคน) โดยยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงกว่ายางที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน
- การทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and chemical resistance) ยางอีพีดีเอ็ม เป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้ไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายไม่มีขั้ว แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี เช่น กรด เบส แอลกอฮอล์ เป็นต้น
- ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Electrical insulation) จากตารางที่ 2.3 พบว่ายางชนิดนี้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้นจึงมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง

สมบัติการเชื่อมโยงของยางอีพีดีเอ็ม ขึ้นกับชนิดและปริมาณของไดอีนที่ใช้ ถ้ามีปริมาณของไดอีนมาก ก็จะสามารถเชื่อมโยงยางอีพีดีเอ็ม ได้รวดเร็ว หากต้องการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ จะต้องใช้ยางเกรดที่มีสัดส่วนของพอลิเอทิลีนสูง (มากกว่า 50%) เพราะหมู่เมทิลในพอลิพรอพิลีนจะไปขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์และจะทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลแทน

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

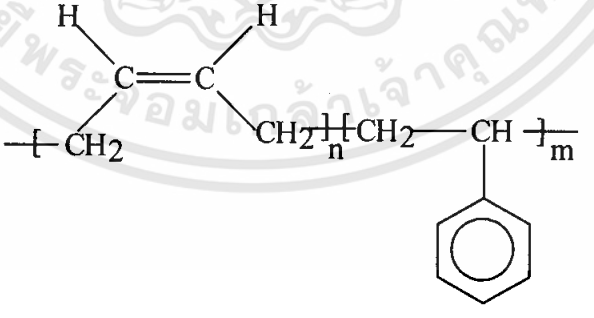
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ยางอีพีดีเอ็ม เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะชิ้นส่วนในรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง-ประตู ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น หรือใช้การผลิตสายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา ฉนวนหุ้มสายเคเบิ้ล นอกจากนี้ ยังสามารถผสมกับพลาสติกในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPEs) ได้ด้วย

2.2.2 ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน (Styrene-Butadiene Rubbers, SBR) [1]

ยางสไตรีน-บิวตะไดอีนเป็นพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ของสไตรีน และบิวตะไดอีน ซึ่งปกติจะมีสไตรีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 23.5% มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ -55 °C ยางเอสบีอาร์ ส่วนมากเตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) ผ่านอนุมูลอิสระ (Free radicals) นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) แต่ไม่นิยมใช้ในการผลิตยางเอสบีอาร์ โครงสร้างโมเลกุลของยางเอสบีอาร์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ามีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างของยางเอสบีอาร์ ดังนั้นในการสังเคราะห์จะเกิดยางเอสบีอาร์ ได้สามโครงสร้างคือ cis-1,4 , tran-1,4 และvinyl-1,2

ยางเอสบีอาร์ หรือยางสไตรีน-บิวตะไดอีน เป็นยางสังเคราะห์ที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดในโลก เนื่องจากยางเอสบีอาร์มีสมบัติที่ดี มีปริมาณการใช้งานมากในยางรถยนต์ โดยเฉพาะหน้ายาง (Tread) เนื่องจากมีสมบัติทนทานต่อการขัดถูเสียดสี (Wear resistance)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางสไตรีน-บิวตะไดอีน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 **สารเติมแต่ง** (Additives) [1,3,10-14]

สารเติมแต่ง คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยาง (Property enhancement) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) ให้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น

(1)สารเชื่อมโยง (Crosslink agent) [1]

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

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

การเชื่อมโยงสามารถทำได้โดยการผสมสารเคมี คือ สารเชื่อมโยง ได้แก่ กำมะถัน เปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะ นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Acceletors) สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators) ผสมเข้ากับยางแล้วทำการให้อุณหภูมิสูงในภายหลัง เพื่อทำการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ อุณหภูมิสูงจะทำให้สารเชื่อมโยงต่างๆ เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลของยาง เมื่อทำการเชื่อมโยงแล้ว โครงสร้างจะเปลี่ยนจากสายโซ่ตรงเป็นโครงร่างแหสามมิติ ยางจะมีสมบัติที่ดีขึ้น การเชื่อมโยงทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนไปกล่าวคือ

- ความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- ความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- ฮีสเตอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- การเปลี่ยนสภาพถาวร (Permanent set) ลดลง
- การเหนียวติด (Sticky) ลดลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ ทนต่อความร้อน แสงและการใช้งานนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubbers) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) นิยมใช้เชื่อมโยงโดยเฉพาะยางที่อิ่มตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น
- ยางอีพีดีเอ็ม และยางซิลิโคน (Q)
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties) ดีกว่า
- 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 อย่างไรก็ดี การเชื่อมโยงด้วย
- เปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการ คือ
- การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ จะเกิดกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงปรารถนาของสารที่ปลดปล่อยออกมา ในระหว่างการเชื่อมโยงยาง และในผลิตภัณฑ์ยาง
- เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีอันตราย ต้องระมัดระวังในการใช้และการเก็บรักษา
- สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งชนิดอื่นในยางมากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดและต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมียาง เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่น หรือน้ำมัน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนในการเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cures) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่ของพอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดหมู่ของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคือยางเกิดการเสียสภาพเนื่องจากความร้อนนั่นเอง
- ยางบิวทิล (Butyl rubber,IIR) จะเกิดปฏิกิริยาการเสียสภาพ เมื่อเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากเกิดเป็นอนุมูลของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radicals) ซึ่งไม่เสถียร เกิดการขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า (β-scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสภาพของ สายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อยกเว้น ไม่สามารถใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล (IIR)

มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้เชื่อมโยงยาง เช่น ไดเอซิลเปอร์ออกไซด์ (Diacyl peroxide) และเปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy ester) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติสารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

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

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีจำหน่ายทั้งในรูปผงของแข็งและของเหลว ความบริสุทธิ์ประมาณ 90-99% เนื่องจากเปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงมีจำหน่ายในรูปของผสมกับสารตัวกลางเฉื่อยบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เข้มข้น 40-45% และใช้ในรูปของผสมพร้อมสารเพิ่มเนื้อ ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์นิยมใช้น้อยกว่า เนื่องจากกลายเป็นไอได้ง่ายขณะใช้งาน ส่วนไดเมทิลไดบิวทิลเปอร์-ออกซีเฮกเซนนิยมใช้ในการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิสูง (180°C) เนื่องจากมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า และไม่มีกลิ่นเหม็นของสารอะซิโตฟีโนน (Acetophenone)

ในการใช้งานสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บสารที่อุณหภูมิสูง (เกิน 40 °C) เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลาย นอกจากนี้ควรเก็บให้ห่างจากแหล่งใช้ความร้อนและไฟฟ้าสถิต เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายและดับไฟยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

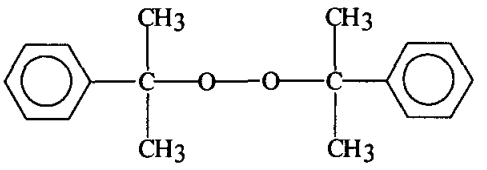
<u>กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์</u>

กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มจากปฏิกิริยาโฮโมไลติก – ดีคอมโพซิชัน (Homolytic decomposition) สลายตัวเนื่องจากความร้อน แตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอัลคอกซี (Alkoxy radical, RO•) สองตัว ซึ่งเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.3 ในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางที่ไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) อนุมูลอิสระที่จะเกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูล (Polymer radicals หรือ Macro radicals) จากนั้นจะเกิดการรวมกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง

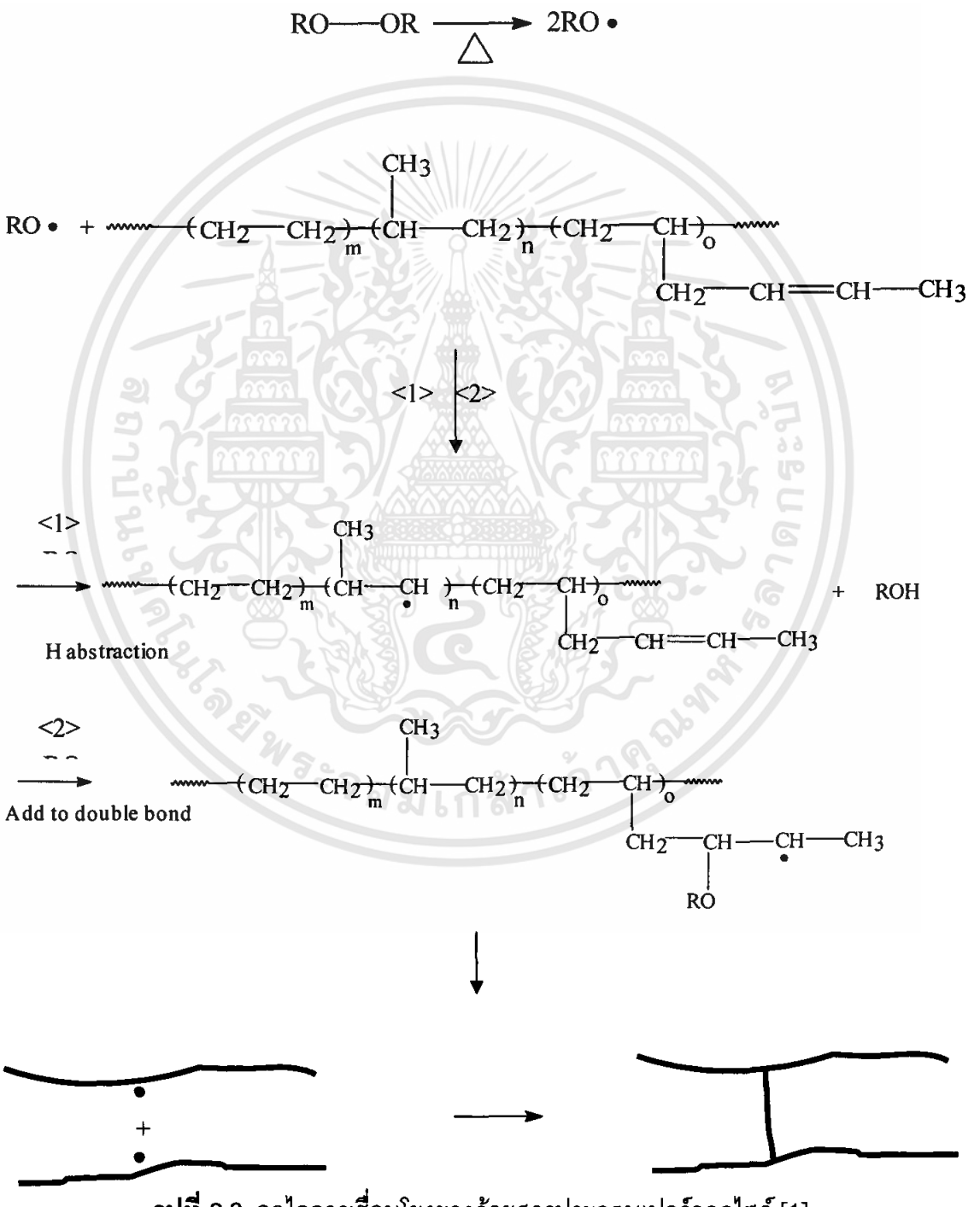
นอกจากอนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางที่ไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาง่าย เช่น Allylic hydrogen เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูล เช่นเดียวกับในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงยางที่อิ่มตัวแล้ว การรวมกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Dicumyl peroxide,DCP



รูปที่ 2.3 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) [1]

สารกระตุ้นการเชื่อมโยง เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelators) ในกรณีของการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ซึ่งไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง สารกระตุ้นการเชื่อมโยงจะทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงแทน

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) สารตัวเติม [1,10-12]

(3.1) ซิลิกา (Silica) [1]

ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำชนิดอื่นๆ ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ข้อดีของซิลิกาคือ มีอนุภาคเล็กทำให้สามารถแทรกและกระจายในยางได้สม่ำเสมอ ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat built up) เพิ่มความต้านการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง

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

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica)

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

ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของซิลิกาชนิดตกตะกอน [1]

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
hardness	6.5-7.0
%Moisture	6.0
Silanol group ($no./nm^2$)	1.5-10

(3.2) **ดินขาว**(Clay) [1]

ดินขาว หรืออาจรู้จักในนาม "เคโอลิน" (Kaolin) "ไชน่าเคลย์" (China clay) หรือ ไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrate aluminum silicate $(OH)_4Al_2Si_2O_5$) เป็นสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติคือการขุดจากแร่ดินขาวหรือ "เคโอลิไนต์"(Kaolinite) แล้วทำให้บริสุทธิ์ นิยมใช้มากที่สุดเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำชนิดอื่น เนื่องจากมีราคาถูก หาได้จากธรรมชาติ สีขาวเป็นผงขนาดเล็ก มีความแข็งสูง และมีพื้นผิวที่เฉื่อย (Inert) นิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มความแข็ง (Stiffness) ให้กับพอลิเมอร์ สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นสารตัวเติมได้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง สีทา ปุ๋ย เซรามิกส์ และยา เป็นต้น แต่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูง (2.60 g/cm^3) เมื่อใส่ปริมาณมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางหนัก ดินขาวเป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง หรือไม่เสริมแรง ช่วยลดต้นทุนเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
107880

(3.3) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) [1]

แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารตัวเติมสีขาวที่ได้จากธรรมชาติ เกิดจากการสะสมตะกอนเป็นเวลานานเช่นซากเปลือกหอยต่างๆ เป็นองค์ประกอบสำคัญของเปลือกโลกที่มีมากชนิดหนึ่ง แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพิ่มเนื้อที่นิยมใส่ผสมพอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิต เช่น พลาสติก ยาง สี กระดาษ กาว ฯลฯ อาจรู้จักแคลเซียมคาร์บอเนตในหลายชื่อเช่น หินปูน (Lime stone) หินอ่อน (Marble) แคลไซต์ (Calcite) ชอล์ค (Chalk) อะราโกไนต์ (Aragonite) และสารขาวหรือไวติ้ง (Whiting) แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นหนึ่งในสารตัวเติมที่นิยมเนื่องจากมีความขาว (Whiteness) สมบัติเสียดทาน (Abrasion) ต่ำ มีหลายขนาดให้เลือกใช้ มีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดคือมีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 2.7g/cm^3) ไม่ทนกรดไม่สามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่สัมผัสกับกรด เนื่องจากจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการทำปฏิกิริยากับกรด แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์ มักจับตัวเป็นก้อนจึงนิยมใช้สารช่วยกระจายตัวเช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) เคลือบสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามรถในการกระจายตัว นอกจากนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพการเสริมแรง (Non-reinforcing filler) หรือเสริมแรงได้เพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนเพียงอย่างเดียว

(3.4) พัมมิซ (Pumice) [10-12]

พัมมิซ หรือหินภูเขาไฟ (Pumice) **หรือ** (Volcanic rock) **ที่เป็นวัสดุธรรมชาติ** องค์ประกอบหลักคือออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมิเนียม (Silicone and aluminium oxide) และมีออกไซด์ของโลหะอื่น ๆ เล็กน้อยเป็นองค์ประกอบ หินพัมมิซ มีความเป็นกลาง เฉื่อยทางเคมี ไม่ติดไฟ และมีน้ำหนักเบาหรือมีความหนาแน่นต่ำ ประเทศไทยพบสินแร่พัมมิซ ปริมาณมากในการสัมปทานเหมืองหินในบางจังหวัด เช่น ลพบุรี และสระบุรี

ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์ พัมมิซ เป็นสารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) ราคาถูกในบางอุตสาหกรรม อย่างไรก็ดีจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า พัมมิซมีข้อดีหลายประการเช่น

- พัมมิซ มีความหนาแน่นต่ำ เทียบกับหินชนิดอื่น ทำให้ประหยัดต้นทุนในการขนส่งและการผลิต สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอนกรีตหรืออิฐน้ำหนักเบา (Lightweight concrete)
- มีความเฉื่อยทางเคมี (pH ประมาณ 7)
- มีความแข็งแรงกดอัดจำเพาะ (Specific compressive strength) ดีเยี่ยม
- มีเนื้อวัสดุเนียน ช่วยลดเวลาการผลิตบล็อก ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก้อนบล็อกคอนกรีตด้วย พัมมิซ ดีกว่าการใช้ทรายหรือหินหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีสมบัติการดูดซับ-คายน้ำ (Water absorption/desorption characteristics) ดีเยี่ยม

  พัมมิซ ใช้ระยะเวลาหนึ่งในการดูดซับน้ำเข้าภายในกลุ่มก้อน (มิได้ดูดทันทีทันใด) ทำให้ไม่รบกวนปฏิกิริยาแข็งตัวของน้ำกับซีเมนต์ แต่จะทำให้ก้อนคอนกรีตมีความแข็งแรงสูงขึ้นมากเมื่อระยะเวลาผ่านไป
- เป็นฉนวนความร้อนที่ดี มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ต่ำ
- ไม่ติดไฟ ทำให้ช่วยลดการลามไฟของวัสดุกรณีใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ก้อนคอนกรีตที่มีพัมมิซ เป็น ส่วนประกอบจะมีค่าการต้านการลามไฟ (Fire resistance ratings) สูงกว่าก้อนคอนกรีตทั่วไปหรือที่ใช้ทรายเป็นส่วนประกอบ
- มีความสามารถในการดูดซับเสียง (Sound absorption) ดีเยี่ยม
- มีสีขาวสวยงามดึงดูดกว่า
- เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และใช้พลังงานในการผลิตต่ำกว่าเนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำกว่า ใช้พลังงานในการขนส่งน้อยกว่าหินหรือทรายที่หนักกว่า และช่วยลดวิกฤตโลกร้อน (Global warming) เพราะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่า
- ออกไซด์ของซิลิกาและอะลูมิเนียมใน พัมมิซ สามารถเกิดปฏิกิริยากับ Lime และน้ำเกิดเป็นกระเบื้องหรือพอซโซแลน (Pozzolans) ที่มีความแข็งแรงสูง
- คอนกรีตจาก พัมมิซ มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนอุณหภูมิรวดเร็ว (Freeze/thaw resistance)
- คอนกรีตจาก พัมมิซ สูตรที่เหมาะสมสามารถเลื่อยได้และตอกตะปูได้

ในต่างประเทศมีการใช้ประโยชน์หินพัมมิซ ในหลากหลายอุตสาหกรรมเช่น

- ใช้เป็นวัสดุขัด เนื่องจากหินพัมมิซ บดย่อยมีความคม จึงสามารถใช้ทำวัสดุขัดคุณภาพสูงได้ เช่น หินขัดกางเกงยีนส์ผ้านิ่ม (Stonewash denim) กระดาษทราย ฯลฯ ในอุตสาหกรรมความงามเช่น สปา ใช้หินพัมมิซ ขัดผิว มือ ข้อศอก และเท้า
- เกษตรกรรม ใช้หินพัมมิซ ที่มีรูพรุนก้อนเล็ก ๆ ผสมดินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำและกักเก็บความชื้น
- หินพัมมิซ มีรูพรุนสามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับสารเคมีและน้ำมัน (Chemical and petroleum floor dry absorbent) ที่หกบนพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) **สารช่วยกระบวนการผลิต** (Processing aids) [1]

สารช่วยกระบวนการผลิต คือ สารเคมีที่ผสมลงไปในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้นนั้นคือ ใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติจะใช้สารช่วยกระบวนการผลิตในปริมาณที่น้อยไม่เกิน 5 phr

(5) **สารป้องกันการเสื่อมสภาพ** (Protective agents) [1]

ยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสภาพได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน การเสื่อมสภาพของยางเกิดเนื่องจากโมเลกุลของยางถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโดยออกซิเจนหรือโอโซน การเสื่อมสภาพของยางนี้เรียกว่า "Degradation" การเสื่อมสภาพของยางเกิดขึ้นช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่ง แต่ในธรรมชาติมีแสงแดด ความร้อน และความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนเป็นตัวเร่งทางธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตช่วงที่มีการอบยาง (Aging) ผลิตภัณฑ์ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอบแตกที่ผิว 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 เพื่อเป็นการป้องกันการเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น จำเป็นต้องมีการเติมสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยการใช้สารแอนตี้ออกซิแดนท์ (Antioxidant) หรือสารแอนตี้โอโซนแนนท์ (Antiozonants) ซึ่งสารทั้งสองจะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางนานขึ้น

สารแอนตี้ออกซิแดนท์และสารแอนตี้โอโซนแนนท์ เป็นการป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) สารแอนตี้ออกซิแดนท์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สารแอนตี้ออกซิแดนท์ชนิดตกสี (Staining antioxidants)

สารแอนตี้ออกซิแดนท์ประเภทนี้ เป็นสารประกอบเอมีน หรืออนุพันธ์เอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้ผลิตภัณฑ์ยาง 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 คือ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ทนทานต่อความร้อน ทนต่อการหักงอ ไม่เปลี่ยนสียาง
- Hydroquinone derivatives เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนท์ที่อ่อนสำหรับยางที่คงรูปแล้ว เหมาะจะใช้กับยางที่ไม่คงรูปและกาว โดยป้องกันไม่ให้ผิวยางที่คงรูปแห้งจนติดกันไม่ได้ เมื่อนำไปประกอบด้วยกัน

(6) **สารคู่ควบ** (Coupling agents) [3]

สารคู่ควบ เป็นสารช่วยยึดติดระหว่างสารตัวเติมกับยางให้ยึดติดกันได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น ไซเลน (Silanes) ผลของไซเลนทำให้มอดุลัส ความต้านทานการสึกหรอ การเปลี่ยนรูปถาวรของยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมดีมากขึ้น

ไซเลนเป็นสารที่มีสูตรทั่วไปเป็น R'-Si(OR)$_3$ หมู่ R' เป็นหมู่ฟังก์ชัน เช่น อะมิโนแคปโต ไวนิล อีพอกซี หรือ Methacryloxy เป็นต้น หมู่ R เป็นอัลคอกซี (Alkoxy) จะถูกไฮโดรไลซ์เกิดเป็นไซลานอล ไซลานอลจะไปเกาะอยู่กับสารตัวเติมชนิดอนินทรีย์ เช่น ผิวของซิลิกา เคลย์ (Clay) หรือโลหะออกไซด์ (Metal oxides) เป็นต้น ส่วนอีกด้านหนึ่งคือ R'จะไปทำปฏิกิริยากับยาง ดังนั้น ไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดหรือตัวประสานให้ยางกับสารตัวเติมอนินทรีย์มาเกาะกัน วิธีใช้ไซเลนทำได้โดยการผสมสารตัวเติมกับไซเลน แล้วจึงค่อยผสมกับยาง หรืออาจเอาไซเลนใส่เข้าไปในยางขณะผสมกับสารตัวเติมก็ได้ เช่น γ –Aminopropyltrimethoxy silane ($H_2NC_3H_6Si(OC_2H_5)$) β – Mercaptoethltriethoxy silane ($HSC_2H_4Si(OC_2H_5)_3$) ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(7) **สารที่ใช้ในการทำความสะอาดแม่พิมพ์** (Cleaning agents) [13]

สารทำความสะอาด เป็นสารที่ใช้กำจัดสิ่งสกปรกออกจากแม่พิมพ์ โดยมีสมบัติดังนี้

- สามารถกำจัดสิ่งสกปรกประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่นยาง ออกได้ดี
-ไม่ทำปฏิกิริยาหรือ กัดกร่อนวัสดุที่ใช้เป็นแม่พิมพ์ เช่น เหล็ก และสแตนเลส
-สามารถเข้ากันได้กับยางผสมสูตรได้ดี

(8) **สารให้สี** (Pigments) [14]

เป็นสารที่เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ให้มีสีสวยงามตามต้องการ สารให้สีที่ใช้ในยางล้างแม่พิมพ์ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide;TiO_2)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด ผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำหรือตัวทำละลายใดๆ
ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ว่องไวต่อสารเคมี มีสมบัติทางแสงดีมาก มีความมันเงาสูง มีความสว่างและความทึบแสงดีมาก สามารถกระจายตัวได้ดีและทนต่อสภาวะอากาศสูง

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารให้สีในยางล้างแม่พิมพ์ ทำให้ได้ยางล้างแม่พิมพ์สีขาว ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นคราบสกปรกได้ชัดเจน หลังจากทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้ว

ยางผสมสูตรที่ใช้ล้างแม่พิมพ์มีลักษณะที่ต้องคำนึงถึง ดังนี้

- สามารถเก็บสารที่ใช้ทำความสะอาดได้ เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของยางล้างแม่พิมพ์คือ สารที่ใช้ทำความสะอาด ซึ่งจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อยางเกิดการเชื่อมโยง ดังนั้น ยางล้างแม่พิมพ์นี้ต้องสามารถเก็บสารทำความสะอาดไว้ได้จนถึงตอนที่ยางเกิดการเชื่อมโยง
- มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส เพื่อป้องกันการฉีกขาดระหว่างการดึงยางออกจากแม่พิมพ์ เนื่องจากแม่พิมพ์มีลักษณะที่ซับซ้อน
- มีสีอ่อนๆ หรือสีขาว เพื่อที่จะได้เห็นถึงคราบสกปรกที่ติดออกมากับยางล้างแม่พิมพ์ได้ง่าย
- สิ่งที่สำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึง คือ อุณหภูมิที่ยางเกิดการเชื่อมโยง จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับจุดเดือดของสารทำความสะอาด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขนิษฐา ศรีประทุม และมนต์สุดา บุรารักษ์ [4] เสนอโครงงานพิเศษเรื่อง การศึกษายางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม สจล. ปีการศึกษา 2546 งานวิจัยนี้ใช้ยางอีพีดีเอ็ม เป็นยางหลัก ซึ่งศึกษาถึงชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ได้แก่ ละออง ซิลิกา (Fumed silica) และซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite Na-A) ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่แบบ พบว่า ปริมาณละอองซิลิกาที่เหมาะสมเท่ากับ 40 phr ให้สมบัติเชิงที่ดี ส่วนซีโอไลต์โซเดียมเอ เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงจะเพิ่มเนื้อเพียงอย่างเดียวและเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

การปรับปรุงความขาวของยางล้างแม่แบบ สามารถทำได้โดย TiO_2 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ยางล้างแม่แบบที่ได้จะมีสีที่ขาวมากขึ้น แต่สมบัติเชิงกลลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก TiO_2 เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ดังนั้นปริมาณ TiO_2 ที่เหมาะสมเท่ากับ 2 phr เนื่องจากมีความแข็งแรงเพียงพอและไม่ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงมากนัก

ณัฐณิชา เฮงประการ และมลศิริ ซีประวัติชัย [5] เสนอโครงงานพิเศษเรื่องการปรับปรุงสมบัติยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม สจล. ปีการศึกษา 2547 งานวิจัยนี้ใช้ยางอีพีดีเอ็ม เป็นยางหลัก ซึ่งศึกษาสมบัติสารตัวเติมโดยเปรียบเทียบระหว่าง Hi-sil®233 ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด Hi-sil®HOA และ Hi-sil®255 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กลงตามลำดับ พบว่า ยางล้างแม่แบบที่ใช้ Hi-sil®233 เป็นสารตัวเติมที่มีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งกด และมอดุลัสสูงที่สุดเมื่อเทียบกับยางล้างแม่แบบที่ใช้สารตัวเติมชนิดอื่นๆ ส่วนยางล้างแม่แบบที่ใช้ ซิลิกา Hi-sil®255 เป็นสารตัวเติมที่มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดมากที่สุด ซึ่งความแข็งแรงฉีกขาดนี้เป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญ เพราะส่งผลต่อความสามารถในการดึงยางออกจากแม่แบบหลังการทำความสะอาด

นพรัตน์ ศิริแก้วกาญจน์ และคณะ [6] เสนอโครงงานพิเศษ เรื่อง การพัฒนาสูตรยางเพื่อลดต้นทุนยางล้างแม่แบบ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม สจล. ปีการศึกษา 2548 งานวิจัยนี้ใช้ยางอีพีดีเอ็ม เป็นยางหลัก โดยMEA (Monoethanolamine) เป็นสารทำความสะอาดมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดใกล้เคียงกับ AMP (2-Amino-2-methyl-1-propanol) ซึ่งถูกใช้เป็นสารทำความสะอาดเดิม แม้ว่าการใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาดจะทำให้สมบัติเชิงกลที่สำคัญต่อการนำยางออกจากแม่แบบ ได้แก่ ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรง ฉีกขาดลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ AMP ในปริมาณที่เท่ากัน แต่สมบัติเชิงกลที่ได้ยังคงเพียงพอต่อการนำยางออกจากแม่แบบ MEA จึงสามารถทำหน้าที่เป็นสารทำความสะอาดแทน AMP ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มปริมาณสารทำความสะอาดในสูตรยางมีข้อดีคือจะทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงขึ้น และจำนวนครั้งที่ใช้ทำความสะอาดลดลง แต่มีข้อเสียคือ ทำให้สมบัติเชิงกลที่สำคัญต่อการนำยางออกจากแม่พิมพ์ลดลงและยากต่อการผสมเพราะไม่สามารถใส่ของเหลวจำนวนมากในยางได้ จุดเหมาะสมสำหรับปริมาณ MEA ในสูตรยางจึงอยู่ที่ 30 phr เพราะเป็นปริมาณสูงสุดที่สามารถผสมลงในยางได้ มีประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูงสุดเมื่อเทียบกับการใส่ในปริมาณที่น้อยกว่า และสมบัติเชิงกลยังคงเพียงพอต่อการนำออกจากแม่พิมพ์

United States Patent 5563119 [8] สิทธิบัตรฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวันที่ 8 ตุลาคม 1996 คิดค้นโดย Irl E. Ward มีสาระสำคัญคือ ได้มีการนำสารจำพวก Alkanolamine (ในสิทธิบัตรกล่าวอ้างถึง Monoethanolamine) มาเป็นส่วนผสมในสารละลายสำหรับชะล้างแทนไฮดรอกซิลามีนโดยใช้ร่วมกับ Tetraalkylammonium hydroxide และ Corrosion inhibitor โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. ใช้สำหรับชะล้างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ตกค้างบนชิ้นงานและวัสดุต่างๆ
2. ใช้สำหรับลอกสารเคลือบต่างๆ ที่ทำจากพอลิเมอร์ เช่น สี แลคเกอร์ หรือสารเคลือบที่ใช้กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

การใช้ Alkanolamine มีข้อดีเหนือกว่าการใช้สารจำพวกไฮดรอกซิลามีน คือ มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานมากกว่า เนื่องจากการสัมผัสกับไฮดรอกซิลามีนโดยตรง จะทำให้ผิวหนังถูกทำลายอย่างถาวรหากหายใจเอาไอระเหยเข้าไปอาจถึงแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้ Alkanolamine ยังมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

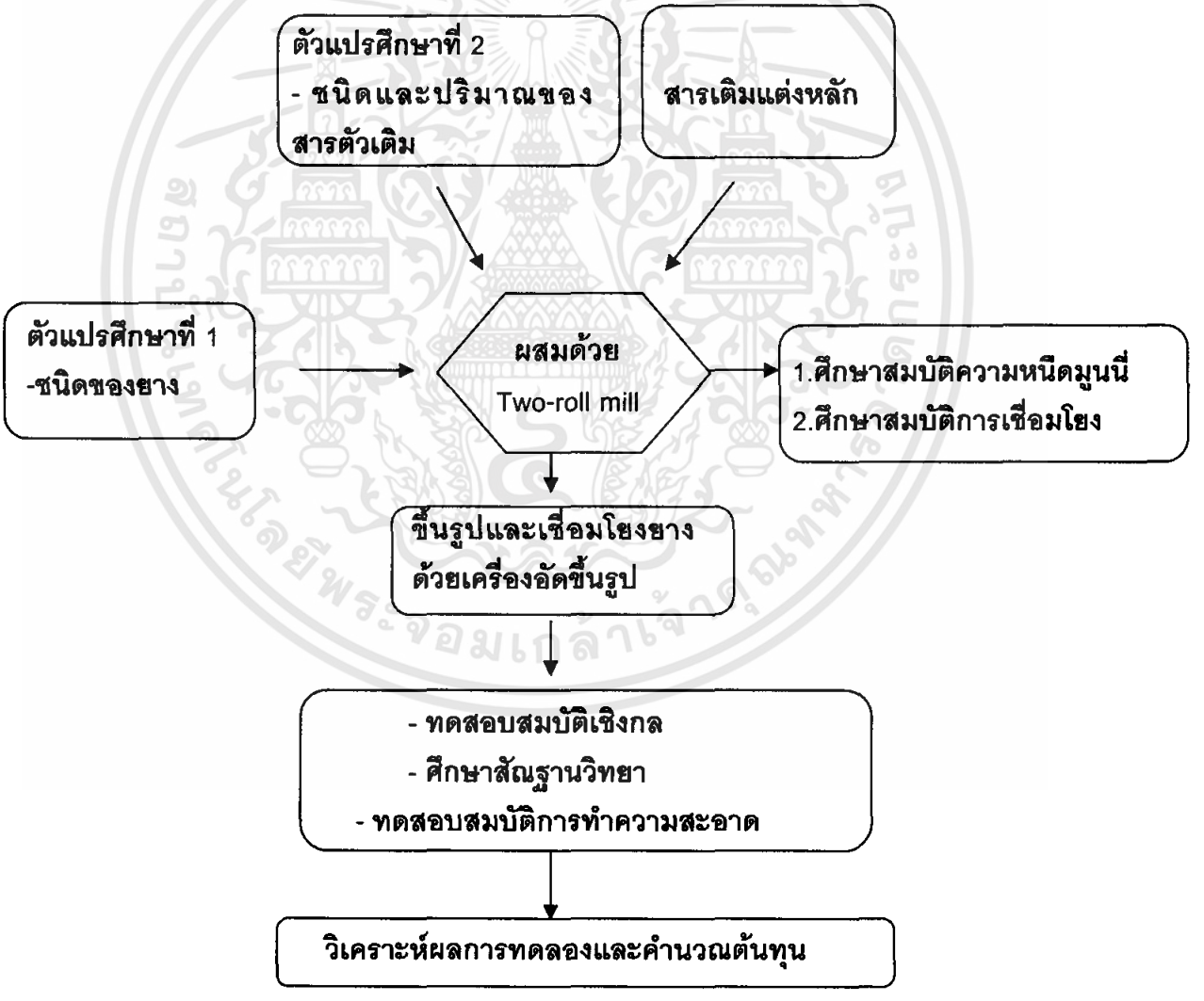
ปิยะ ดอกรัก และคณะ [7] เสนอโครงงานพิเศษ เรื่อง การพัฒนาสูตรยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม สจล. ปีการศึกษา 2549 งานวิจัยนี้ใช้ยางอีพีดีเอ็มเป็นยางหลัก โดยศึกษาชนิดและปริมาณของสารให้ฟอง2 ชนิด ได้แก่ AZ (Azodicarbonamide) และ DNPT (3,7-Di-N-nitrosopentamethylene-tetramine) ซึ่งใช้ร่วมกับคิกเกอร์ (Kicker) สารประกอบยูเรีย ช่วยในการทำงานของสารให้ฟอง และมี MEA (Monoethanolamine) เป็นสารทำความสะอาด พบว่า สารให้ฟองที่มีความเหมาะสม คือ DNPT 2 phr แต่สมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมจะลดลง เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดรอยตำหนิในชิ้นงาน และยังพบอีกว่า ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการใส่สารให้ฟอง DNPT 2 phr ทำให้จำนวนครั้งที่ใช้ในการทำความสะอาดแม่พิมพ์ลดลงเหลือ 4 ครั้ง ต่างจากยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ใส่สารให้ฟองซึ่งต้องใช้จำนวนครั้งถึง 7 ครั้ง เพราะก๊าซที่เกิดขึ้นช่วยนำพาสารทำความสะอาดออกจากยางทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเทียบต่อจำนวนครั้งดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงงานพิเศษสาขาเคมีอุตสาหกรรม [4-7] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. เป็นการปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่พิมพ์สำหรับงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะทำการศึกษาสูตรยางที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้ผลิตยางล้างแม่พิมพ์และปรับปรุงลดต้นทุนยางล้างแม่พิมพ์ให้ถูกขึ้นและยังมีประสิทธิภาพดีดังเดิม ซึ่งขั้นตอนในการทำการวิจัยในครั้งนี้แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขอบเขตการศึกษาออกเป็น 2 ตอนหลัก ๆ ด้วยกัน คือ

ตอนที่ 1 ศึกษาการลดต้นทุนโดยการเปรียบเทียบชนิดของยางหลัก (ยางอีพีดีเอ็ม เปรียบเทียบกับยางเอสบีอาร์)

ตอนที่ 2 ศึกษาการลดต้นทุนด้วยสารตัวเติมซึ่งมี 4 ชนิด ได้แก่

- ซิลิกา
- แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)
- ดินขาว (Clay)
- พัมมิซ (Pumice)

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

<u>สารเคมี</u>

1. ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-propylene rubber ; EPDM) NORDEL® IP 4520 บริษัท DUPONT Chemical Company (Mooney Viscosity 20 ML (1+4) 125 °C)
2. ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene butadiene rubber ; SBR) BSTE 1502 บริษัท BST Elastomer Co.,Ltd. (Mooney Viscosity 50 ML (1+4) 125 °C)
3. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรดการค้า บริษัท Global Chemical Co.,Ltd.
4. กรดสเตียริก (Stearic acid) บริษัท Imperial Co.,Ltd เกรด Industrial.
5. ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) เกรดการค้า Tokusil® 255 G-S บริษัท Tokuyama Siam Silica Co.,Ltd.
6. แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ชนิดเคลือบด้วยกรดสเตียริก บริษัท Sand & Soil Co.,Ltd. เกรด Hifil s607
7. ดินขาว (Clay) บริษัท Engand Co.,Ltd. เกรด Natural clay
8. พัมมิซ (Pumice) ขนาด 0.5 mm บริษัท Volca Marketing Ltd.
9. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide;DCP) ความเข้มข้น 40% เกรดการค้า บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
10. สารคู่ควบไซเลน (Coupling agent) SR-350 บริษัท DUPONT Chemical Co.,Ltd.
11. Polyethylene glycol A16011 Cabowax 3350 PEG บริษัท Cabowax Co.,Ltd.
12. TiO_2 บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
13. สารทำความสะอาด (ปกปิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. สารแอนตี้ออกซิแดนท์ TMQ (Trimethyl quinoline) เกรดการค้า บริษัท South city Co.Ltd.
15. น้ำมันพาราฟิน (Parafinic oil) บริษัท เพชรไทยเคมีภัณฑ์ Co.,Ltd.

อุปกรณ์

1. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) บริษัท แลบเทคเอน-จิเนียริง จำกัด รุ่น LP 20
2. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท แลบเทคเอนจิเนียริง จำกัด รุ่น LRM 200
3. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) บริษัท Shimadzu จำกัด Model SMV-201
4. เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Rotorless Moving Die Rheometer : Curelastimeter) บริษัท Nichigo Shigi Model II F
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal tester) บริษัท Intro LLOYD Instruments จำกัด รุ่น LR 5K
6. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester) บริษัท Intro Enterprise จำกัด รุ่น 719 N
7. เครื่องอัดขึ้นรูป (Hydrolic press) บริษัท Kuemin Machinery Co.,Ltd. รุ่น VO-200 ความดัน 200 psi
8. เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity balance) บริษัท H.W.Wallace & COLtd.ST.James RD. รุ่น CR 92 HR
9. เครื่อง Mastersizer X บริษัท Malvern Instrument.Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การศึกษาและเปรียบเทียบชนิดของยางหลักและชนิดของสารตัวเติม

ตอนที่ 1 ศึกษาการลดต้นทุนโดยการเปรียบเทียบชนิดของยางหลัก (ยางอีพีดีเอ็ม เปรียบเทียบกับยางเอสบีอาร์)

- ตัดและชั่งสารเคมีต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1
- ทำการผสมยางสูตรเริ่มจากการนำยางอีพีดีเอ็ม มาทำการบดย่อย (Mastication) ที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 30 °C โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้งทำการกรีดพับยางจนกระทั่งยางนิ่มขึ้น ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
- เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ได้แก่ ZnO, TiO_2, TMQ, PEG และค่อย ๆ เติมสารตัวเติมลงไปเรื่อย ๆ ในขณะที่พยายามเติมสารประกอบจำพวกของเหลว Parafinic Oil , SR-350 เพื่อช่วยให้ง่ายในการผสม จากนั้นเติม Stearic acid ลงไปกรีดพับยางต่อจนสารเคมีกระจายทั่วทั้งเนื้อยาง
- ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2 x 2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำมาวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) กำหนดอุณหภูมิในการวัดความหนืดที่ 100 °C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4 (100 °C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง
- เติมสารเชื่อมโยง DCP และสารทำความสะอาด กรีดยางจนกระทั่งยางมีความอ่อนตัวและสารเคมีผสมเข้ากันดีกับเนื้อยาง โดยใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 10 นาที
- ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร แล้วกรีดยางออกจากลูกกลิ้ง
- ตัดแผ่นยางผสมสูตรเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยางเพื่อหาเวลาก่อนการเชื่อมโยงยาง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time ; T_{s2}) และเวลาการเชื่อมโยง (Cure time ; t_c)
- ทำการชั่งสารตามตารางที่ 3.1 และผสมสูตรยางเหมือนตอนที่ 1 แต่เปลี่ยนจากยางอีพีดีเอ็ม เป็นยางเอสบีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 1

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง , phr)
EPDM or SBR*	100
TMQ	1
PEG	3.6
Silica	60
TiO_2	2
Parafinic oil	10
ZnO	5
Stearic acid	2
SR-350	2
DCP	5
สารทำความสะอาด	20

หมายเหตุ *ปัจจัยศึกษา

ตอนที่ 2 ศึกษาการลดต้นทุนด้วยสารตัวเติมซึ่งมี 4 ชนิด ได้แก่ ซิลิกา , แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) , ดินขาว (Clay) ,พัมมิซ (Pumice)

- เลือกชนิดของยางที่เหมาะสมมาจากตอนที่ 1
- ทำการเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารตัวเติมในอัตราส่วนต่างๆ ตามความเหมาะสม
- ทำการชั่งสารตามตารางที่ 3.2 และผสมสูตรยางเหมือนตอนที่ 1 แต่ทำการเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สูตรผสมยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยตอนที่ 2

สาร	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ส่วนในร้อยส่วนของยาง , phr)
EPDM or SBR	100
TMQ	1
PEG	3.6
สารตัวเติม*	60
TiO_2	2
Parafinic oil	10
ZnO	7
Stearic acid	2
SR-350	2
DCP	5
สารทำความสะอาด	20

หมายเหตุ *ปัจจัยศึกษา

3.3.2 การศึกษาผลของสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์

3.3.2.1) <u>การทดสอบการดึง (Tensile test)</u>

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

ด้วยความเร็วในการดึงยืด	500	มิลลิเมตรต่อวินาที
ความยาวเกจ	25	มิลลิเมตร
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	5	ชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบที่ได้นำมาหาค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

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

$$\text{ความแข็งแรงดึง} = F/A$$

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการดึง ณ จุดขาด (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

2. มอดุลัสของยาง (Rubber modulus) เป็นค่าความเค้น (Stress) ที่เปอร์เซ็นต์การยืด 100% (R100), 200% (R200) และ 300% (R300)

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

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

เมื่อ l = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน ณ จุดขาด (m)

l_o = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (m)

3.3.2.2) <u>การทดสอบการฉีกขาด (Tear test)</u>

ด้วยเครื่อง Universal Tester ตามมาตรฐาน ASTM D624 โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนกตามมาตรฐาน ASTM Die C กำหนดสภาวะในการทดสอบดังนี้

ความเร็วในการดึงยืด	500	มิลลิเมตรต่อวินาที
ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้	5	กิโลนิวตัน
จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ	5	ชิ้นงาน

3.3.2.3) <u>การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)</u>

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่ (Dead load -hardness tester) ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องจากการกดที่ตัวอย่างที่หนาอย่างน้อย ¼ นิ้ว รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย 10 ครั้งในการตรวจสอบต่อ 1 ชิ้นงานตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์

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

- นำยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้มาหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) โดยแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที แล้วหักชิ้นงานเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยอย่าให้รอยที่หักถูกสัมผัส
- ทำการเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำ
- นำชิ้นงานไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

3.3.4 การทดสอบการทำความสะอาดกับแม่พิมพ์ที่ใช้งานจริง

- นำยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมาอัดกับแม่พิมพ์ที่ใช้งานจริงด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปยางที่อุณหภูมิ 175 °C และทำซ้ำจนกว่าแม่พิมพ์จะสะอาด
- เปรียบเทียบความสะอาดของแม่พิมพ์ที่ทำความสะอาดด้วยยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรที่อุณหภูมิขึ้นรูป 175 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขอบเขตการศึกษาออกเป็น 2 ตอนหลัก ๆ ด้วยกัน คือ

ตอนที่ 1 ศึกษาการลดต้นทุนโดยการเปรียบเทียบชนิดของยางหลัก (ยางอีพีดีเอ็มเปรียบเทียบกับยางเอสบีอาร์)

ตอนที่ 2 ศึกษาการลดต้นทุนด้วยสารตัวเติมซึ่งมี 4 ชนิด ได้แก่

- ซิลิกาชนิดตกตะกอน
- แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$)
- ดินขาว (Clay)
- พัมมิซ (Pumice)

ยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมในงานวิจัยนี้ จะถูกนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และประสิทธิภาพการทำความสะอาด ซึ่งผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

4.1) **ตอนที่ 1** ศึกษาการลดต้นทุนโดยการเปรียบเทียบชนิดของยางหลัก

จากโครงงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการปรับสูตรเพื่อดูประสิทธิภาพการทำความสะอาด โดยใช้ยางอีพีดีเอ็มเป็นยางล้างแม่พิมพ์ซึ่งมีราคาสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นถึงการลดต้นทุนของยางล้างแม่พิมพ์ โดยทำการทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบยางหลัก 2 ชนิด ได้แก่ ยางอีพีดีเอ็ม และยางเอสบีอาร์ ซึ่งยางเอสบีอาร์มีราคาถูกกว่า และเกรดของยางเอสบีอาร์ที่เลือกใช้นี้เป็นเกรดมาตรฐานที่นิยมใช้โดยทั่วไป ในที่นี้ยางทั้ง 2 สูตร ยังไม่มีการใส่สารทำความสะอาด เพื่อจะทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และนำมาใช้ในการเลือกสูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่เหมาะสม จากนั้นจะทำการศึกษาผลของสารทำความสะอาดที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ต่อไป ซึ่งผลการทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบยางหลัก 2 ชนิด แสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางหลัก 2 ชนิด (ยางอีพีดีเอ็ม กับยางเอสบีอาร์)

สมบัติเชิงกล	ชนิดของยางหลัก	
	ยางอีพีดีเอ็ม	ยางเอสบีอาร์
Tensile strength (MPa)	9.26 ± 1.9	3.87 ± 0.3
%Elongation at break	784.31 ± 141.2	51.72 ± 3.8
Rubber modulus ,M100 (MPa)	1.98 ± 0.1	n / a
Tear strength (MPa)	42.10 ± 8.0	9.30 ± 1.5
Hardness (Shore A)	52.40 ± 2.0	24.56 ± 2.2

จากตารางที่ 4.1 พบว่า การเปลี่ยนชนิดของยางหลักมีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ โดยยางล้างแม่พิมพ์ที่ชนิดยางหลักเป็นยางเอสบีอาร์จะมีค่า Tensile strength, % Elongation at break, Tear strength, Rubber modulus และ Hardness ต่ำกว่ายางล้างแม่พิมพ์ที่ชนิดยางหลักเป็นยางอีพีดีเอ็มเป็นอย่างมาก คาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากยางเอสบีอาร์มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างหลักมาก เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้มาก ส่งผลให้เกิดกลไกการเสียสภาพของยางได้ เนื่องจากการเสียสภาพของยางเอสบีอาร์เป็นแบบการตัดสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) ทำให้สายโซ่ของโมเลกุลสั้นลง น้ำหนักโมเลกุลลดลง จึงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่ายางอีพีดีเอ็ม

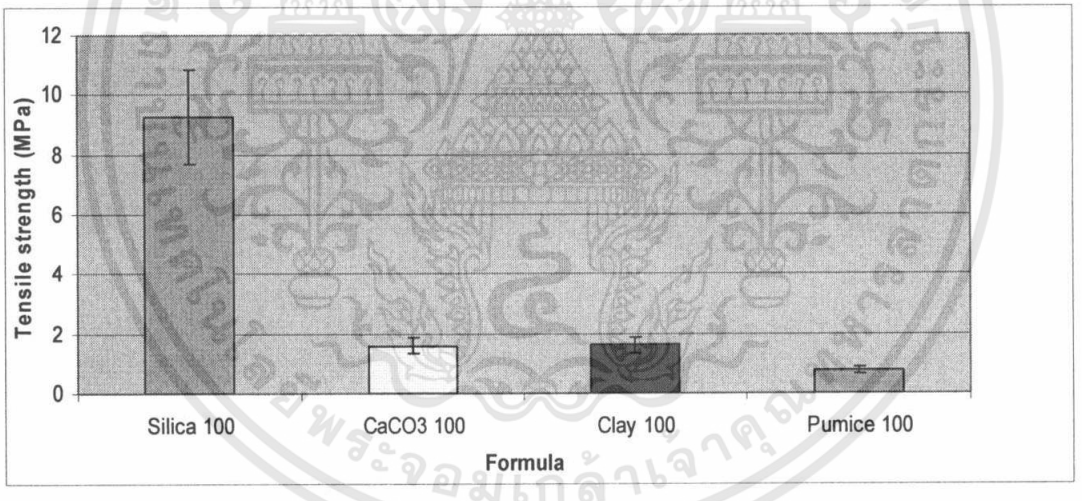
เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในเชิงเปรียบเทียบจึงได้ใช้สูตรยางผสมชนิดเดียวกัน จึงคาดว่าสูตรยางผสมนี้อาจยังไม่เหมาะสมเพียงพอสำหรับยางเอสบีอาร์ ค่าสมบัติเชิงกลที่ได้จึงต่ำกว่าที่ควรจะเป็นมาก ดังนั้นในตอนต่อไปจึงเลือกยางอีพีดีเอ็ม มาใช้ในการศึกษาผลของชนิดและอัตราส่วนของสารตัวเติม เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางเอสบีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2) **ตอนที่** 2 ศึกษาการลดต้นทุนด้วยสารตัวเติมซึ่งมี 4 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาชนิดตกตะกอน แคลเซียม คาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ

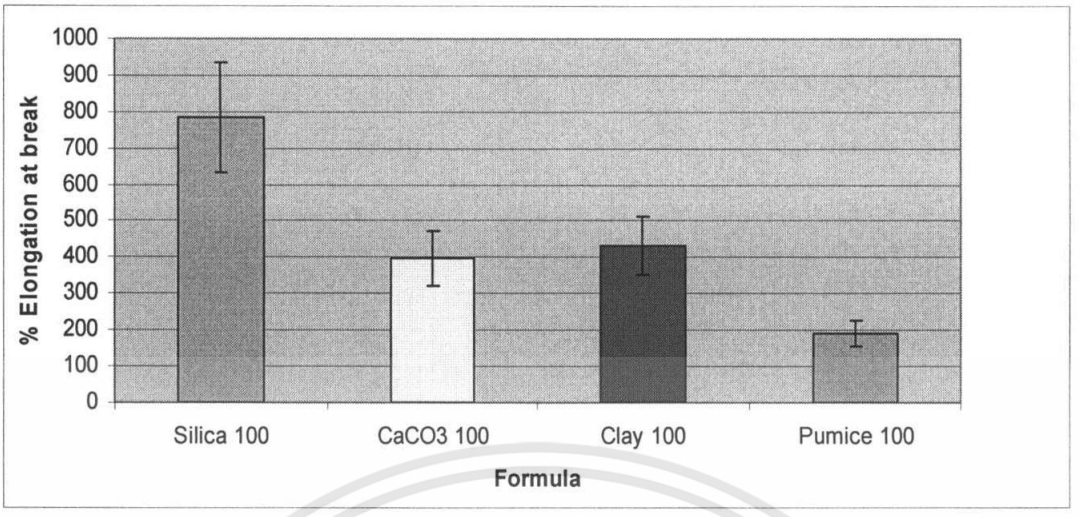
จากตอนที่ 1 ทำการเลือกยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่ายางเอสบีอาร์ มาใช้ในการศึกษาผลของการปรับชนิดของสารตัวเติมเพื่อลดต้นทุน โดยโครงงานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้สารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียวซึ่งเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ราคาแพง งานวิจัยนี้จึงเกิดความคิดที่จะเลือกใช้สารตัวเติมอนินทรีย์ชนิดอื่นที่มีราคาถูกกว่า ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาวและพัมมิซ มาใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ ซึ่งการใช้สารตัวเติมต่างชนิดกันจะมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์แตกต่างกัน เนื่องจากขนาดอนุภาค และความสามารถในการเสริมแรงของสารตัวเติมชนิดนั้นๆ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1) **ผลของชนิดสารตัวเติม**

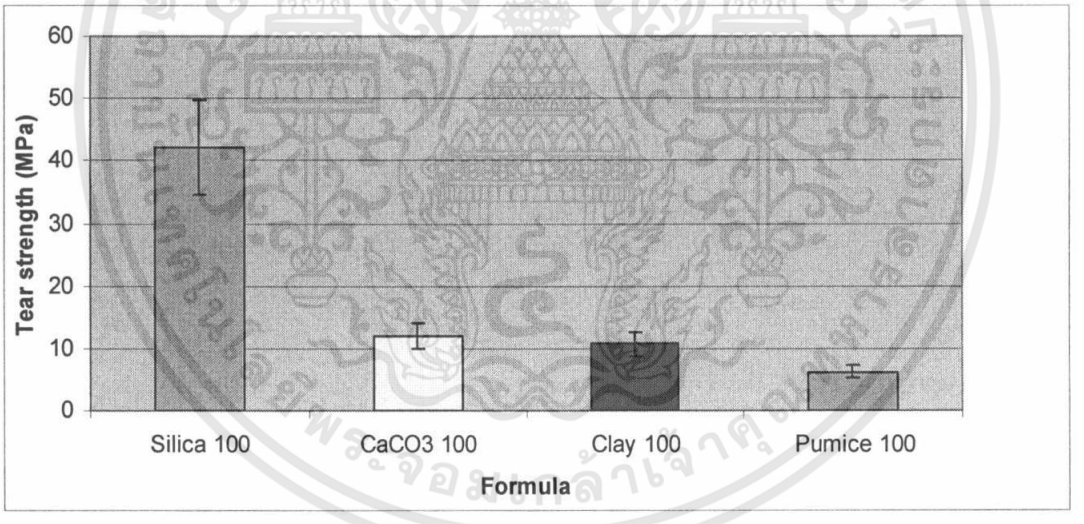


รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

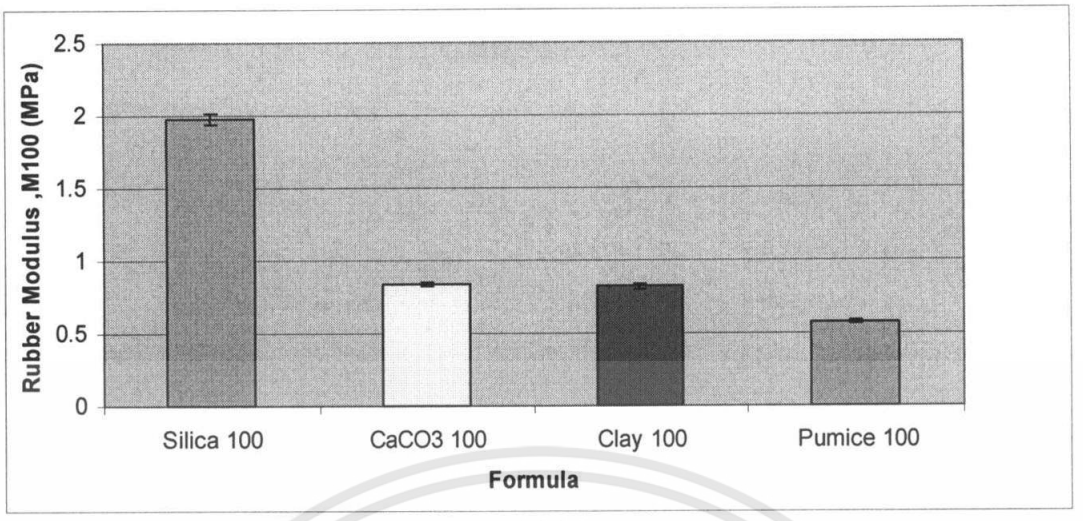


รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม

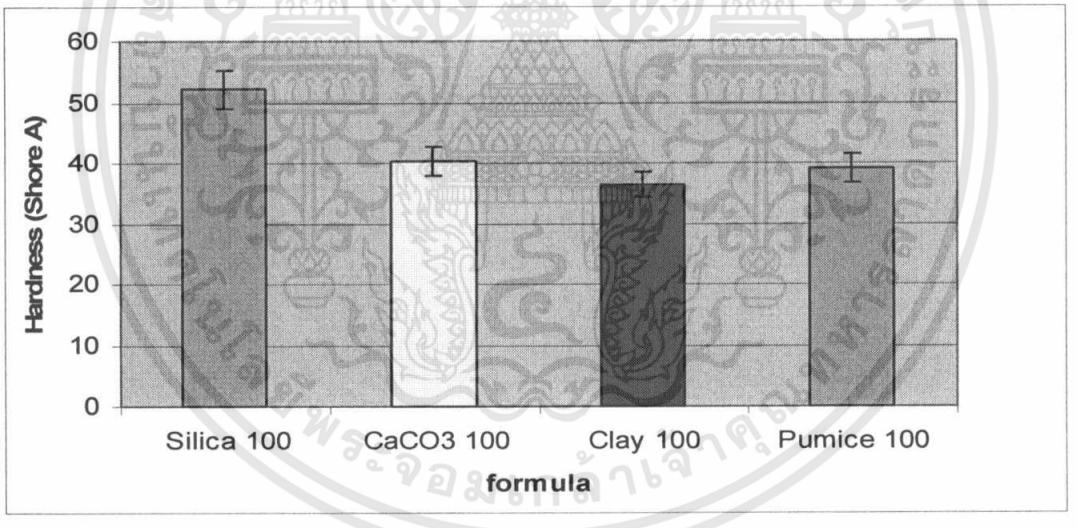


รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rubber modulus (M100) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกด (Hardness) กับชนิดของสารตัวเติมในยางอีพีดีเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 – 4.5 แสดงผลของชนิดสารตัวเติม ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลยางล้างแม่พิมพ์ พบว่า การเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมมีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีสารตัวเติมเป็นซิลิกาจะมีค่าสมบัติเชิงกลสูงสุด ไม่ว่าจะเป็น Tensile strength, % Elongation at break, Tear strength และ Hardness ทั้งนี้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ สารตัวเติมซิลิกา ซึ่งเป็นเกรดที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ ที่ใช้เกรดขนาดอนุภาคใหญ่ ราคาถูกเพื่อเป็นการลดต้นทุนให้กับยางล้างแม่พิมพ์ จึงทำให้สารตัวเติมซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงให้กับยาง ทำให้ยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ ซิลิกาเป็นสารตัวเติมมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เมื่อเทียบกับสารตัวเติมชนิดอื่นที่ทดลองเปรียบเทียบ

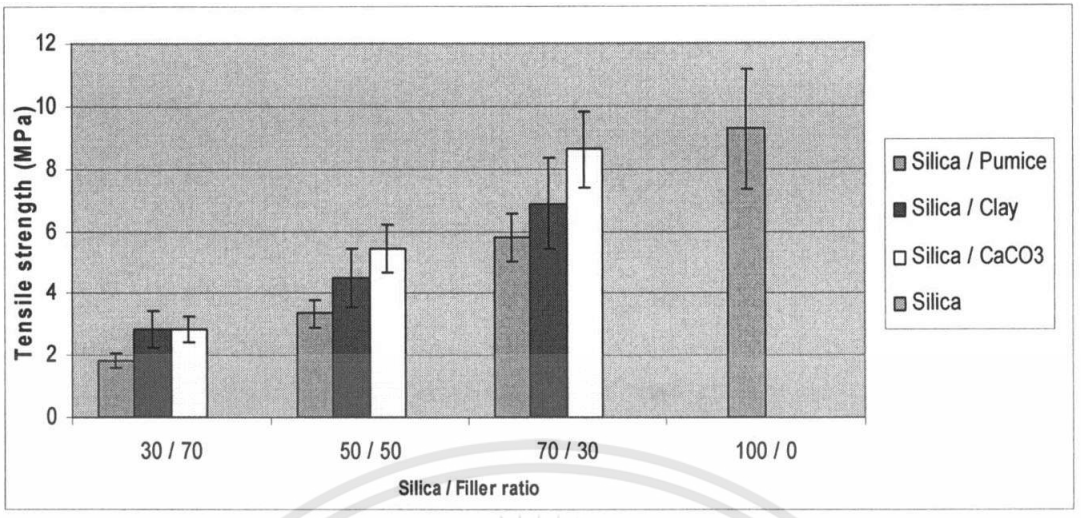
นอกจากนี้ในสูตรยางผสมมีการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างซิลิกาที่มีขั้วกับยางอีพีดีเอ็มที่ไม่มีขั้วให้ยึดเกาะกันได้ดี ซึ่งสารคู่ควบนี้ไม่ได้ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้สารตัวเติมซิลิกามีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นมาก

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักคือลดต้นทุนของยางผสมสูตร โดยทั้งนี้สูตรที่มีต้นทุนต่ำเหล่านี้อาจไม่จำเป็นต้องมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม แค่มีสมบัติเชิงกลบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด ที่สูงเพียงพอสำหรับการใช้งานบางลักษณะ เช่น แม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่มีรูปร่างซับซ้อน หรือการดึงออกจากแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการทดลองอีกส่วนหนึ่งที่จะศึกษาผลของอัตราส่วนที่เหมาะสมกับซิลิกาโดยจะควบคุมปริมาณสารตัวเติมไว้ที่ 60 phr

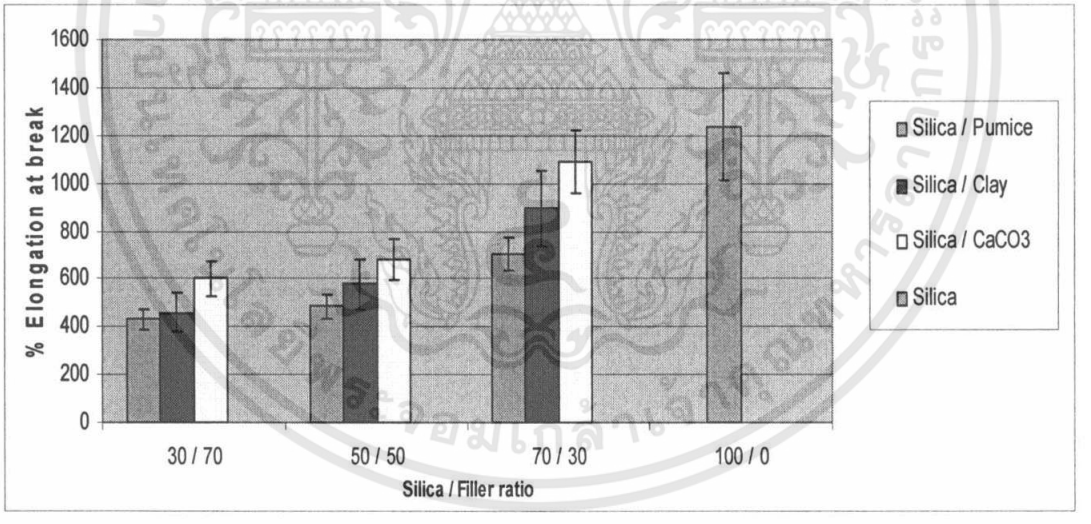
4.2.2) **ผลของอัตราส่วนสารตัวเติม**

จากตอนที่ 1 ทำการเลือกยางอีพีดีเอ็มมาใช้ในการศึกษาผลของสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับสารตัวเติมชนิดอื่น ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาวและพัมมิซ ในอัตราส่วนต่างๆ และควบคุมปริมาณสารตัวเติมผสมทั้งหมดไว้ที่ 60 phr ซึ่งการใช้สารตัวเติมผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันนั้น จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์แตกต่างกันไปด้วย ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

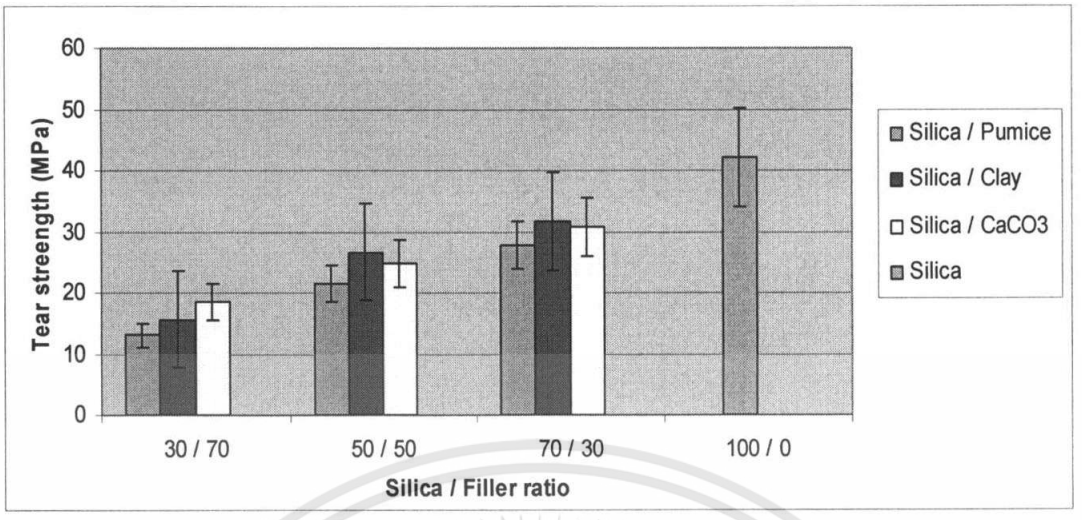


รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์

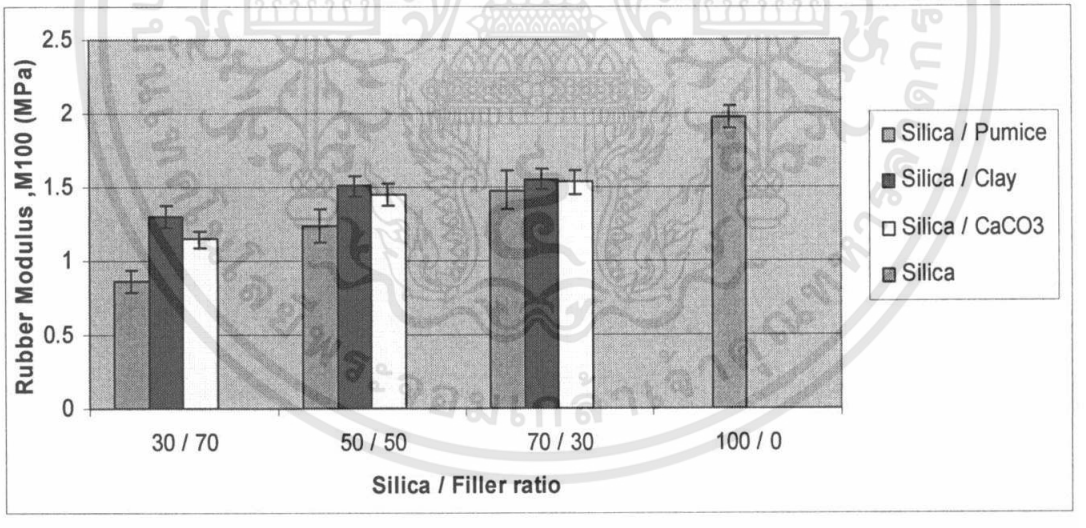


รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

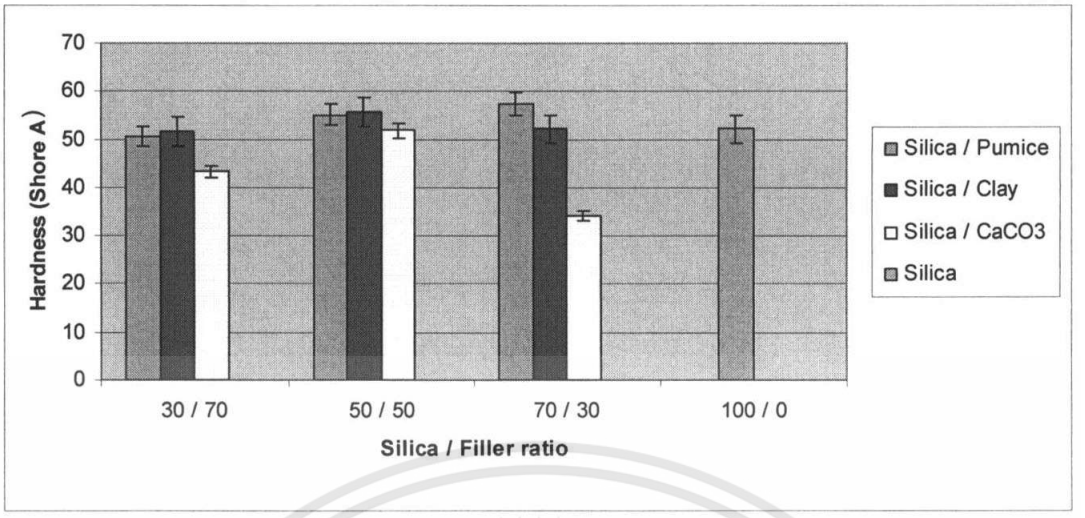


รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rubber modulus (M100) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกด (Hardness) กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในยางล้างแม่พิมพ์

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ทำให้ทราบว่าชนิดและปริมาณของสารตัวเติมมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ จากรูปที่ 4.6 – 4.8 จะเห็นได้ว่า สารตัวเติมแบบผสมจะทำให้ยางล้างแม่พิมพ์มีค่า Tensile strength, % Elongation at break และ Tear strength ต่ำกว่า ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ซึ่งไม่เสริมแรง เมื่อนำมาผสมกับซิลิกาซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก จะทำให้การเสริมแรงของซิลิกาลดน้อยลง จึงส่งผลให้ค่า Tensile strength ต่ำลงด้วย และเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาในสารตัวเติมผสม ค่า Tensile strength, % Elongation at break และ Tear strength จะเพิ่มขึ้นตาม เนื่องมาจากการที่ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่เสริมแรงนั่นเอง

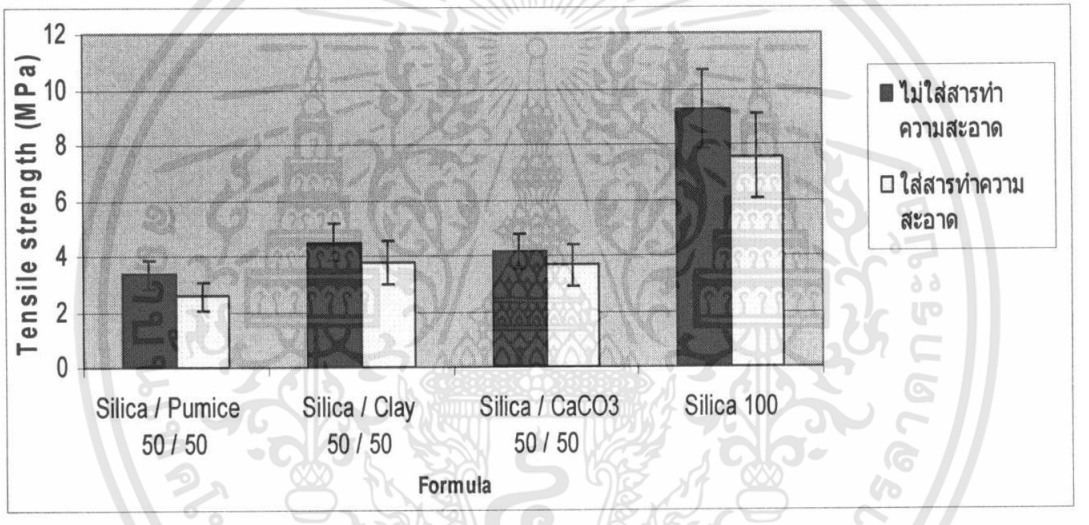
จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าสารตัวเติมแบบผสม จะทำให้ยางล้างแม่พิมพ์มีค่าความแข็ง ซึ่งได้แก่ค่า Rubber modulus และ Hardness ต่ำกว่า ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ทำให้ยางล้างแม่พิมพ์มีความแข็งมากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น (รูปที่ 4.5) ดังนั้นถ้าเพิ่มปริมาณซิลิกา ความแข็งจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

ดังนั้นจึงได้เลือกอัตราส่วนสารตัวเติมที่เหมาะสมคือ 50 / 50 ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนได้และมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ต่ำเกินไปต่อการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

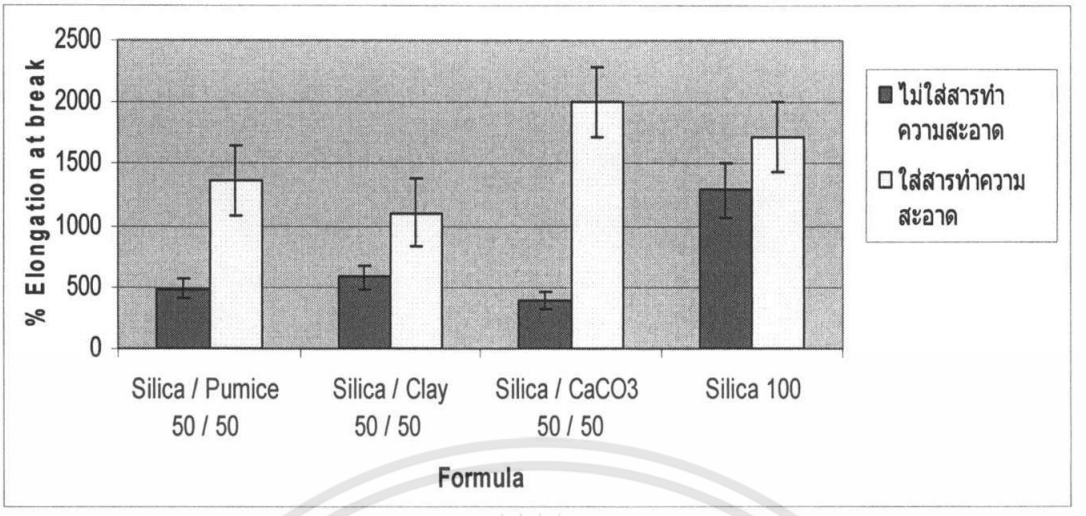
4.2.3) ผลของสารทำความสะอาดที่มีต่อยางล้างแม่พิมพ์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ในตอนที่ผ่านมายังไม่ได้มีการใส่สารทำความสะอาด เพื่อที่จะเน้นศึกษาถึงผลของชนิดยาง ผลของชนิดและอัตราส่วนสารตัวเติมผสม ที่มีต่อสมบัติเชิงกล จากการที่งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาถึงการลดต้นทุนเป็นหลัก จึงได้เลือกสูตรยางที่เหมาะสมในเรื่องของต้นทุน และมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ต่ำจนเกินไปมา 3 สูตร ได้แก่ ยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับพัมมิซ ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วน 50 / 50 มาทำการใส่สารทำความสะอาด เพื่อศึกษาผลของสารทำความสะอาดที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

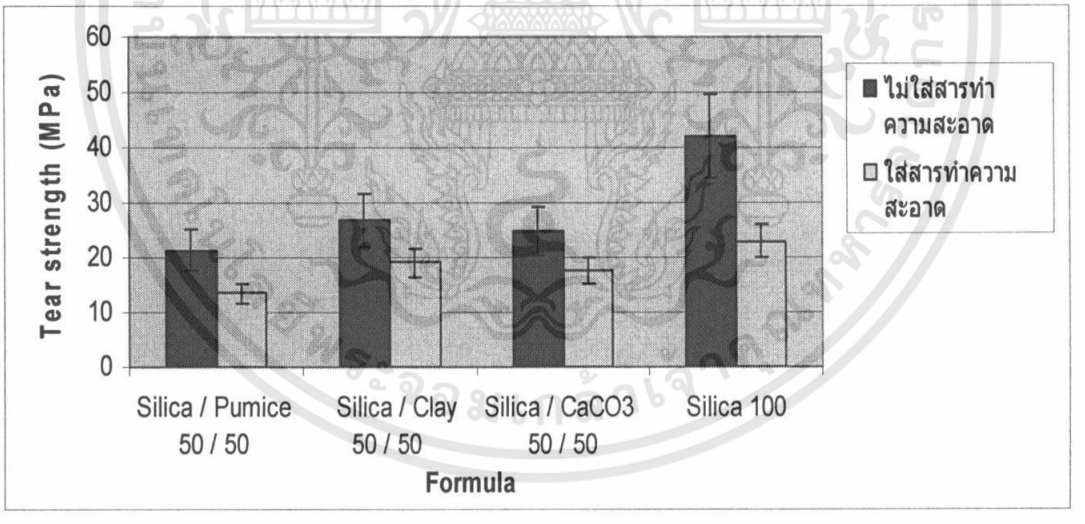


รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของสูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

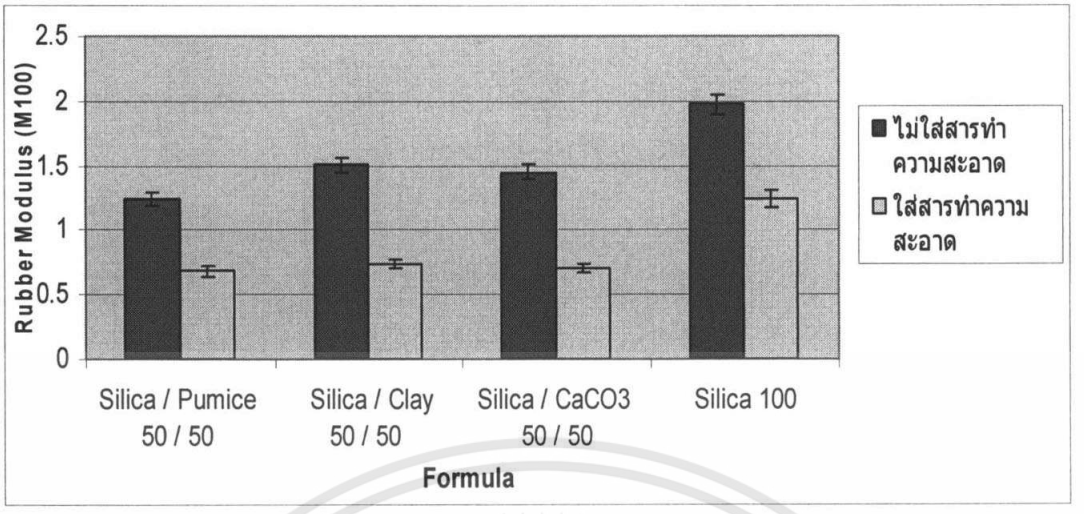


รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของสูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด

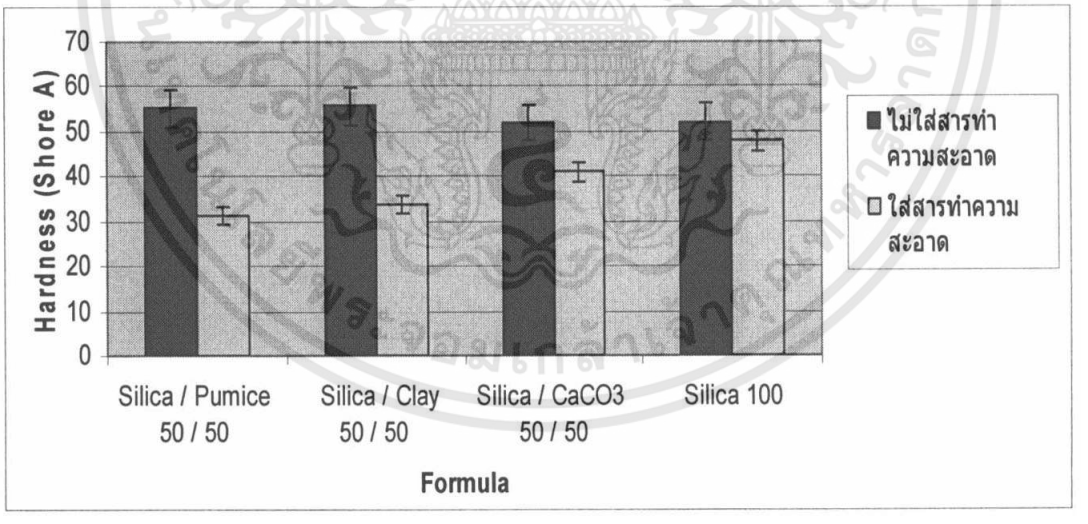


รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Rubber modulus (M100) ของยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับใส่สารทำความสะอาด



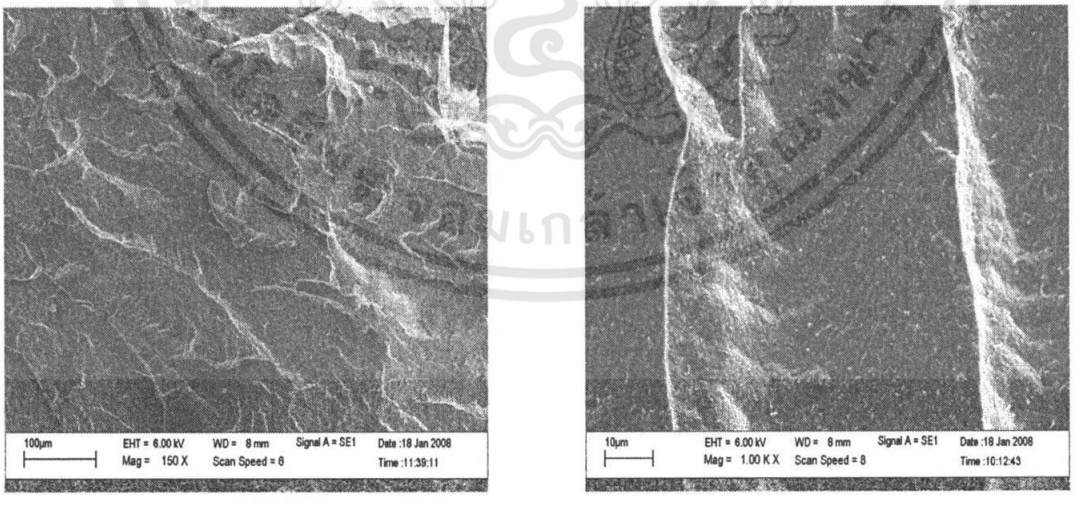
รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกด (Hardness) ของยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารทำความสะอาดเทียบกับที่ใส่สารทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการใส่สารทำความสะอาดจะส่งผลต่อสมบัติของยางล้างแม่พิมพ์ กล่าวคือ การใส่สารทำความสะอาดทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของยางล้างแม่พิมพ์ต่ำลง (รูปที่ 4.11 และ 4.13) เนื่องจาก สารทำความสะอาดที่ใส่เข้าไปนอกจากจะทำหน้าที่กำจัดสิ่งสกปรกออกจากแม่พิมพ์แล้ว ยังทำหน้าที่คล้ายพลาสติไซซอร์ (Plasticizer) ซึ่งเป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของยาง ทำให้สายโซ่ของยางอยู่ห่างกันมากขึ้น เมื่อทำการเชื่อมโยงยาง ความหนาแน่นการเชื่อมโยงจึงลดลง ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ต่ำลง แต่ในทางตรงข้ามกัน เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) จะมีค่ามากขึ้น (รูปที่ 4.12) จะเห็นได้ว่า ยางล้างแม่พิมพ์ที่ใส่สารทำความสะอาด จะมีความแข็งลดลงเมื่อเทียบกับยางล้างแม่พิมพ์ที่ยังไม่ใส่สารทำความสะอาด (รูปที่ 4.14 และ 4.15) แสดงให้เห็นว่าสารทำความสะอาด ทำหน้าที่คล้ายพลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) ช่วยเพิ่มความนิ่มให้กับยางล้างแม่พิมพ์นั่นเอง

4.3) สัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์

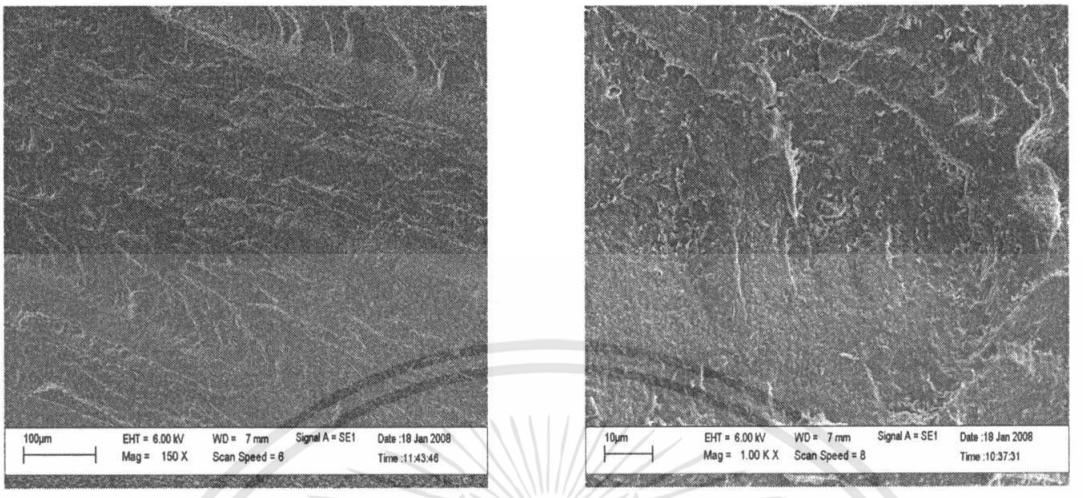
ผลของการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM เพื่อดูการกระจายตัวของสารตัวเติม ในยางล้างแม่พิมพ์ที่กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) และกำลังขยายสูง (1,000 เท่า) และทำการหักที่อุณหภูมิต่ำ แสดงได้ดังนี้



(a) (b)

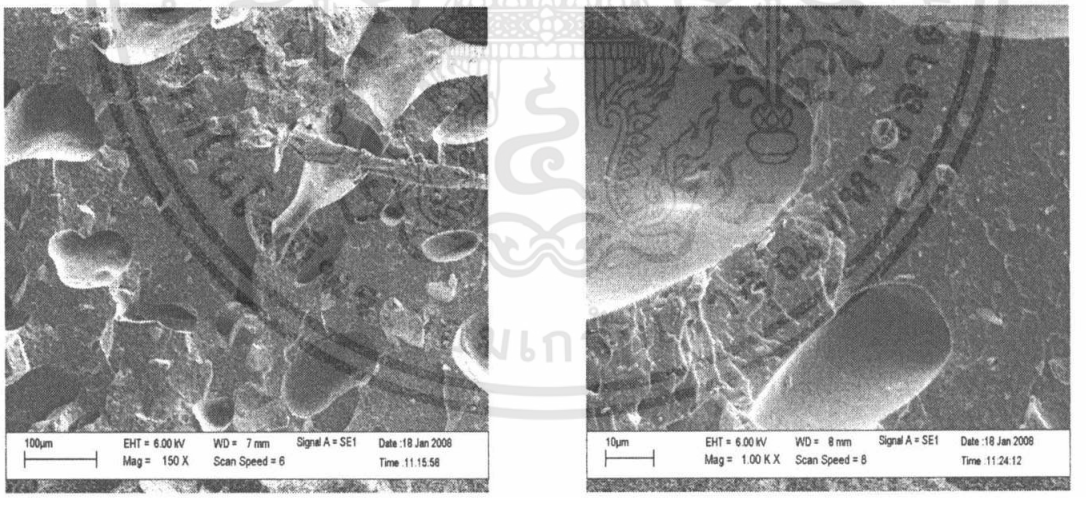
รูปที่ 4.16 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ โดยใช้ยางอีพีดีเอ็มที่มีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

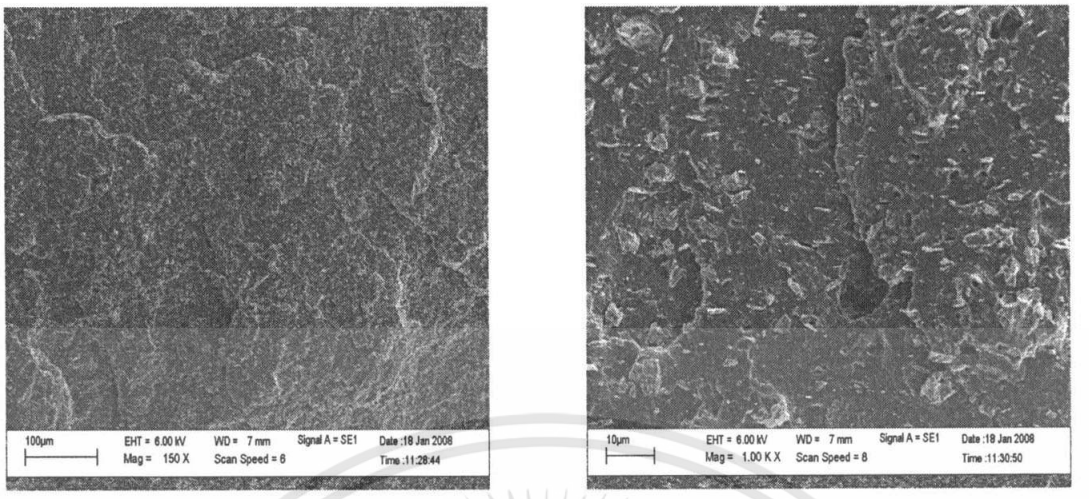
รูปที่ 4.17 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ โดยใช้ยางเอสบีอาร์ที่มีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)



(a) (b)

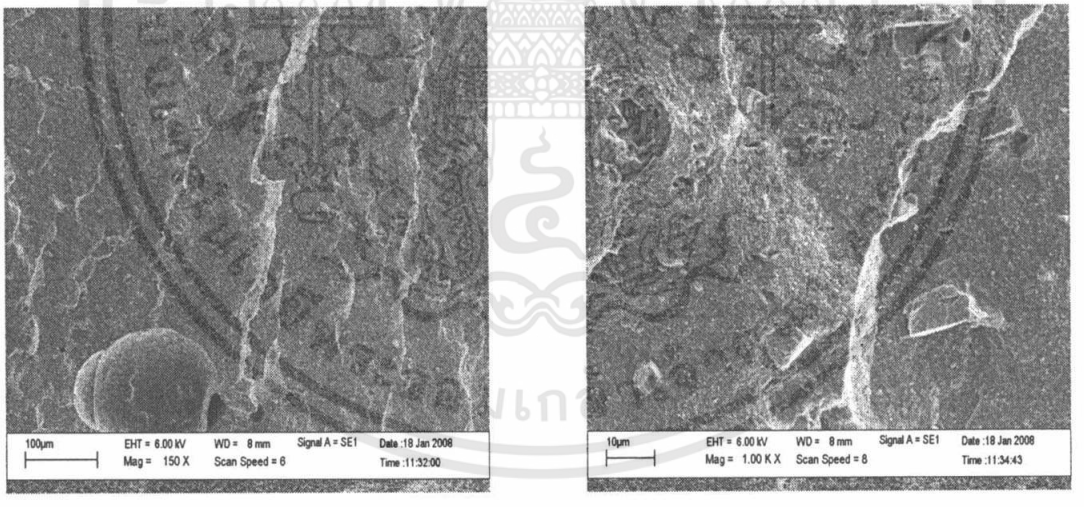
รูปที่ 4.18 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมพัมมิซชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

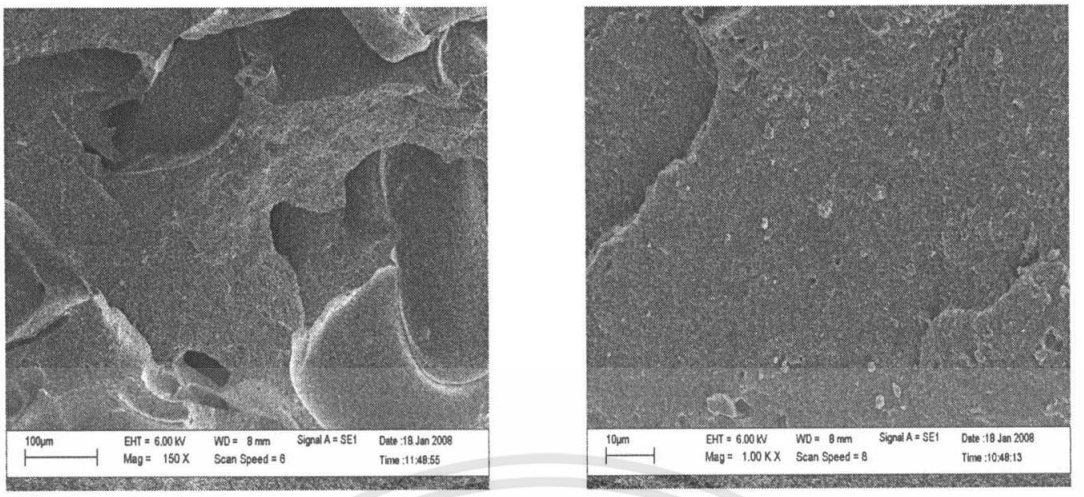
รูปที่ 4.19 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมดินขาวชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)



(a) (b)

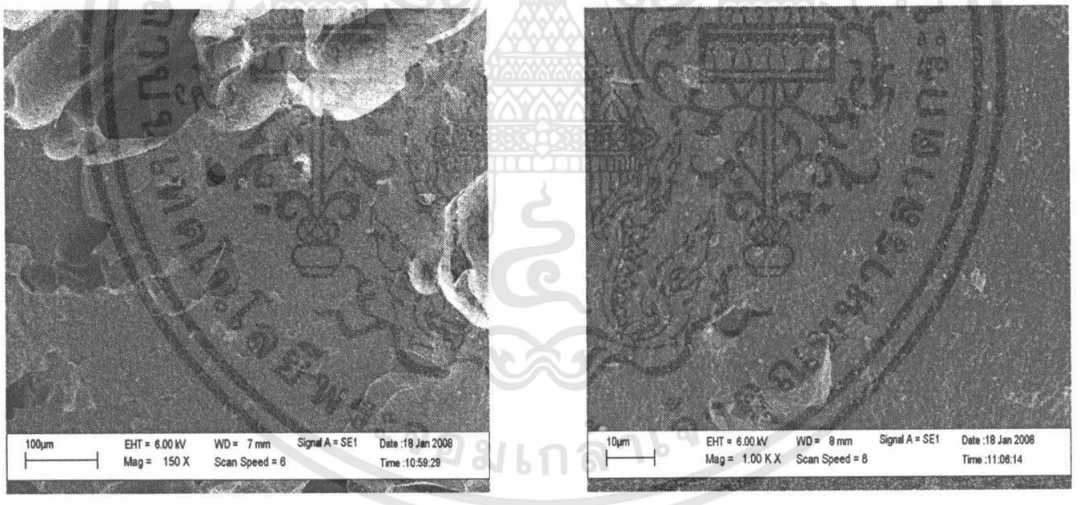
รูปที่ 4.20 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดเดียว (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

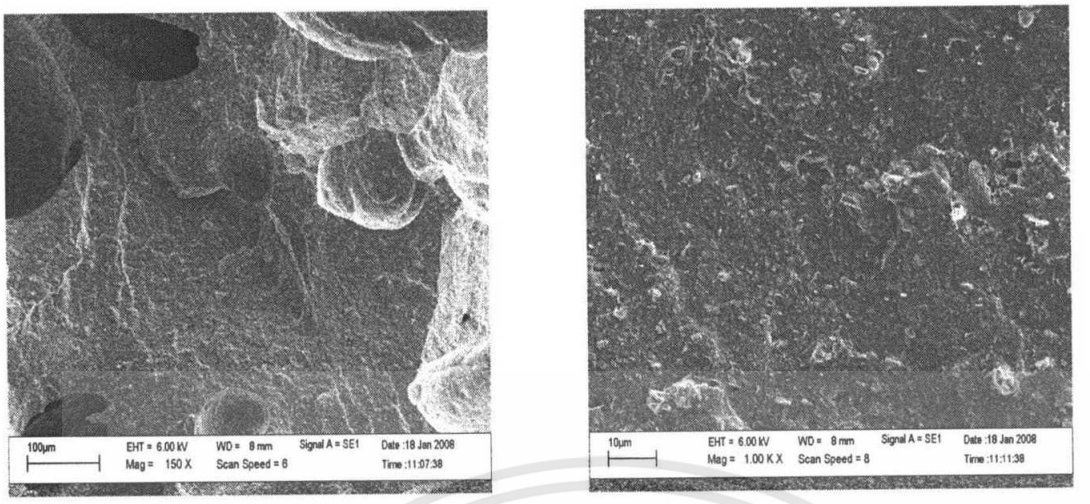
รูปที่ 4.21 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมซิลิกาผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 50 / 50 (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)



(a) (b)

รูปที่ 4.22 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมซิลิกาผสมกับพัมมิซในอัตราส่วน 50 / 50 (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) (b)

รูปที่ 4.23 SEM micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดลดต้นทุน โดยใช้ยางอีพีดีเอ็ม ที่มีสารตัวเติมซิลิกาผสมกับดินขาวในอัตราส่วน 50 / 50 (a) กำลังขยายต่ำ (150 เท่า) (b) กำลังขยายสูง (1,000 เท่า)

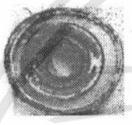
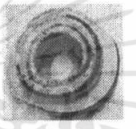
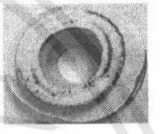
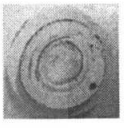
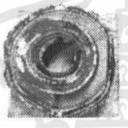
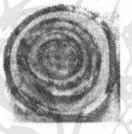
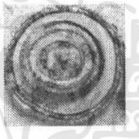
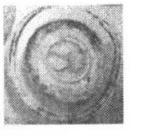
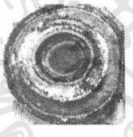
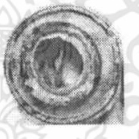
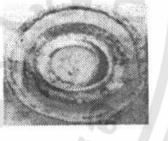
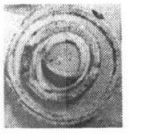
จากรูปที่ 4.16 – 4.17 พบว่าสารตัวเติมซิลิกาในยางอีพีดีเอ็มและยางเอสบีอาร์มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ เข้ากันได้ดีกับเนื้อยาง พื้นผิวชิ้นงานบริเวณที่ทำการหักค่อนข้างเรียบ เนื่องจากการแตกหักแบบ Cohesive failure คือ การหักที่เมทริกซ์ (ยาง) มีเพียงส่วนน้อยที่หักที่รอยต่อระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติม (Adhesive failure) เนื่องจากการยึดเกาะที่ดีระหว่างวัฏภาคกระจาย (สารตัวเติม) กับวัฏภาคต่อเนื่อง (ยาง) จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมชนิดเดียวแบบอื่น ซึ่งได้แก่ พัมมิซ ดินขาว และแคลเซียมคาร์บอเนต (ดังรูปที่ 4.18 - 4.20) พบว่าบริเวณที่ทำการหักมีพื้นผิวขรุขระกว่า ซึ่งแสดงถึงการยึดเกาะที่ไม่ดีระหว่างสารตัวเติมกับยาง จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลแย่ลง

นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่า พัมมิซจะทำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อยาง (รูปที่ 4.18 และ 4.22) เนื่องจากการที่พัมมิซเป็นสารตัวเติมที่มีรูพรุน ความร้อนจากการขึ้นรูปจะทำให้อากาศที่อยู่ภายในรูพรุนถูกปลดปล่อยออกมาที่เนื้อยางและถูกกักเก็บในชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4) ประสิทธิภาพการทำความสะอาดแม่พิมพ์

การทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดยางล้างแม่พิมพ์ผสมสูตร ที่มีชนิดสารตัวเติม และอัตราส่วนสารตัวเติมที่แตกต่างกัน 4 สูตร นำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปยาง โดยใช้แม่พิมพ์ของโรงงานอุตสาหกรรม (SK Polymer Co.Ltd.) ที่มีความสกปรก สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ ที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส และเวลาในการขึ้นรูปขึ้นกับระยะเวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตร (ประมาณ 2 – 5 นาที) ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง โดยแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นงานยางธรรมชาติ ซึ่งทำเป็นยางรองขาตู้เย็น แสดงได้ดัง รูปที่ 4.25

	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5
ยางEPDMสูตร Silica 100					
ยางEPDMสูตร Si / CaCO3 50 / 50					
ยางEPDMสูตร Si / Clay 50 / 50					
ยางEPDMสูตร Si / Pumice 50 / 50					

รูปที่ 4.24 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ผสมสูตรที่แตกต่างกันในการล้าง 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการทำความสะอาดกับแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการขึ้นรูปจริง (รูปที่4.25) เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่ายางล้างแม่พิมพ์ที่ใส่สารตัวเติมผสมในอัตราส่วน 50 / 50 จะมีคราบสกปรกติดออกมาใกล้เคียงกับยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเดียว โดยในการล้างครั้งที่ 1 พบว่า มีคราบสกปรกติดออกมากับยางล้างแม่พิมพ์เป็นปริมาณมากทำให้ยางล้างแม่พิมพ์มีคราบสีดำ และพบว่าในการล้างครั้งที่ 2 - 5 ยังคงมีคราบสกปรกติดอยู่แต่มีในปริมาณที่น้อยลง เนื่องจากแม่พิมพ์สะอาดขึ้นนั่นเอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสารตัวเติมผสมที่ใส่ลงในยางล้างแม่พิมพ์ไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดแตกต่างกันมากนัก

สำหรับยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้สารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกากับพัมมิซ ในอัตราส่วน 50 /50 พบว่า เมื่อทำการดึงยางล้างแม่พิมพ์ออกจากแม่พิมพ์ ยางล้างแม่พิมพ์เกิดการฉีกขาดติดอยู่ในเครื่องขึ้นรูป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีพอนั่นเอง

จากผลการทดลองทั้งหมด พบว่าสูตรยางที่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นยางล้างแม่พิมพ์ ได้แก่ ยางอีพีดีเอ็มที่มีซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกากับดินขาวเป็นสารตัวเติมในอัตราส่วน 50 / 50 ซึ่งคาดว่ามีราคาถูกกว่าการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเพียงชนิดเดียว แต่ยังคงมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้างแม่พิมพ์

การคำนวณการลดต้นทุนจากปริมาตรยางที่ใช้ล้างแม่พิมพ์ในปัจจุบันเปรียบเทียบกับยางล้างแม่พิมพ์ที่มีสารตัวเติมผสมของซิลิกากับสารตัวเติมอื่นๆ ในอัตราส่วน 50 / 50 ในปริมาณรวม 60 phr สามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.2 การคำนวณราคายางล้างแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัม โดยมีสารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียว (60 phr) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.12

สารเคมี	phr	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/ลิตร)
EPDM NORDEL®IP4520	100	110	51.74	-
TMQ	1	93	0.44	-
Tokusil® 255 G	60	35	9.88	-
PEG	3.6	380	6.43	-
Oil P-150	10	39	1.95	-
ZnO (RA)	7	47	1.83	-
Stearic acid	2	46	0.43	-
SR-350	2	337	3.17	-
TiO_2	2	93	0.87	-
DCP	5	140	3.29	-
สารทำความสะอาด	20	110	10.35	-
รวม	212.6	1430	**90.38**	**101.22**

หมายเหตุ - ราคาวัตถุดิบ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2551

- ไม่คิดค่าแรงงานและค่าไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การคำนวณราคายางล้างแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัม โดยมีสารตัวเติมผสมเป็นซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนต (50 / 50 รวม 60 phr) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.145

สารเคมี	phr	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/ลิตร)
EPDM NORDEL®IP4520	100	110	51.74	-
TMQ	1	93	0.44	-
Tokusil® 255 G	30	35	4.94	-
$CaCO_3$ชนิดเคลือบด้วยกรดสเตียริก	30	9	1.27	-
PEG	3.6	380	6.43	-
Oil P-150	10	39	1.95	-
ZnO (RA)	7	47	1.83	-
Stearic acid	2	46	0.43	-
SR-350	2	337	3.17	-
TiO_2	2	93	0.87	-
DCP	5	140	3.29	-
สารทำความสะอาด	20	110	10.35	-
รวม	212.6	1439	86.71	99.28

หมายเหตุ - ราคาวัตถุดิบ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2551

- ไม่คิดค่าแรงงานและค่าไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4. การคำนวณราคายางล้างแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัม โดยมีสารตัวเติมผสมเป็นซิลิกากับดินขาว (50 / 50 รวม 60 phr) ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.135

สารเคมี	phr	ราคาวัตถุดิบ (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/กก.)	ราคาสูตรยาง (บาท/ลิตร)
EPDM NORDEL®IP4520	100	110	51.74	-
TMQ	1	93	0.44	-
Tokusil® 255 G	30	35	4.94	-
Clay	30	30	4.23	-
PEG	3.6	380	6.43	-
Oil P-150	10	39	1.95	-
ZnO (RA)	7	47	1.83	-
Stearic acid	2	46	0.43	-
SR-350	2	337	3.17	-
TiO_2	2	93	0.87	-
DCP	5	140	3.29	-
สารทำความสะอาด	20	110	10.35	-
รวม	212.6	1460	89.67	101.77

หมายเหตุ - ราคาวัตถุดิบ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2551

- ไม่คิดค่าแรงงานและค่าไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 - 4.4 พบว่าถ้าใช้สารตัวเติมผสมของซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีราคาถูกลงกว่าการใช้สารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียวเป็นจำนวน 3.67 บาทและถ้าใช้สารตัวเติมผสมของซิลิกากับดินขาวจะมีราคาถูกลงกว่าการใช้สารตัวเติมซิลิกาชนิดเดียวเป็นจำนวน 0.71 บาท ดังนั้นสารตัวเติมผสมของซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนตและสารตัวเติมผสมของซิลิกากับดินขาวในอัตราส่วน 50 / 50 สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ โดยมีสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน สามารถนำไปผลิตยางล้างแม่พิมพ์ที่เป็นเกรดลดต้นทุน ซึ่งใช้งานได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรมและการค้าเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 4.5 แสดงราคายางล้างแม่พิมพ์รวม โดยมีสารตัวเติมผสมเป็นซิลิกากับ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกากับดินขาว

สูตรยาง	ราคาสูตรยาง (บาท/Kg)	ราคาสูตรยาง (บาท/ลิตร)
ยางอีพีดีเอ็ม (ซิลิกา)	90.38	101.22
ยางอีพีดีเอ็ม (ซิลิกาผสมแคลเซียมคาร์บอเนต 50 /50)	86.71	99.28
ยางอีพีดีเอ็ม (ซิลิกาผสมดินขาว 50 / 50)	89.67	101.77

- จากตารางที่ 4.5 สูตรยางที่มีความเหมาะสมในการใช้เป็นยางล้างแม่พิมพ์ ได้แก่ ยางอีพีดีเอ็มที่มีซิลิกากับแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารตัวเติมผสมในอัตราส่วน 50 / 50 ซึ่งมีราคาถูกที่สุด แต่ยังคงมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดใกล้เคียงกัน ซึ่งสูตรยางที่เลือกนี้อาจไม่ได้มีสมบัติที่ดีเยี่ยมจึงเหมาะกับการนำไปใช้ล้างแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่แบ่งเป็น 2 ตอน จึงสามารถสรุปผลการทดลองได้เป็น 2 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาการลดต้นทุนโดยการเปรียบเทียบชนิดของยางหลัก

- การใช้ยางเอสบีอาร์แทนที่ยางอีพีดีเอ็มเดิมในสูตรยางล้างแม่พิมพ์ ทำให้สมบัติเชิงกลที่มีผลต่อการนำยางล้างแม่พิมพ์ออกจากแม่พิมพ์มีค่าต่ำกว่าสูตรที่ใช้ยางอีพีดีเอ็มมาก โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) เนื่องจากสูตรที่ใช้นี้ ออกแบบมาสำหรับยางอีพีดีเอ็มโดยเฉพาะ ดังนั้นยางเอสบีอาร์สูตรในงานวิจัยนี้จึงไม่เหมาะที่จะผลิตเป็นยางล้างแม่พิมพ์ในโรงงานอุตสาหกรรม ต้องมีการปรับสูตรโดยเฉพาะระบบสารเชื่อมโยง และศึกษาพัฒนาต่อไป

ตอนที่ 2 ศึกษาการลดต้นทุนด้วยสารตัวเติมซึ่งมี 4 ชนิด ได้แก่ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ

- สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ ถึงแม้จะมีราคาถูก ซึ่งทำให้ต้นทุนของยางล้างแม่พิมพ์ถูกลงด้วย แต่สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ทำให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่า เช่นค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) เมื่อเทียบกับสารตัวเติมซิลิกา เนื่องจากซิลิกาเกรดตกตะกอนที่ใช้ เป็นสารตัวเติมที่เสริมแรง แต่แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง เนื่องจากเป็นเกรดที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ ใช้เพิ่มเนื้อ ลดต้นทุน จึงไม่เหมาะที่จะทำยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และพัมมิซ เพียงชนิดเดียว

- การใช้สารตัวเติมซิลิกาผสมสารตัวเติมชนิดอื่นทำให้สมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเพียงชนิดเดียว หากสัดส่วนซิลิกาในสารตัวเติมผสมลดลงสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์จะลดลง

- จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดกับแม่พิมพ์สกปรกในโรงงานยาง พบว่ายางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้สารตัวเติมผสมยังคงมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดที่ดีใกล้เคียงกับยางล้างแม่พิมพ์ที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเดียว

- สูตรยางล้างแม่พิมพ์สูตรลดต้นทุนนี้จะเหมาะที่จะใช้กับแม่พิมพ์ที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน เพื่อหลีกเลี่ยงการฉีกขาดขณะดึงยางล้างแม่พิมพ์ ออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองมีข้อเสนอแนะซึ่งจะสามารถปรับปรุงสูตรยางล้างแม่แบบให้มีสมบัติดีขึ้น ดังนี้

- การศึกษาโดยใช้เครื่องผสมที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เช่น เครื่องผสมแบบ Internal mixers และปรับปรุงสภาวะการผสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาด
- การศึกษาการปรับสูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ยางหลักเป็นยางเอสบีอาร์ เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและลดต้นทุน เนื่องจากราคายางอีพีดีเอ็มมีราคาสูงกว่ายางเอสบีอาร์
- การศึกษาอายุการเก็บรักษาของยางล้างแม่พิมพ์ซึ่งใช้ สารทำความสะอาด และผลของอายุการเก็บรักษาต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด เนื่องจากระหว่างการเก็บรักษาสารทำความสะอาดมีการระเหยออกไปอยู่ตลอดแม้ว่าจะเป็นที่อุณหภูมิห้องก็ตาม
- ทำการทดสอบกับแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนมากและน้อย เพื่อศึกษาถึงความแข็งแรงฉีกขาดในขณะดึงยางออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. อิทธิพล แจ้งชัด. 2542. **เทคโนโลยีการยาง**. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2. พงษ์ธร แซ่อุย. 2547. **ยาง : ชนิด สมบัติและการใช้งาน**. กรุงเทพฯ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
3. พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. **สารเคมีสำหรับยาง**. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
4. ขนิษฐา ศรีประทุม และมนต์สุดา บุรารักษ์. 2546. **โครงงานพิเศษเรื่องการศึกษายางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
5. ณัฐณิชา เฮงประภากร และ มลสิริ ชีประวัติชัย.2547. **โครงงานพิเศษเรื่องการปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
6. นพรัตน์ ศิริแก้วกาญจน์ , ปรม ศรีวิสุทธิ์ และ อยุทธ์ วิทย์สุธรรมกุล 2548 **โครงงานพิเศษเรื่องการพัฒนาสูตรยางเพื่อลดต้นทุนยางล้างแม่แบบชนิดอัดขึ้นรูป**. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
7. นายปิยะ ดอกรัก , นายพงษ์ธาดา คุรุกิจกำจรและนายสรวิชญ์ เบญจฤทธิวงศ์. 2549 **โครงงานพิเศษ เรื่อง การพัฒนาสูตรยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม.กรุงเทพฯ**: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
8. UNITED STATES PATENT. 2004. **United States Patent 5563119**. [Online]. Available: www.freepatentsonline.com/5563119.html
9. Dow Chemical Company . 2008. **EPDM NORDEL® IP 4520**. [Online]. Available: www.dowplastics.com
10. Pacific Pumice Supplies Ltd.2005. **Pumice**. [Online]. Available: http://www.pumice.co.nz/concrete.html
11. Great Pacific Pumice Inc. **Pumice**. [Online]. Available: http://www.pumice.ca

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

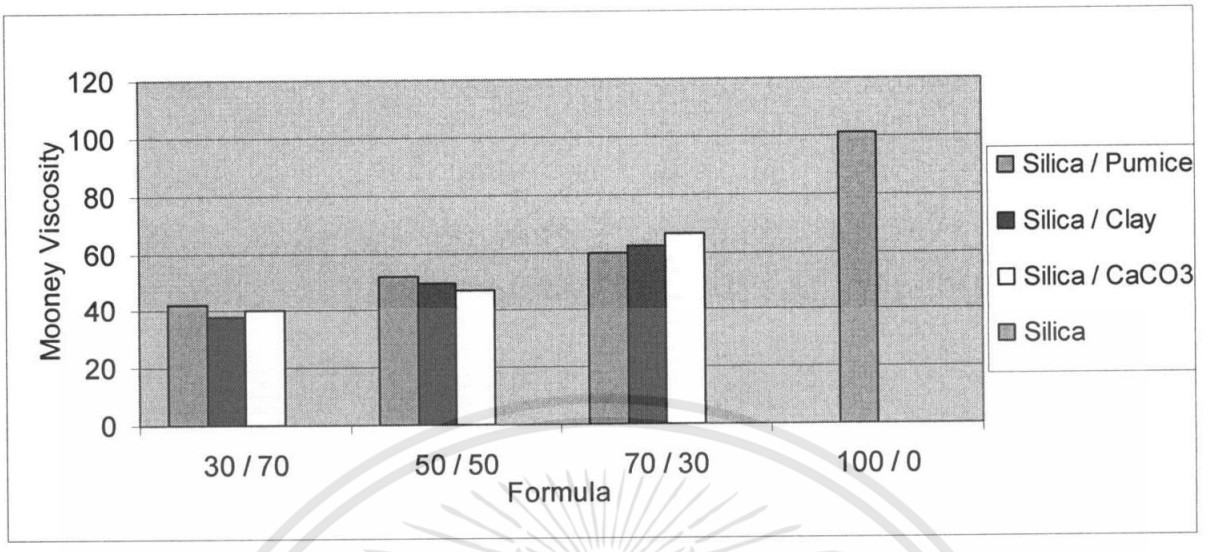
เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

12. IGC Technologies, LLC. 2008. **Hess pumice product** .[Online]. Available: .http://www.igctechnologies.com/pumice.html
13. Chemical Data Bank.. 2005. **2-Amino ethanol**. [Online]. Available: http://www.msds.pcd.go.th/
14. MORAKA PTE. LTD. 2004. **Titaniumdioxide Rutile**. [Online}. Available:www.moraka.com/pdfs/MC-A.pdf
15. ASTM D 412 Committee on standard "Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomers-Tension.", Philadephia: American Society for Testing and Materials.,1992
16. ASTM D 624 Committee on standard "Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers.",Philadephia: American Society for Testing and Materials.,1991
17. ASTM D 2240 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Property-Dorometer Hardness.", Philadephia: American Society for Testing and Materials.,1991
18. ASTM D 1646 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Viscosity,Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Moony Viscometer) .", Philadephia: American Society for Testing and Materials.,1994
19. M. Maebayashi , M. Endo , T. Matsuoka , S. Koda , Y. Isono , Acoustic analysis of bound rubber formed in silica/SBR compounds , Ultrasonics 44 (2006) e1101–e1104.
20. N. Suzukia, M. Itoa,*, F. Yatsuyanagi , Effects of rubber/filler interactions on deformation behavior of silica filled SBR systems, Polymer 46 (2005) 193–201.

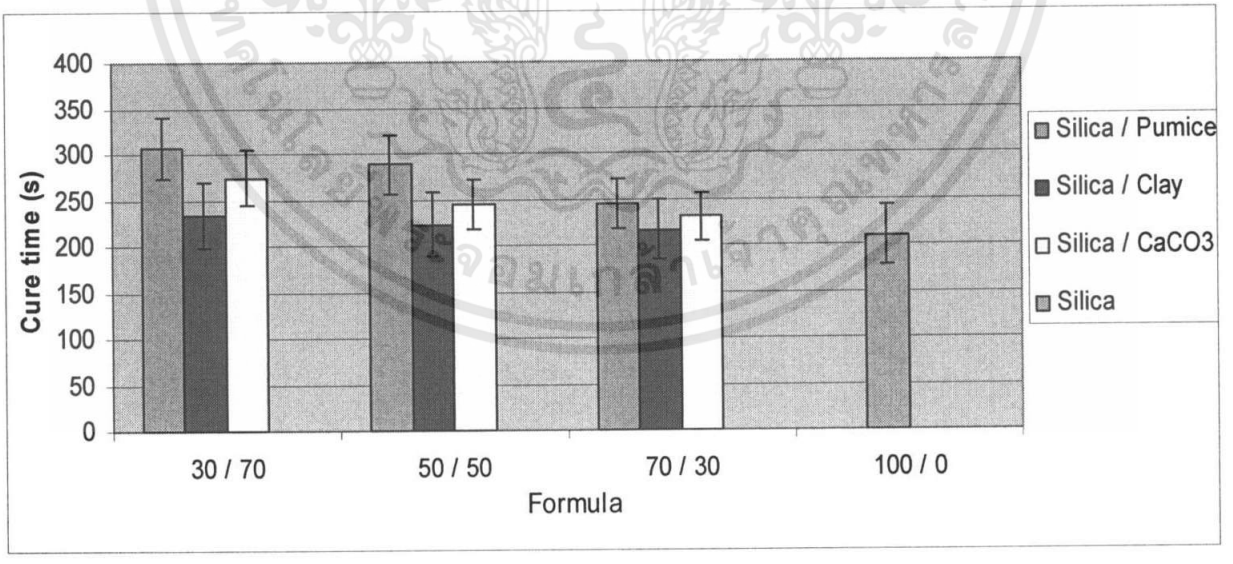
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดมูนนี่ของยางล้างแม่พิมพ์กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในสูตรยางผสมขึ้นรูป



ภาคผนวก ข แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการเชื่อมโยงของยางล้างแม่พิมพ์กับอัตราส่วนของสารตัวเติมในสูตรยางผสมขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MALVERN MASTERSIZER X

Version 1.1a

Mon, Apr 30, 1990 0:15AM

Clay :Run Number 3

mold cleaning compound project

Source: Analysed

Measured on: Mon, Apr 30, 1990 0:14AM

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i 0.10000
Polydisperse model

Volume Result
Kill Result Low = 0 High = 1
Concentration = 0.007 %
d (0.1) = 1.88 µm
Span = 1.98

Focus = 300 mm

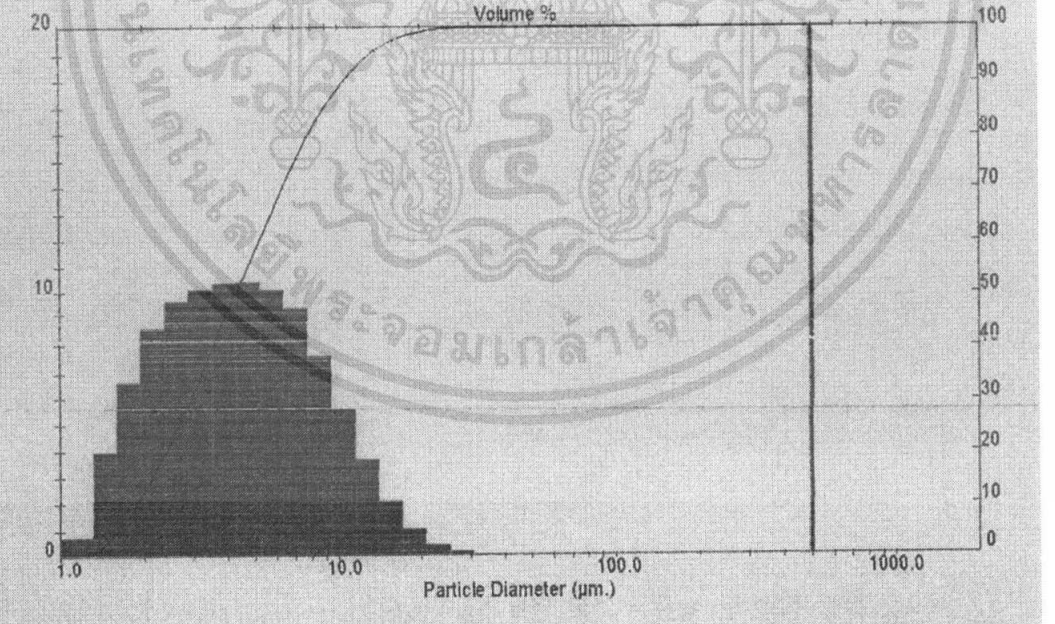
Obscuration = 15.30 %
d (0.9) = 10.44 µm

Residual = 1.450 %
d (0.5) = 4.31 µm
D [4, 3] = 5.44 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 3.58 µm
Specific Surface Area = 1.6758 sq. m / gm

Mode = 4.45 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.75	1.32	0.75
1.32	3.97	1.60	4.72
1.60	6.62	1.95	11.34
1.95	8.49	2.38	19.83
2.38	9.57	2.90	29.40
2.90	10.10	3.53	39.49
3.53	10.33	4.30	49.82
4.30	10.36	5.24	60.18
5.24	10.08	6.39	70.27
6.39	9.18	7.78	79.45
7.78	7.57	9.48	87.02
9.48	5.60	11.55	92.62
11.55	3.62	14.08	96.25
14.08	2.07	17.15	98.31
17.15	1.03	20.90	99.34
20.90	0.45	25.46	99.79

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	0.16	31.01	99.95
31.01	0.04	37.79	100.00
37.79	0.00	46.03	100.00
46.03	0.00	56.09	100.00
56.09	0.00	68.33	100.00
68.33	0.00	83.26	100.00
83.26	0.00	101.44	100.00
101.44	0.00	123.59	100.00
123.59	0.00	150.57	100.00
150.57	0.00	183.44	100.00
183.44	0.00	223.51	100.00
223.51	0.00	272.31	100.00
272.31	0.00	331.77	100.00
331.77	0.00	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.1a
Serial No. 6209

p.
30 Apr 90 00:1

ภาคผนวก ค แสดงขนาดอนุภาคของดินขาว (Clay)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MASTERSIZER X

Version 1.1a

Mon, Apr 30, 1990 0:00AM

Silica :Run Number 1

mold cleaning compound project

Source: Analysed

Measured on: Mon, Apr 30, 1990 0:00AM

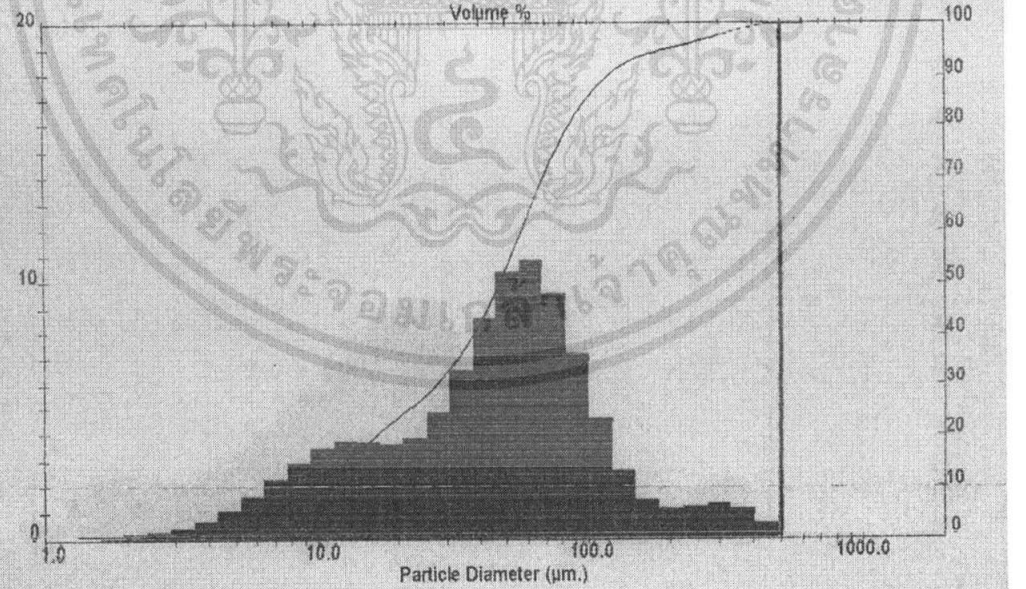
Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + I 0.10000
Polydisperse model

Volume Result
Kill Result Low = 0 High = 1
Concentration = 0.059 %
d (0.1) = 9.68 µm
Span = 2.30

Focus = 300 mm.
Obscuration = 17.41 %
d (0.9) = 119.41 µm
Mode = 59.48 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Residual = 0.826 %
d (0.5) = 47.79 µm
D [4, 3] = 63.43 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 23.33 µm
Specific Surface Area = 0.2572 sq. m. / gm

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.03	1.32	0.03
1.32	0.09	1.60	0.12
1.60	0.14	1.95	0.26
1.95	0.18	2.38	0.44
2.38	0.26	2.90	0.70
2.90	0.40	3.53	1.09
3.53	0.66	4.30	1.75
4.30	1.07	5.24	2.82
5.24	1.61	6.39	4.43
6.39	2.27	7.78	6.70
7.78	2.94	9.48	9.65
9.48	3.48	11.55	13.13
11.55	3.75	14.08	16.89
14.08	3.72	17.15	20.61
17.15	3.63	20.90	24.23
20.90	3.69	25.46	28.12
25.46	4.83	31.01	32.95
31.01	6.54	37.79	39.49
37.79	8.65	46.03	48.14
46.03	10.34	56.09	58.48
56.09	10.79	68.33	69.26
68.33	9.66	83.26	78.92
83.26	7.19	101.44	86.02
101.44	4.62	123.59	90.64
123.59	2.61	150.57	93.25
150.57	1.48	183.44	94.73
183.44	1.10	223.51	95.83
223.51	1.18	272.31	97.01
272.31	1.29	331.77	98.30
331.77	1.13	404.21	99.43
404.21	0.56	492.47	99.99
492.47	0.01	600.00	100.00



Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.1a
Serial No. 6209

P.
30 Apr 90 00:0

ภาคผนวก ง แสดงขนาดกลุ่มก้อนอนุภาคของซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) เกรด Tokusil® 255 G-S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MALVERN MASTERSIZER X

Version 1.1a

Mon, Apr 30, 1990 0:28AM

$CaCO_3$:Run Number 4

mold cleaning compound project

Source: Analysed

Measured on: Mon, Apr 30, 1990 0:28AM

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 + i 0.10000
Polydisperse model

Volume Result
Kill Result Low = 0 High = 1
Concentration = 0.020 %
d (0.1) = 3.36 µm
Span = 2.47

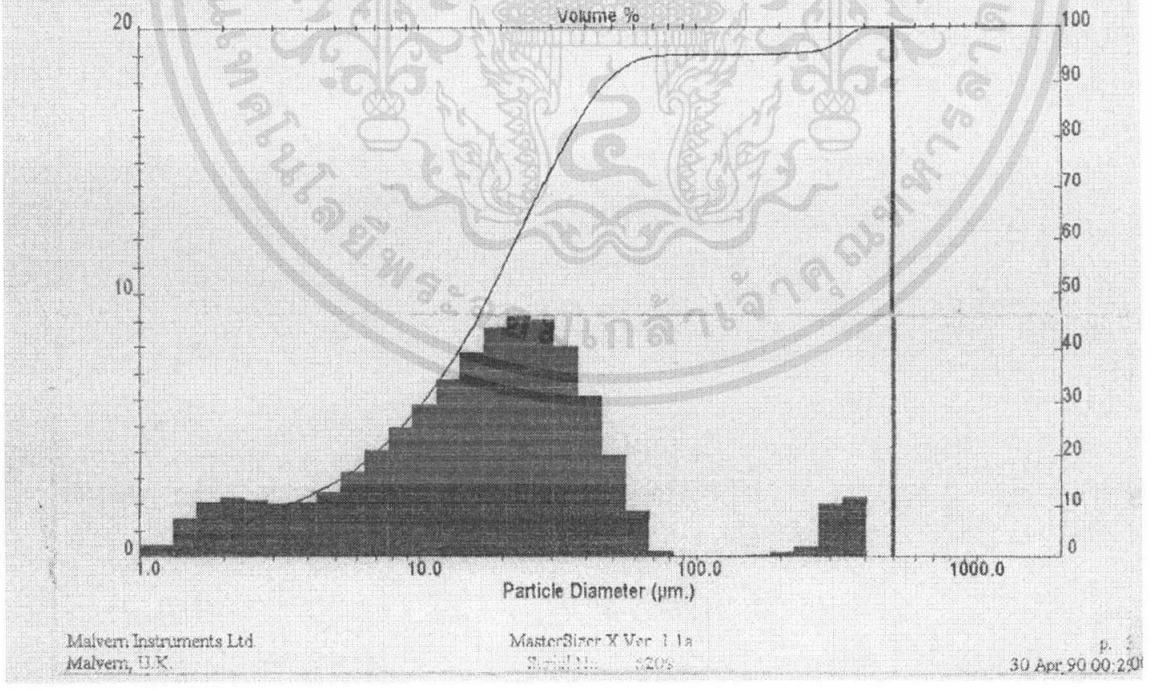
Focus = 300 mm.

Obscuration = 16.28 %
d (0.9) = 48.06 µm

Residual = 1.194 %
d (0.5) = 16.10 µm
D [4, 3] = 35.21 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 9.81 µm
Specific Surface Area = 0.6808 sq. m. / gm

Mode = 24.69 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00	25.46	9.08	31.01	74.75
1.32	1.47	1.60	1.30	31.01	3.02	37.79	82.77
1.60	2.09	1.95	4.09	37.79	6.17	46.03	88.94
1.95	2.20	2.30	6.03	46.03	3.94	56.09	92.88
2.30	2.16	2.90	8.49	56.09	1.78	68.33	94.66
2.90	2.01	3.53	10.50	68.33	0.26	83.26	94.91
3.53	2.07	4.30	12.57	83.26	0.00	101.44	94.91
4.30	2.47	5.24	15.03	101.44	0.00	123.59	94.91
5.24	3.20	6.39	18.24	123.59	0.00	150.57	94.92
6.39	4.11	7.78	22.34	150.57	0.10	183.44	95.01
7.78	4.95	9.48	27.30	183.44	0.21	223.51	95.22
9.48	5.79	11.55	33.11	223.51	0.47	272.31	95.69
11.55	6.79	14.08	39.90	272.31	1.99	331.77	97.68
14.08	7.80	17.15	47.70	331.77	2.29	404.21	99.97
17.15	8.72	20.90	56.42	404.21	0.03	492.47	100.00
20.90	9.75	25.46	65.67	492.47	0.00	600.00	100.00



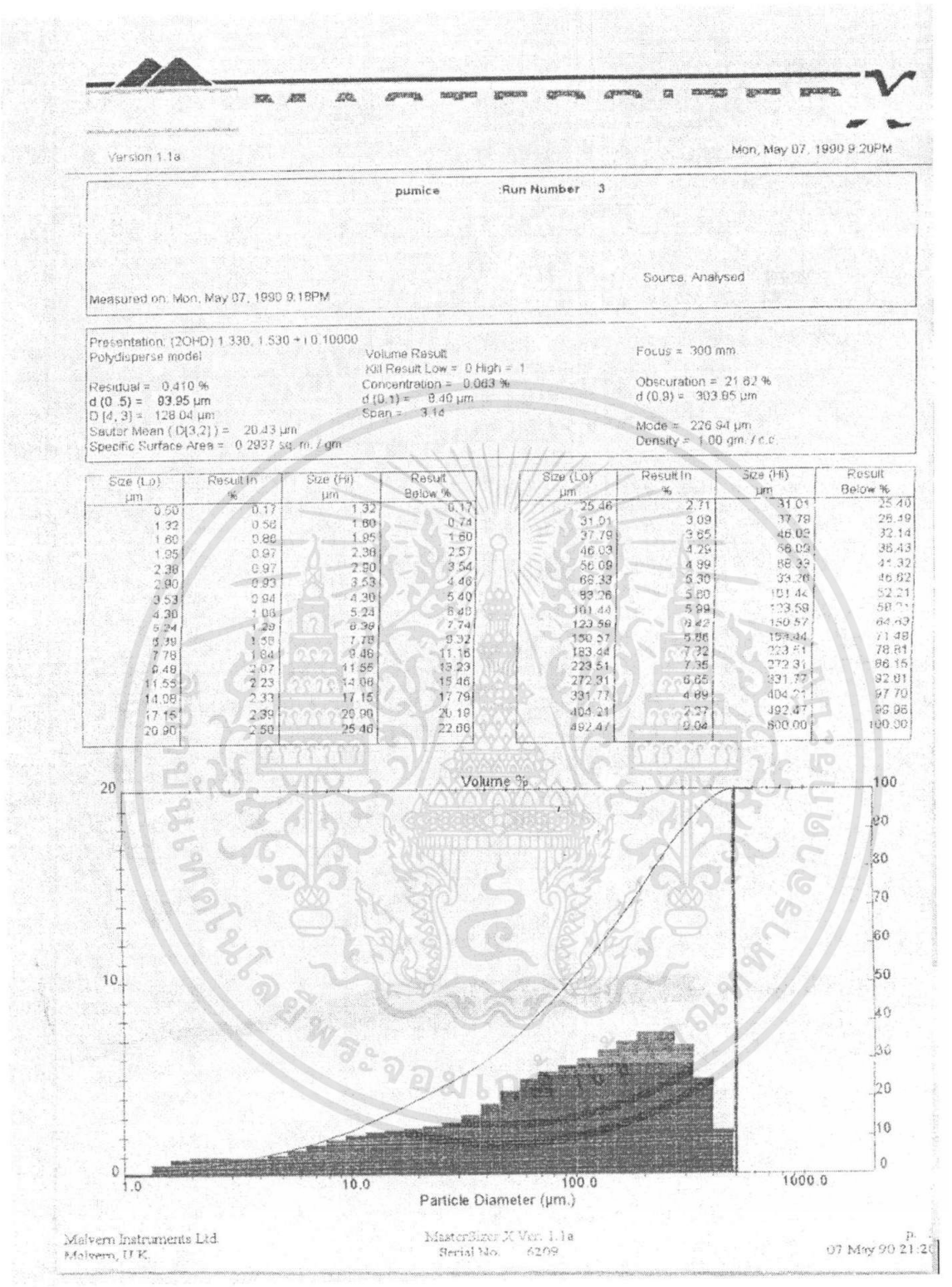
Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.1a

30 Apr 90 00:2

ภาคผนวก จ แสดงขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกรด Hifill s607

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Version 1.1a

Mon, May 07, 1990 9:20PM

pumice :Run Number 3

Source: Analysed

Measured on: Mon, May 07, 1990 9:18PM

Presentation: (2OHD) 1.330, 1.530 : 1.0.10000
Polydisperse model

Residual = 0.410 %
d (0.5) = 93.95 µm
D [4, 3] = 128.04 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 20.43 µm
Specific Surface Area = 0.2937 sq. m. / gm

Volume Result
Full Result Low = 0 High = 1
Concentration = 0.063 %
d (0.1) = 8.40 µm
Span = 3.16

Focus = 300 mm

Obscuration = 21.82 %
d (0.9) = 303.95 µm

Mode = 226.94 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.17	1.32	0.17
1.32	0.58	1.60	0.74
1.60	0.86	1.95	1.60
1.95	0.97	2.38	2.57
2.38	0.97	2.90	3.54
2.90	0.93	3.53	4.46
3.53	0.84	4.30	5.30
4.30	1.06	5.24	6.36
5.24	1.29	6.39	7.64
6.39	1.38	7.78	9.02
7.78	1.84	9.48	11.16
9.48	2.07	11.55	13.23
11.55	2.23	14.08	15.46
14.08	2.33	17.15	17.79
17.15	2.39	20.90	20.18
20.90	2.50	25.46	22.68

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	2.71	31.01	25.40
31.01	3.09	37.79	28.49
37.79	3.65	46.03	32.14
46.03	4.29	56.09	36.43
56.09	4.89	68.33	41.32
68.33	5.30	83.26	46.62
83.26	5.80	101.44	52.21
101.44	5.99	123.59	58.21
123.59	6.42	150.57	64.63
150.57	5.86	183.44	71.48
183.44	7.32	223.51	78.81
223.51	7.35	272.31	86.15
272.31	5.65	331.77	92.81
331.77	4.89	404.21	97.70
404.21	2.27	492.47	99.98
492.47	0.04	600.00	100.00

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.

Mastersizer X Ver. 1.1a
Serial No. 6209

p.
07 May 90 21:20

ภาคผนวก ฉ แสดงขนาดอนุภาคของพัมมิซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้