

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาสูตรยาล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม



T107831



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 107831  
วัน,เดือน,ปี..... 14 พ.ค. 2553

b..... 12212106  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Development of Foam Mold Cleaning Compound

Mr. Piya Dokrak

Mr. Pongtada Kurukidcumchorn

Mr. Sorawish Bencharitiwong



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 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ            การพัฒนาสูตรยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม  
นักศึกษา                    นายปิยะ ดอกรัก  
                                  นายพงษ์ธาดา คุรุกิจกำจร  
                                  นายสรวิษฐ์ เบญจฤทธิวงศ์  
ภาควิชา                    เคมี  
สาขาวิชา                เคมีอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา                2549  
อาจารย์ที่ปรึกษา        รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร-  
บัณฑิต

|               | คณะกรรมการตรวจสอบ        | ลายมือชื่อ  |
|---------------|--------------------------|---|
| ประธานกรรมการ | ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักขลธิ์ |  |
| กรรมการ       | นายชยุต สุวรรณพิมพ์กุล   |   |
| กรรมการ       | รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด    |  |



(ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                           |                                    |                       |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| <b>โครงการพิเศษเรื่อง</b> | การพัฒนาสูตรยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม |                       |
| <b>นักศึกษา</b>           | นายปิยะ ดอกกรัก                    | รหัสนักศึกษา 46050615 |
|                           | นายพงษ์ธาดา คุรุกิจกำจร            | รหัสนักศึกษา 46050616 |
|                           | นายสรวิชัย เบญจฤทธิวงศ์            | รหัสนักศึกษา 46050626 |
| <b>ภาควิชา</b>            | เคมี                               |                       |
| <b>สาขาวิชา</b>           | เคมีอุตสาหกรรม                     |                       |
| <b>คณะ</b>                | วิทยาศาสตร์                        |                       |
| <b>ปีการศึกษา</b>         | 2549                               |                       |
| <b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>   | รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด              |                       |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสูตรยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม สำหรับงานอุตสาหกรรม โดยใช้ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-propylene diene rubber ; EPDM) เกรด NORDEL<sup>®</sup> IP 4520 มีซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง และไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นสารเชื่อมโยง และใส่สารให้ฟอง AZ (Azodicarbonyl diurea) และ DNPT (3,7-Di-N-nitrosopentamethylene-tetramine) ร่วมกับคิกเกอร์ (Kicker) สารประกอบยูเรีย ช่วยในการทำงานของสารให้ฟองในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ ใช้ MEA (Monoethanolamine) เป็นสารทำความสะอาด ทำการคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และขึ้นรูปตัวอย่าง ทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดด้วยเทคนิคอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากการศึกษพบว่า เวลาในการขึ้นรูปจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารให้ฟอง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองจาก 1 phr เป็น 2 phr เวลาในการขึ้นรูปกลับลดลง คาดว่าเกิดจากคิกเกอร์ที่มีสมบัติเป็นด่างช่วยเสริมประสิทธิภาพการเชื่อมโยง การใส่สารให้ฟองจะทำให้สมบัติบางประการ เช่น % การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัส และความหนาแน่นลดลง เนื่องจากฟองอากาศทำให้เกิดเป็นรอยตำหนิในชิ้นงาน แต่ความแข็งแรงดึงของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค TGA พบว่าการสลายตัวของ AZ มีค่ามากกว่าอุณหภูมิการขึ้นรูปของยางล้างแม่พิมพ์ (175 °C) ในขณะที่ DNPT ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิขึ้นรูป ทำให้ DNPT จึงเกิดเป็นยางโฟมได้ดีกว่า และมีความหนาแน่นน้อยกว่า จากการทดลองพบว่าการใส่สารให้ฟองทำให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในสูตรที่มี DNPT เป็นสารให้ฟอง โดยคาดว่ากระบวนการเกิดโฟมจะทำให้เกิดความดันภายในระบบและก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยนำพา MEA ออกมาสู่ผิวแม่พิมพ์เพื่อล้างทำความสะอาดได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Special Project Title   | Development of Foam Mold Cleaning Compound                                 |
| Student                 | Mr.Piya Dokrak<br>Mr.Pongtada Kurukidcumchorn<br>Mr.Sorawish Bencharitwong |
| Department              | Chemistry  |
| Program                 | Industrial Chemistry   |
| Academic Year           | 2006   |
| Special Project Advisor | Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud   |

### ABSTRACT

The aim of this research work was to develop mold cleaning compounds in a form of sponge rubber or "foam" for rubber industries. The compound consisted of ethylene propylene diene (EPDM) based rubber, precipitated silica filler, dicumyl peroxide (DCP) curing agent, and monoethanolamine (MEA) cleaning agent. Blowing agents, i.e., azodicarbonamide (AZ) and 3,7-Di-N-nitrosopentamethylene-tetramine (DNPT) together with a urea compound kicker (promoter) (1:1 by weight) were used to create cellular structures. The mixtures were compounded by a two-roll mill and shaped by using compression molding technique. Factors affecting the rubber properties were studied, i.e., types and amount of the blowing agents. It was found that cure time of the compound was increased by adding the blowing agents. However, the cure time was reduced as the % blowing agent loading was increased from 1 to 2 phr. By addition of the AZ and DNPT blowing agents, some properties of the compound, i.e., % elongation at break, tear strength, modulus, and density had a trend to decrease due to air bubbles as the defects in the samples. However, tensile strength of the compound was improved. TGA thermograms revealed that the AZ was decomposed at higher temperatures than rubber curing temperature (175 °C) whereas the DNPT was decomposed at about the same curing temperature. That was the reason why the compounds with DNPT could create better cellular structure and had less density cleaning efficiency of the compound was improved especially the compounds with DNPT. This reason might derive from the evolving gases out of the compounds could

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

help removing the contaminants at mold surfaces. Another reason might be the higher cleaning pressure from the exploding compounds by the foaming process.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำคำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ที่กรุณาเป็นกรรมการตลอดจนให้คำแนะนำโครงการพิเศษนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณชยุต สุวรรณพิมพ์กุล และเจ้าหน้าที่บริษัท S.K. POLYMER จำกัด โดยเฉพาะคุณ วสวัตต์ บุญปรีชาที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทดสอบประสิทธิภาพทำความสะอาดแม่พิมพ์ในการใช้งานจริงกับแม่พิมพ์ของบริษัท

ขอขอบคุณ บริษัท ยูซาโก้ (ไทยแลนด์) ที่ให้ความอนุเคราะห์สารให้พอง และบริษัท เคมีคอล อินโนเวชั่น จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยาง EPDM

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ Polymer workshop สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้สอนวิธีใช้เครื่องมือ และคอยอำนวยความสะดวกทุกอย่าง

ขอขอบคุณ ผู้ที่คอยให้แรงกระตุ้นและกำลังใจ พร้อมข้อแนะนำดีๆ จนทำให้โครงการพิเศษนี้ประสบความสำเร็จอย่างงดงาม

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ผู้ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างต่อคณะผู้วิจัยจนประสบความสำเร็จในการศึกษา

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นาย ปิยะ ดอกรัก

นาย พงษ์ธาดา คุรุกิจกำจร

นาย สรวิชัย เบญจฤทธิวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|  | หน้า      |
|--|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                            | ก         |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                         | ข         |
| กิตติกรรมประกาศ                            | ง         |
| สารบัญ                                     | จ         |
| สารบัญตาราง                                | ช         |
| สารบัญรูป                                  | ซ         |
| <br>                                       |           |
| <b>บทที่ 1 บทนำ</b>                        | <b>1</b>  |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ              | 1         |
| 1.2 วัตถุประสงค์                           | 2         |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย                         | 2         |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ                    | 2         |
| <br>                                       |           |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>             | <b>3</b>  |
| 2.1 การทำความสะอาดแม่พิมพ์                 | 3         |
| 2.2 วัตถุประสงค์ในการเตรียมยางล้างแม่พิมพ์ | 3         |
| 2.2.1 ยาง EPDM                             | 3         |
| 2.2.2 สารเติมแต่ง                          | 7         |
| 2.3 วิธีใช้ยางล้างแม่พิมพ์                 | 19        |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                  | 22        |
| <br>                                       |           |
| <b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>          | <b>26</b> |
| 3.1 แผนการดำเนินการ                        | 26        |
| 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์                      | 28        |
| 3.3 วิธีการทดลอง                           | 30        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

|   |           |
|---|-----------|
|   | หน้า      |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล</b>         | <b>34</b> |
| 4.1 การศึกษาระยะเวลาการเชื่อมโยง ( $t_{90}$ ) | 35        |
| 4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล                      | 36        |
| 4.3 การศึกษาความหนาแน่นของยาง                 | 40        |
| 4.4 ประสิทธิภาพการทำความสะอาด                 | 42        |
| 4.5 สันฐานวิทยา                               | 46        |
| 4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้างแม่พิมพ์      | 49        |

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b> | <b>51</b> |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง            | 51        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ                | 53        |
| ภาคผนวก                       | 54        |
| เอกสารอ้างอิง                 | 56        |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 ตัวอย่าง Nonconjugate Diene ที่ใช้ในการผลิตยาง EPDM | 4    |
| ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของยาง EPDM                          | 5    |
| ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของซิลิกาชนิดตกตะกอน                 | 12   |
| ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ MEA                    | 17   |
| ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ EPDM NORDEL <sup>®</sup> IP 4520 | 29   |
| ตารางที่ 3.2 สูตรผสมยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย              | 32   |
| ตารางที่ 4.1 การคำนวณราคาของล้างแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัมโดยใช้   | 49   |

สารให้ฟอง DNPT 2 phr



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM   | 5    |
| รูปที่ 2.2 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์  | 10   |
| รูปที่ 2.3 โมโนเอทานอลามีน   | 16   |
| รูปที่ 2.4 AZ (Azodicarbonamide)   | 18   |
| รูปที่ 2.5 DNPT (3,7-Di-N-nitrosopentamethylenetetramine)  | 18   |
| รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ  | 22   |
| รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงาน  | 27   |
| รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงระยะเวลาการเชื่อมโยง ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบ<br>ผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT          | 35   |
| รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผล<br>ของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT          | 36   |
| รูปที่ 4.3 แผนภูมิ แสดงค่า Tear strength ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผล<br>ของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT            | 37   |
| รูปที่ 4.4 แผนภูมิ แสดงค่า Hardness (Shore A) ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบ<br>ผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT       | 37   |
| รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดง ค่า % Elongation at break ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟม<br>เปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT    | 38   |
| รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดง Rubber modulus ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบ<br>ผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT               | 38   |
| รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นของยางล้าแม่พิมพ์หลังทำการขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบ<br>ชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT                       | 40   |
| รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้าแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิด<br>และปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 1 | 42   |
| รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้าแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิด<br>และปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 2 | 42   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบกราฟสกรีนของล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิด และปริมาณแตกต่างกันของ AZ และDNPT ครั้งที่ 3 | 43   |
| รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบกราฟสกรีนของล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิด และปริมาณแตกต่างกันของ AZ และDNPT ครั้งที่ 4 | 43   |
| รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบกราฟสกรีนของล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิด และปริมาณแตกต่างกันของ AZ และDNPT ครั้งที่ 5 | 44   |
| รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบกราฟสกรีนของล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิด และปริมาณแตกต่างกันของ AZ และDNPT ครั้งที่ 6 | 44   |
| รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบกราฟสกรีนของล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิด และปริมาณแตกต่างกันของ AZ และDNPT ครั้งที่ 7 | 45   |
| รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ไม่ใส่สารให้ฟอง  | 46   |
| รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง AZ 1 phr  | 46   |
| รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง AZ 2 phr  | 47   |
| รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง DNPT 1 phr  | 47   |
| รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง DNPT 2 phr  | 48   |
| รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบปริมาณของล้างแม่พิมพ์ในปัจจุบันกับล้างแม่พิมพ์ ใส่สารฟอง DNPT 2 phr                                  | 50   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันได้มีการเติบโตของอุตสาหกรรมการแปรรูปอย่างอย่างรวดเร็ว กระบวนการแปรรูปส่วนใหญ่เป็นกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความสะดวก รวดเร็ว สามารถผลิต ผลิตภัณฑ์ออกมาได้หลายรูปแบบโดยขึ้นอยู่กับลักษณะแม่พิมพ์ (Molds) ที่ใช้ แต่ปัญหาที่ตามมาคือ เมื่อทำการขึ้นรูป ซ้ำหลายๆ ครั้ง จะพบว่ามีการสึกปรกที่ผิวแม่พิมพ์ ซึ่งเกิดจากสารเคมี หรือเศษยาง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีตำหนิหรือ รอยต่าง บนชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในอุตสาหกรรมยางทั่วโลก ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยยาล้างแม่พิมพ์ (Mold cleaning compound) ทำให้ลดระยะเวลาและต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด วิธีดังกล่าว สะดวก รวดเร็ว และได้ผลดี แต่ยังคงไม่เป็นที่แพร่หลายเนื่องจาก ยาล้างแม่พิมพ์ในปัจจุบัน มีราคาแพง จึงได้เกิดโครงการการลดต้นทุนเพื่อช่วยแก้ปัญหาในเรื่องราคาและทำให้สามารถนำยาล้างแม่พิมพ์ไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้จึงมีการร่วมมือกันระหว่าง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) กับ บริษัทเอสเคพอลิเมอร์ จำกัด เพื่อวิจัยการลดต้นทุนยาล้างแม่พิมพ์ โดยเป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ปีการศึกษา 2547 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. เรื่อง “การปรับปรุงสมบัติของยาล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม” โดยนางสาว ณัฐนิชา เสงประภากร และนางสาวมลสิริ ศรีประวิทย์ และโครงการพิเศษ สาขาเคมีอุตสาหกรรม ปีการศึกษา 2548 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. เรื่อง “การพัฒนาสูตรยาล้างแม่แบบชนิดอัดขึ้นรูป” โดยนาย นพรัตน์ ศิริแก้วกาญจน์ นายปรม ศรีวิสุทธิ และนายอุยฤทธิ์ วิทย์สุธรรมกุล ซึ่งมี รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ร่วมกับ บริษัทเอสเคพอลิเมอร์ จำกัด

โดยงานวิจัยนี้จะช่วยลดต้นทุนของยาล้างแม่พิมพ์ เนื่องจากพัฒนาเป็นยาล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม ทำให้มีความหนาแน่นต่ำและก๊าซที่เกิดจากการขึ้นรูปจะช่วยนำสารทำความสะอาดออกมาจากเนื้อยางทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาสมบัติบางประการที่มีผลต่อสูตรยาล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง (AZ และ DNPT) และปริมาณของสารให้ฟอง (1 และ 2 phr) โดยพัฒนาสูตรยาล้างแม่พิมพ์จากงานวิจัยโครงการพิเศษที่ผ่านมา กล่าวคือใช้ยาง EPDM เป็นวัสดุหลัก สารเพิ่มเนื้อซิลิกาชนิดตกตะกอน 60 phr และกำหนดปริมาณสารทำความสะอาด MEA 30 phr โดยศึกษาในแนวเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของยางผสมสูตรที่ได้ ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics) สมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแม่พิมพ์

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมยางโฟมล้างแม่พิมพ์
2. ศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติและประสิทธิภาพการทำความสะอาดของยางโฟมล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้ เช่น ชนิดสารให้ฟอง (AZ, DNPT) และปริมาณสารให้ฟอง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- ศึกษาชนิดของสารให้ฟอง (Blowing agent) ระหว่าง AZ และ DNPT รวมทั้งปริมาณที่ 1 และ 2 phr โดยจะผสมยางทั้งหมด 5 สูตรคือ ไม่ใส่สารให้ฟอง ใส่ AZ 1 phr ใส่ AZ 2 phr ใส่ DNPT 1 phr และใส่ DNPT 2 phr เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด สมบัติของต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น) สมบัติเชิงกล (ความแข็งแรงดึง, % การดึงยืด ณ จุดขาด, ความแข็งกด และความแข็งแรงฉีกขาด) สัมฐานวิทยา (ลักษณะ และการกระจายของฟองอากาศ) และความยากง่ายในการนำออกจากแม่พิมพ์

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีสมบัติประสิทธิภาพการทำความสะอาดสูง สามารถใช้งานได้จริง และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์
- ช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางแปรรูปในประเทศ คืออุตสาหกรรมยางล้างแม่พิมพ์ ทำให้อุตสาหกรรมยางในประเทศมียางล้างแม่พิมพ์ราคาถูกใช้ในประเทศ
- ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถประยุกต์ใช้ทำความสะอาดกับอุปกรณ์ขึ้นรูปพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 การทำความสะอาดแม่พิมพ์ [1]

วิธีทำความสะอาดแม่พิมพ์ที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมทำได้หลายวิธี โดยวิธีทำความสะอาดแม่พิมพ์ที่ง่ายที่สุดต่อไปนี้เป็นข้อมูลการทำทำความสะอาดแม่พิมพ์อย่างง่ายและใช้ทั่วไป สามารถแบ่งวิธีทำความสะอาดแม่พิมพ์ได้ดังต่อไปนี้

##### 1. การทำความสะอาดแม่พิมพ์โดยการขัด

หลักการคือ เทน้ำมันลงบนแม่พิมพ์ที่สกปรก ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้เศษยางและคราบเคมีเก่าที่ติดบริเวณผิวแม่พิมพ์เกิดการพองตัว จากนั้นใช้โลหะและบริเวณที่มีคราบสกปรกฝังติดอยู่ แล้วขัดผิวหน้าของแม่พิมพ์ด้วยแผ่นขัด เช่น สก็อตชีปเปอร์ด์

##### ผลที่ได้รับ

คราบเคมีและเศษยางเก่ายังคงออกไม่หมด สังเกตได้จากการอัดขึ้นงานในครั้งแรกหลังจากทำความสะอาด ซึ่งพบว่าชิ้นงานมีผิวไม่เรียบ แสดงให้เห็นว่าแม่พิมพ์ยังคงมีคราบเคมีและเศษยางเก่าติดค้างอยู่

##### 2. การทำความสะอาดแม่แบบโดยการจ้างบริษัททำความสะอาดแม่แบบ

พนักงานทำความสะอาดใช้หินขัด (Super stone<sup>®</sup>) ขัดคราบสกปรกในร่องลึกออก แล้วใช้กระดาษทรายขัดผิวบริเวณหน้า

##### ผลที่ได้รับ

คราบสารเคมีและเศษยางยังออกไม่หมด โดยสังเกตได้จากการอัดขึ้นงานในครั้งแรกหลังจากทำความสะอาด พบว่าชิ้นงานมีผิวไม่เรียบ จึงต้องใช้พนักงานขัดซ้ำอีกครั้ง แต่ใช้เวลาในการทำความสะอาดน้อยกว่าการใช้พนักงานขัดเองทั้งหมด

จากวิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการทำความสะอาดต่ำจึงได้ใช้การทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยยางล้างแม่พิมพ์ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดที่สูงกว่า

#### 2.2 วัสดุดิบในการเตรียมยางล้างแม่พิมพ์ [2]

##### 2.2.1 ยาง EPDM


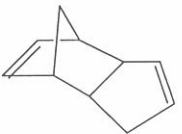
ยาง EPDM เป็นชื่อที่ถูกกำหนดตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) และ ISO (International Standard Organization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอักษร “E” มาจากเอทิลีน (Ethylene) อักษร “P” มาจากพรอพิลีน (Propylene) อักษร “D” มาจากไดอีน ส่วนอักษร “M” ทำยี่ห้อใช้เรียกกลุ่มยางที่มีโครงสร้างหลักเหมือนพอลิเมทิลีน (Polymethylene,  $-(CH_2)_n-$ )

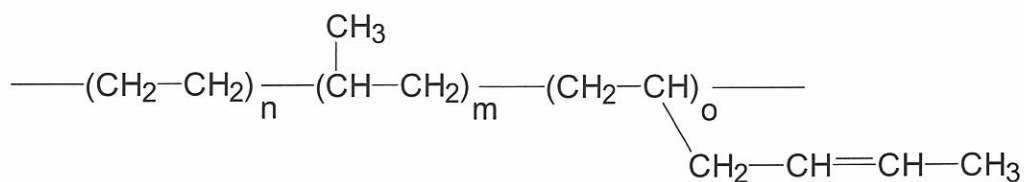
ในระยะแรกได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีนและพรอพิลีน จะได้พอลิเมอร์อสังฐานเนื่องจากมีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่มจึงมีสมบัติเป็นยางที่เรียกว่า ยาง EPM เนื่องจากยางชนิดนี้ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างจึงทำให้มีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซนและสารเคมี อย่างไรก็ตาม การที่ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้างจึงมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้กำมะถัน (Sulfur) ในการเชื่อมโยงได้ ใช้ได้เฉพาะเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) จึงมีการพัฒนายางชนิดนี้โดยการเติมมอนอเมอร์ตัวที่ 3 คือไดอีนชนิดไม่คอนจูเกต (Nonconjugate Diene) ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่สาม (Terpolymer) ซึ่งมีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในโครงสร้าง ยางจึงสามารถทำการเชื่อมโยงได้ด้วยกำมะถันและเรียกกยางชนิดนี้ว่า ยาง EPDM

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่าง Nonconjugate Diene ที่ใช้ในการผลิตยาง EPDM [2]

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM (เกรดที่มี HD เป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่ 3) [2]

ยาง EPDM มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอีน โดยทั่วไป ยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ในช่วง 40-80%โดยโมล ปริมาณของไดอีนอยู่ในช่วง 3-11% โดยโมล สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีนในยางก็มีผลกระทบต่อสมบัติของยาง กล่าวคือ ยางเกรดที่มีปริมาณเอทิลีนสูงจะมีความแข็งแรงก่อนการเชื่อมโยงสูง แต่เมื่อปริมาณของเอทิลีนลดลง ยางก็จะนิ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น สมบัติทั่วไปของยาง EPDM แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของยาง EPDM [3]

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

สมบัติโดยรวมของยาง EPDM สามารถสรุปได้ดังนี้

- ความยืดหยุ่น (Elasticity) ยาง EPDM มีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์หลายชนิด แต่ยังต่ำกว่ายางธรรมชาติ
- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่อนข้างต่ำเนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่มทำให้ได้พอลิเมอร์อสัณฐาน ไม่สามารถเกิดผลึกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Compression set ต่ำ โดยเฉพาะยางถูกเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ ส่วนยางที่ถูกเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน จะมีค่า Compression set สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
- Dynamic property สูงและมีความต้านทานต่อการล้าสูง โดยเฉพาะยางที่ได้รับการเชื่อมโยงด้วยระบบกำมะถันซึ่งจะมีสมบัติด้านนี้ใกล้เคียงกับ SBR
- ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging property) เนื่องจากยาง EPDM ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างทำให้มีสมบัติด้านการต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้เป็นอย่างดี (ดีกว่ายาง SBR และ NBR แต่ด้อยกว่ายางซิลิโคน) โดยยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงกว่ายางที่เชื่อมโยงด้วยกำมะถัน
- การทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (Oil and chemical resistance) ยาง EPDM เป็นยางไม่มีขั้ว จึงทำให้ไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายไม่มีขั้ว แต่จะทนต่อตัวทำละลายที่มีขั้วได้ดี เช่น กรด เบส น้ำ แอลกอฮอล์ เป็นต้น
- ความเป็นฉนวน (Insulation) จากตารางที่ 2.3 พบว่ายางชนิดนี้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูงมาก ดังนั้นจึงมีความเป็นฉนวนสูงสำหรับยาง EPDM สมบัติการเชื่อมโยงขึ้นกับชนิดและปริมาณของไดอินที่ใช้ ถ้ามีปริมาณของไดอินมาก ก็จะสามารถเชื่อมโยงยาง EPDM ได้รวดเร็ว ในขณะที่หากต้องการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ จะต้องใช้ยางเกรดที่มีสัดส่วนของพอลิเอทิลีนสูง (มากกว่า 50%) เพราะหมู่เมทิลในพอลิพโรพิลีนจะไปขัดขวางการเกิดการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์และจะทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลแทน

การผลิตยาง EPDM นิยมใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ถ้าใช้เครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จะใช้ยางที่มีปริมาณเอทิลีนน้อยหรือพโรพิลีนมาก เพราะพอลิเอทิลีนจะทำให้ความหนืดของยางมากขึ้น ทำให้ผสมด้วยลูกกลิ้งได้ยาก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 สารเติมแต่ง (Additives) [2]

สารเติมแต่ง คือ สารที่ใส่ลงไปในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของยาง (Property enhancement) และเพื่อช่วยกระบวนการผลิต (Processability) ให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น

### (1) สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) [2]

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

การเชื่อมโยง (Crosslinking) หรือวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) เป็นสิ่งสำคัญที่สุดของกระบวนการผลิตขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางเนื่องจากผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่างๆของยางจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ถ้ายางไม่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยง เพราะยางจะไม่คงรูป ไหลได้ ไม่สามารถรับแรงได้

การเชื่อมโยงสามารถทำได้โดยการผสมสารเคมี คือ สารเชื่อมโยง ได้แก่ กำมะถัน เปอร์ออกไซด์หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะ นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) สารกระตุ้นเชื่อมโยง (Activators) ผสมเข้ากับยางแล้วทำการให้อุณหภูมิสูงในภายหลัง เพื่อทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการอุณหภูมิสูงจะทำให้สารเชื่อมโยงต่างๆเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเชื่อมโยงโครงสร้างโมเลกุลของยาง เมื่อทำการเชื่อมโยงแล้วโครงสร้างจะเปลี่ยนจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ ยางจะมีสมบัติที่ดีขึ้น การเชื่อมโยงทำให้ยางมีสมบัติเปลี่ยนไปกล่าวคือ

- ความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- โมดูลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น
- ความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- ฮิสเตอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- การเปลี่ยนสภาพถาวร (Permanent set) ลดลง
- การเหนียวติด (Sticky) ลดลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆทนต่อความร้อน แสงและการใช้งานนานขึ้น

การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) เริ่มมีการใช้มาตั้งแต่ ค.ศ.1950

วิธีเชื่อมโยงนี้มีข้อเด่นเหนือกว่าวิธีการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน คือ

- สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubbers) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) นิยมใช้เชื่อมโยงโดยเฉพาะยางที่อิ่มตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น ยาง EPDM และยางซิลิโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีเสถียรภาพมากกว่า มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat-aging properties) ดีกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนรูปถาวร (Permanent set) น้อยกว่า
- ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีกว่า
  - สามารถเชื่อมโยงยางที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือยางสีขาว ไม่เป็นสีเหลืองเนื่องจากกำมะถัน และสีที่ได้มีความเสถียร มีการเปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV light discoloration) น้อยกว่า
  - ไม่เกิดปัญหาการบลูม (Bloom) ซึ่งจะเกิดเมื่อใช้กำมะถัน เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูง มีความเสถียรต่อความร้อนและแรงกระทำใดๆ เทียบกับพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลฟิดิกและพอลิซัลฟิดิก (C-S bonds และ S-S bonds ตามลำดับ) ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า อย่างไรก็ตามวิธีการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีข้อจำกัดบางประการ คือ
    - ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ จะเกิดกลิ่นเหม็นที่ไม่พึงปรารถนาของสารที่ปลดปล่อยออกมาในระหว่างการเชื่อมโยงยาง และในผลิตภัณฑ์ยาง
    - เปอร์ออกไซด์เป็นสารเคมีที่อันตราย ต้องระมัดระวังในการใช้และการเก็บรักษา
    - สารประกอบเปอร์ออกไซด์ว่องไวต่อปฏิกิริยากับสารเติมแต่งชนิดอื่นในยางมากกว่ากำมะถัน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดและต้องมีความรอบคอบในการเลือกใช้สารเคมียาง เช่น การเลือกใช้สารหล่อลื่น หรือน้ำมันเป็นต้น
    - ไม่ควรเลือกใช้เทคนิคการให้ความร้อนที่มีบรรยากาศของออกซิเจนในการเชื่อมโยง เช่น เทคนิคการให้ความร้อนในการเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน (Hot air cures) เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เคลื่อนย้ายจากเปอร์ออกไซด์ไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ในปฏิกิริยาเชื่อมโยงอาจถูกออกซิไดซ์เนื่องจากออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดหมู่ของไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) และไม่เกิดการเชื่อมโยง กล่าวคือเกิดการเสียสภาพเนื่องจากความร้อนนั่นเอง
- ยางบิวทิล (Butyl rubber , IIR) จะเกิดปฏิกิริยาการเสียสภาพ เมื่อเชื่อมโยงด้วย เปอร์ออกไซด์เนื่องจากเกิดเป็นอนุมูลอิสระของคาร์บอนตติยภูมิ (Tertiary carbon radicals) ซึ่งไม่เสถียรเกิดการขาดของสายโซ่ที่ตำแหน่งเบต้า (  $\beta$ -scission reaction) นำไปสู่การเสื่อมสภาพของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงมีข้อยกเว้น ไม่สามารถใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยางบิวทิล (IIR) มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้เชื่อมโยงยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่น ไดเอซิลเปอร์ออกไซด์ (Diacyl peroxide) และเปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy esters) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติสารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

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

สารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ซึ่งมีจำหน่ายทั้งในรูปผงของแข็งและของเหลว ความบริสุทธิ์ประมาณ 90-99% เนื่องจากเปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงมีจำหน่ายในรูปของผสมกับสารตัวกลางเฉื่อยบางชนิด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เข้มข้น 40-45% และใช้ในรูปแบบของผสมพร้อมสารเพิ่มเนื้อ ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์นิยมใช้น้อยกว่า เนื่องจากกลายเป็นไอได้ง่ายขณะใช้งาน ส่วนไดเมทิลเปอร์ออกซีเฮกเซนนิยมใช้ในการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิสูง ( $180\text{ }^\circ\text{C}$ ) เนื่องจากมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่า และไม่มีกลิ่นเหม็นของสารอะซิโตฟีโนน (Acetophenone)

ในการใช้งานสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บสารที่อุณหภูมิสูงเพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลาย นอกจากนี้ควรเก็บให้ห่างจากแหล่งใช้ความร้อนและไฟฟ้าสถิต เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายและดับยาก

#### กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์

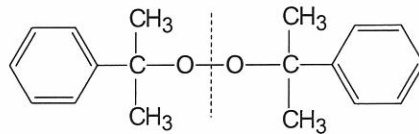
กลไกการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เริ่มจากปฏิกิริยาโฮโมไลติก-ดีคอมโพสิชัน (Homolytic decomposition) สลายตัวเนื่องจากความร้อน แตกตัวเกิดเป็นอนุมูลอัลคอกซี (Alkoxy radicals,  $\text{RO}\cdot$ ) สองตัว ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเชื่อมโยง ดังรูปที่ 2.2 ในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงอย่างไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่บนสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูล (Polymer radical) จากนั้นจะเกิดการรวมกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่ เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง

นอกจากอนุมูลอิสระจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ในยางที่ไม่อิ่มตัวแล้ว อนุมูลอิสระยังเข้าจับไฮโดรเจนในตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาง่าย เช่น Allylic hydrogen เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอนุมูล เช่นเดียวกับในกรณีใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เชื่อมโยงที่อิ่มตัวแล้ว การรวมตัวกันของอนุมูลที่อยู่ต่างสายโซ่ทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน

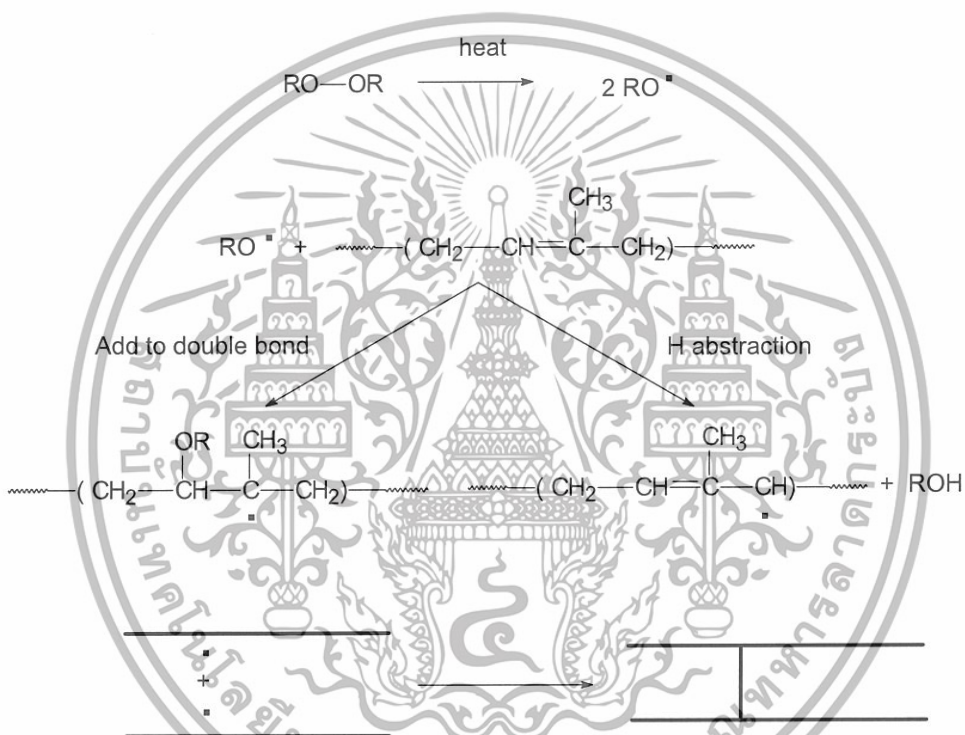
ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เปอร์ออกไซด์มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา การใส่สารเคมีบางชนิด เช่น สารหล่อลื่นหรือน้ำมัน และสารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) อาจเกิดปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นผลให้เกิด "ปรากฏการณ์เจือจางการเชื่อมโยง" (Dilute crosslinking effect) ได้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการใส่สารเติมแต่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางที่เป็นกรด เช่น สารตัวเติมซิลิกา (Silica) หรือเขม่าดำ (Carbon black) ที่เป็นกรดเนื่องจากกรดสามารถช่วยเร่งให้เปอร์ออกไซด์สลายตัวแบบไม่เกิดอนุมูลอิสระ (Nonradical-generating decomposition) ทำให้เกิดการสูญเสียของสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น แอนติออกซิแดนท์ อาจหยุดปฏิกิริยาหรือเปลี่ยนแปลงอนุมูลอิสระระหว่างเกิดปฏิกิริยา เป็นผลให้เกิดพันธะเชื่อมโยงน้อย



Dicumyl peroxide , DCP



รูปที่ 2.2 กลไกการเชื่อมโยงยางด้วยสารประกอบเปอร์ออกไซด์ [2]

ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย (Solubility) ของเปอร์ออกไซด์ในยาง และจำนวนของหมู่ฟังก์ชันและไฮโดรเจนของโครงสร้างที่สามารถถูกจับด้วยอนุมูลอิสระ ปกติในการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์นิยมใช้ในปริมาณไม่เกิน 2.5 phr (ส่วนในร้อยละของยาง) อุณหภูมิเชื่อมโยงตั้งแต่ 150-230 °C การใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาน้อยลงประมาณ 2.5 เท่าทุก 10 °C ที่เพิ่มขึ้นแต่จะเสี่ยงกับการเสียสภาพของยาง และต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การใช้ปริมาณสารเชื่อมโยงที่มากจะทำให้ยางมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากเกินไป (Over cure) ทำให้สมบัติบางอย่างลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปอร์-เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% elongation at break) ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (2) สารกระตุ้นการเชื่อมโยง (Activators) [2]

สารกระตุ้นการเชื่อมโยง เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) ในกรณีการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ซึ่งไม่มีสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง สารกระตุ้นการเชื่อมโยงจะทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารเชื่อมโยงแทน

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

นอกจากซิงค์ออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นแล้ว อาจใช้ลิเทียมออกไซด์ ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และสารจำพวกเอมีน (Amines) โดยปกติในอุตสาหกรรมปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์ คือ 2-5 phr ได้มีการศึกษาพบว่า การใช้ปริมาณซิงค์ออกไซด์เกิน 4 phr มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการกระตุ้นการเชื่อมโยง

ตัวกระตุ้นอีกหนึ่งตัว คือ กรดไขมัน (Fatty acids) ที่มีจำนวนคาร์บอน 12-18 อะตอม เช่น กรดสเตียริก (เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต) กรดลอริค (เกิดเป็นซิงค์ลอริเอต (Zinc laureate)) โดยปกติใช้กรดสเตียริกในอุตสาหกรรมยางประมาณ 1-3 phr และจะใช้ปริมาณน้อยลงเมื่อใช้ยางที่อิมมัตว เช่น EPDM นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเชื่อมโยงแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) เนื่องจากมีความเป็นไขมัน ทำให้ความหนืดลดลง

## (3) สารตัวเติมซิลิกา (Silica) [2]

ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำชนิดอื่น ๆ ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ข้อดีของซิลิกา คือ มีอนุภาคเล็กทำให้สามารถแทรกและกระจายในยางได้สม่ำเสมอ ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat built up) เพิ่มความต้านการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง

ในการใช้ซิลิกานิยมใช้สารควบคู่ (Coupling agent) เช่น สารประกอบไฮเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างอนุภาคทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติและการสังเคราะห์ สมบัติของซิลิกาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เนื่องจากซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกาและออกซิเจน จึงมีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol Group ; -SiOH) ชนิดต่างๆบนผิวของอนุภาคซิลิกา ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนผิวจะมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิวและยังมีผลต่อความเป็นกรดบนผิวของซิลิกาอีกด้วย จากความมีขั้วหรือความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของซิลิกา ทำให้สารเติมแต่งชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางนีโอพรีน (CR) ได้ดีกว่ายางที่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางอีพดีเอ็ม (EPDM)

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

ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica)

เป็นซิลิกาสังเคราะห์ สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาในสถานะของเหลว ของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) หรือของผสมของกรดเกลือร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สมบัติของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้ง่ายจากหลายปัจจัย เช่น ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราการใส่สารตั้งต้น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกกรอง ล้างทำความสะอาด ทำให้แห้ง และบดให้มีขนาดที่ต้องการ ซิลิกาชนิดตกตะกอน จะมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) น้อยกว่า 94 % และปริมาณความชื้นสูง (3-9%) สมบัติบางประการของซิลิกาชนิดตกตะกอนแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติบางประการของซิลิกาชนิดตกตะกอน [2]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### (4) สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) [2]

สารช่วยกระบวนการผลิต คือ สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น นั่นคือใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ทำให้มีอัตราการผลิตสูงขึ้น ปกติจะใช้สารช่วยกระบวนการผลิตในปริมาณที่น้อย ไม่เกิน 5 phr สารช่วยกระบวนการผลิต ได้แก่

1. เปปไทเซอร์ (Peptizers) ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ (Chain scission) ของยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดลดลง

2. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง และยังช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลที่เล็ก ที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ง่าย พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากับยางได้ดี ไม่แพร่ออกที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ของยาง หน้าที่ของพลาสติไซเซอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ช่วยในกระบวนการขึ้นรูป การเติมสารตัวเติมต่างๆ เข้าไปในยางทำให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น พลาสติไซเซอร์จะทำให้ยางทั้งก่อนและหลังการเชื่อมโยงนิ่มลง ความหนืดลดลง ทำให้การไหลของยางเข้าสู่แม่แบบได้ง่ายขึ้น
- เปลี่ยนสมบัติบางประการของยาง ยางที่ใส่พลาสติไซเซอร์จะนิ่มขึ้น ความแข็งลดลง ยางมีโมดูลัสลดลง เบอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น
- ลดต้นทุนการผลิต การใส่สารตัวเติมลงไปในยางปริมาณมากจะทำให้ยางแข็ง ไหลยาก การเติมพลาสติไซเซอร์จะช่วยให้สามารถเพิ่มปริมาณสารตัวเติมได้อีก
- เพิ่มความสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากพลาสติไซเซอร์จะแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ลดลง จะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้ดีขึ้น
- ลดพลังงานในกระบวนการขึ้นรูปยาง การใส่พลาสติไซเซอร์ลงไปในยาง ทำใหยางนิ่มลง ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการผสมยางรวมทั้งอุณหภูมิในการขึ้นรูปยางลดลง

การเลือกพลาสติไซเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับยางสามารถทำได้โดยพิจารณาค่าตัวแปรการละลาย (Solubility parameter) ของพลาสติไซเซอร์และยางที่ใกล้เคียงกัน ตัวอย่างพลาสติไซเซอร์สำหรับยางได้แก่ กรดไขมัน (Fatty acids) น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oil) สารประกอบเอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

1. น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) หมายถึง น้ำมันที่มีองค์ประกอบของน้ำมันส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกไม่อิ่มตัว มีสีคล้ำ ความหนืดสูง
2. น้ำมันแนฟทาติก (Naphthenic oil) หมายถึง น้ำมันที่มีองค์ประกอบของน้ำมันส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นวงแหวนแนฟทาติกอิ่มตัว มีความหนืดปานกลาง
3. น้ำมันพาราฟิน (Paraffinic oil) หมายถึง น้ำมันที่มีองค์ประกอบของน้ำมันส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็น สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว อาจมีกิ่งบ้าง มีความหนืดต่ำ

#### (5) สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Protective agents) [2]

ยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสภาพได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน การเสื่อมสภาพของยางเกิดเนื่องจากโมเลกุลของยางถูกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างโดยออกซิเจนหรือโอโซน การเสื่อมสภาพของยางนี้เรียกว่า "Degradation" การเสื่อมสภาพของยางเกิดขึ้นช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่ง แต่ในธรรมชาติมีแสงแดด ความร้อน และความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนแต่เป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้น นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตซึ่งที่มีการอบยาง (Aging) ผลิตภัณฑ์ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่นการเกิดรอยแตกที่ผิว ผิวแข็ง และสูญเสียความแข็ง กระบวนการเสื่อมสภาพของยางสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 6 แบบดังนี้

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

ในผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น จำเป็นต้องมีการเติมสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidants) หรือ สารแอนตี้โอโซนแนนท์ (Antiozonants) ซึ่งสารทั้งสองชนิดจะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์นานขึ้น สารแอนติออกซิแดนท์และสารแอนตี้โอโซนแนนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) สารแอนติออกซิแดนท์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสี (Staining antioxidant)

สารแอนติออกซิแดนท์ประเภทนี้ เป็นสารประกอบเอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางจะมีสีคล้ำหรือสีตก นิยมใช้กับยางสีดำ

สารแอนติออกซิแดนท์ประเภทนี้ สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ

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

2. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี (Non-staining antioxidant)

สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ที่เป็นสารประกอบประเภทฟีนอล (Phenols) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางทั่วไปโดยเฉพาะยางที่ไม่ดำ ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางตกสีและเปลี่ยนสียาง สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด คือ

- Substituted phenol สมบัติการเป็นแอนติออกซิแดนท์ไม่ดี
- Phenolic sulfide มีความทนต่อความร้อนปานกลาง
- Phenol-aldehyde condensates เป็นสารที่มีสมบัติเท่ากับชนิดเอมีน คือป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน ทนทานต่อความร้อน ทนต่อการหักงอ ไม่เปลี่ยนสียาง
- Hydroquinone derivatives เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ที่อ่อนล้าสำหรับยางที่คงรูปแล้ว เหมาะจะใช้กับยางที่ไม่คงรูปและขาว โดยป้องกันไม่ให้ผิวยางที่คงรูปแห้งจนติดกันไม่ได้ เมื่อนำไปประกอบด้วยกัน

(6) สารคู่ควบ (Coupling agents) [4]

สารคู่ควบ เป็นสารช่วยยึดติดระหว่างสารตัวเติมกับยางให้ยึดติดกันได้ดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เช่น ไสเลน (Silanes) ผลของไซเลนทำให้มอดุลัส ความต้านทานการสึกหรอ การเปลี่ยนแปลงรูปถาวรของยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมดีขึ้น

ไซเลนเป็นสารที่มีสูตรทั่วไปเป็น  $R'-Si-(OR)_3$  หมู่  $R'$  เป็นอะมิโนแคปโต ไวนิล อีพอกซี หรือ Methacryloxy เป็นต้น หมู่  $R$  เป็นอัลคอกซี (alkoxy) จะถูกไฮโดรไลซ์ เกิดเป็นซิลานอลจะไปเกาะอยู่กับสารตัวเติมชนิดอนินทรีย์ เช่น ผิวของซิลิกา เคลย์ (Clay) หรือโลหะออกไซด์ (Metaloxides) เป็นต้น ส่วนอีกด้านหนึ่งคือ  $R'$  จะไปทำปฏิกิริยากับยาง ดังนั้น ไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นตัวยึดหรือประสานให้ยางกับสารตัวเติมอนินทรีย์มาเกาะกัน วิธีใช้ไซเลนทำได้โดยผสมสารตัวกับไซเลน แล้วจึงค่อยผสมกับยาง หรืออาจเอาไซเลนใส่เข้าไปในยาง ขณะผสมกับสารตัวเติมก็ได้ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\gamma$ -Aminopropyltrimethoxy silane ( $H_2NC_3H_6Si(OC_2H_5)_3$ )  $\beta$ -Mercaptoethyltriethoxy silane ( $HSC_2H_4Si(OC_2H_5)_3$ ) ฯลฯ

### (7) สารทำความสะอาด (Cleaning agents) [9]

#### โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA)

ที่อุณหภูมิห้อง MEA จะมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายแอมโมเนียอ่อนๆ สามารถละลายได้ดีในน้ำและเอทานอล เกิดปฏิกิริยาได้ดีกับสารจำพวกกรดหลายชนิดเกิดเป็น Ester amide salt มีจุดเดือดประมาณ  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) [9]

ได้มีการนำ MEA มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทซึ่งพอจะสรุปประโยชน์ของ MEA ได้ดังนี้

- ใช้เป็นสารฟอกสีให้ขาวสว่างในอุตสาหกรรมสิ่งทอ
- ใช้สังเคราะห์ยาต่อต้านเชื้อราในอุตสาหกรรมยา
- ใช้สังเคราะห์สีย้อมคุณภาพสูงในอุตสาหกรรมสีย้อม
- ใช้ล้างหมึกพิมพ์และยางในอุตสาหกรรมหมึกพิมพ์และอุตสาหกรรมยาง
- ใช้เป็นสารสำหรับล้างสนิม
- ใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์หลายชนิด
- ใช้เป็นสารดูดซับก๊าซที่มีฤทธิ์เป็นกรด (Acid gases)
- ใช้เป็นสารป้องกันการกัดกร่อนและขจัดคราบมัน (Degrease) ในงานโลหะ
- สารควบคุมความเป็นกรดต่าง (pH regulation agents)
- เป็นส่วนผสมในสารทำความสะอาดต่างๆ เช่น สารทำความสะอาดผนังและห้องน้ำ สารทำความสะอาดชะล้างท่อ

เนื่องจาก MEA มีฤทธิ์เป็นด่างจึงมีสมบัติเป็นตัวเร่งสำหรับการเชื่อมโยงยางได้ สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ MEA แสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของ MEA [9]

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

การใช้งาน MEA กับโลหะควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับทองแดงหรือโลหะผสมทองแดง อะลูมิเนียมและโลหะที่เป็นกรด เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยากันได้ แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับเหล็ก และสแตนเลส การเก็บรักษาควรหลีกเลี่ยงจากไฟและความชื้น เก็บในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก การใช้งาน MEA มีข้อควรระวังคือ ควรทำในที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก เพราะการหายใจเอาไอระเหยเข้าไปอาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจและมีอาการปวดศีรษะได้ ควรสวมถุงมือให้มิดชิด เพราะการสัมผัสผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคืองและมีผื่นแดงได้

(8) สารให้ฟอง (Blowing agent หรือ Foaming agent) [5]

สารให้ฟองแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สารให้ฟองเชิงเคมี (Chemical blowing agent) และ สารให้ฟองเชิงกายภาพ (Physical blowing agent)

- สารให้ฟองเชิงเคมี มักอยู่ในรูปของแข็งของอนุพันธ์ของสารจำพวก Hydrazine เช่น Azodicarbonamide, p,p'-Oxybis(benzenesulfonyl hydrazine), 5-phenyltetrazole, p-Toluene sulfonyl semicarbazide , Trihydrazine Triazine ซึ่งจะทำให้ก๊าซ เช่น ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ หรือแอมโมเนีย แต่แอมโมเนียไม่เป็นที่นิยมเพราะอาจทำให้เรซิน เกิดการเสียสภาพได้

- สารให้ฟองเชิงกายภาพ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ระหว่างการผลิตมักอยู่ในรูปของเหลว ซึ่งจะเปลี่ยนสถานะเป็นก๊าซระหว่างการผลิตทำให้เรซินมีลักษณะเป็นรูเล็กๆ

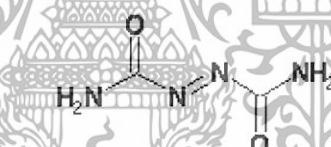
การจำแนกกลุ่มของสารให้ฟอง

1. สารประกอบจำพวกเอโซ (Azo compounds) ได้แก่
  - Azodicarbonamide
2. สารประกอบจำพวกไฮดราซีน (Hydrazine compounds) ได้แก่
  - p-Toluenesulfonylhydrazine
  - p,p'-Oxybis(benzenesulfonyl hydrazine)
  - Benzenesulfonyl Hydrazine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

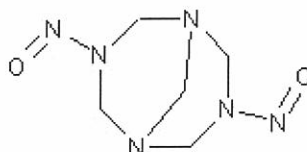
- p-Toluenesulfonyl acetone hydrazone
- 3. สารประกอบจำพวกคาร์บาไซด์ (Carbazides) ได้แก่
  - p-Toluenesulfonyl semicarbazide
  - p,p'-Oxybis(benzenesulfonyl semicarbazide)
- 4. สารประกอบจำพวกเตตระโซล (Tetrazoles) ได้แก่
  - 5-Phenyltetrazole
- 5. สารประกอบจำพวกไนโตรโซ (Nitroso compounds) ได้แก่
  - N,N-dinitroso-pentamethylenetetramine
- 6. สารประกอบจำพวกคาร์บอเนต (Carbonates) ได้แก่
  - Sodium bicarbonate

AZ (Azodicarbonamide) เป็นผลึกของแข็งมักอยู่ในรูปผงละเอียด สีเหลืองหรือสีส้ม มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 นิยมใช้เป็นสารให้ฟองสำหรับยางและพลาสติก เช่น PVC , EVA , PS และ Polyolefin มีคุณสมบัติสลายตัวให้ก๊าซอยู่ในช่วง 205-215 °C (อาจลดลงอีกหากมีการใช้ตัวกระตุ้น) ให้ก๊าซไนโตรเจนประมาณ 65% คาร์บอนมอนอกไซด์ 30% และคาร์บอนไดออกไซด์ 35% สามารถให้ก๊าซประมาณ 220 cm<sup>3</sup>/g มีเถ้าประมาณ 0.2% สาร AZ ไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี สามารถทำให้เกิดการสลายตัวได้ง่าย



รูปที่ 2.4 AZ (Azodicarbonamide) [5]

DNPT (3,7-Di-N-nitrosopentamethylenetetramine) เป็นสารให้ฟองที่นิยมใช้มากชนิดหนึ่งในอุตสาหกรรมยางในรูปของของแข็งสีครีมอ่อน สูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 มีความเสถียรต่อกรดและพวกโลหะ DNPT จะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 190 °C และสามารถควบคุมการสลายตัวให้ก๊าซได้ในช่วง 130-150 °C เมื่อผสมกับตัวกระตุ้น DNPT สามารถให้ก๊าซได้ 275-285 °C มีเถ้าประมาณ 0.2%



รูปที่ 2.5 DNPT (3,7-Di-N-nitrosopentamethylenetetramine) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### (9) สารกระตุ้นหรือคิกเกอร์ (Activator หรือ Kicker) [5]

เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อลดอุณหภูมิสลายตัว (Decomposition temperature,  $T_d$ ) ของสารให้ฟอง การใช้คิกเกอร์ผสมสารให้ฟองในอัตราส่วนที่เหมาะสม (เช่นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักสารให้ฟองต่อคิกเกอร์ 1:1) ทำให้อุณหภูมิขึ้นรูปโฟมต่ำลง ประหยัดพลังงาน และลดการเสียดังต่อการเสียหายหรือการไหม้ เช่น การใช้คิกเกอร์ (ZnO ผสม AZ ในอัตราส่วน 1:1) ทำให้อุณหภูมิสลายตัวของ AZ ลดจาก 200-220 °C เหลือ 160-165 °C ทำให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปโฟมที่อุณหภูมิ 160-165 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ เช่น DCP

### (10) สารให้สี (pigments) [10]

เป็นสารที่เปลี่ยนสีผลิตภัณฑ์ให้มีสีสันตามต้องการ สารให้สีที่ใช้ในยางล้าแม่พิมพ์ คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide;  $TiO_2$ )

ไทเทเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงละเอียด ผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำหรือตัวทำละลายใดๆ ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ไวต่อสารเคมี มีสมบัติทางแสงดีมาก มีความมันเงาสูง มีความสว่างและความทึบแสงดีมาก สามารถกระจายตัวได้ดีและทนต่อสภาวะอากาศสูง

การใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารให้สีในยางล้าแม่พิมพ์ ทำให้ได้ยางล้าแม่พิมพ์สีขาวซึ่งจะทำให้สามารถเห็นคราบสกปรกได้ชัดเจน หลังจากทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้ว

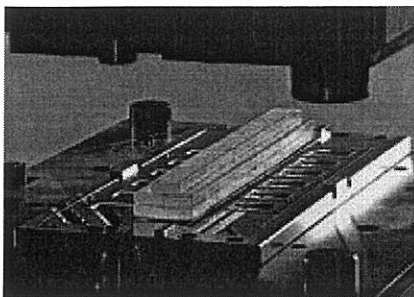
## 2.3 วิธีใช้ยางล้าแม่พิมพ์ [11]

ยางล้าแม่พิมพ์มีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

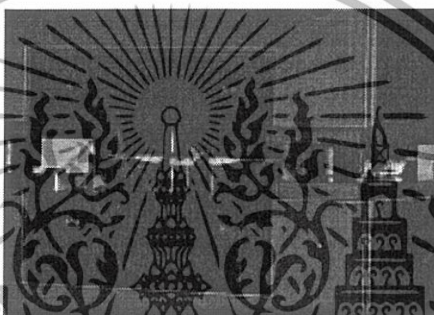


### 1. แม่พิมพ์ก่อนทำความสะอาด

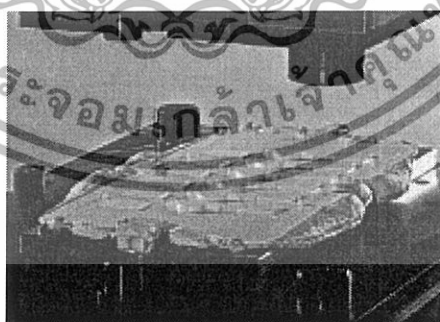
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. ตัดยางล้างแม่พิมพ์ให้มีขนาดเหมาะสมกับโพรงแม่พิมพ์ (สามารถอัดได้เต็มแม่พิมพ์)  
จากนั้นนำมาวางบนโพรงแม่พิมพ์ บริเวณกึ่งกลาง

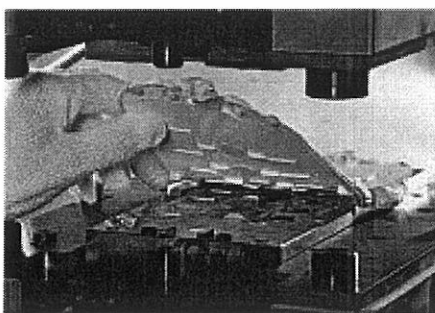


3. ทำการอัดขึ้นรูปยางล้างแม่พิมพ์เหมือนการขึ้นรูปยางปกติ โดยใช้คุณสมบัติเชื่อมโยงของยางล้างแม่พิมพ์



4. เปิดแม่พิมพ์ออกเมื่อการขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5. นำยางล้างแม่พิมพ์ที่ขึ้นรูปแล้วออกจากแม่พิมพ์ คราบสกปรกจะติดออกมาพร้อมกับยางล้างแม่พิมพ์



6. แม่พิมพ์หลังจากทำความสะอาด



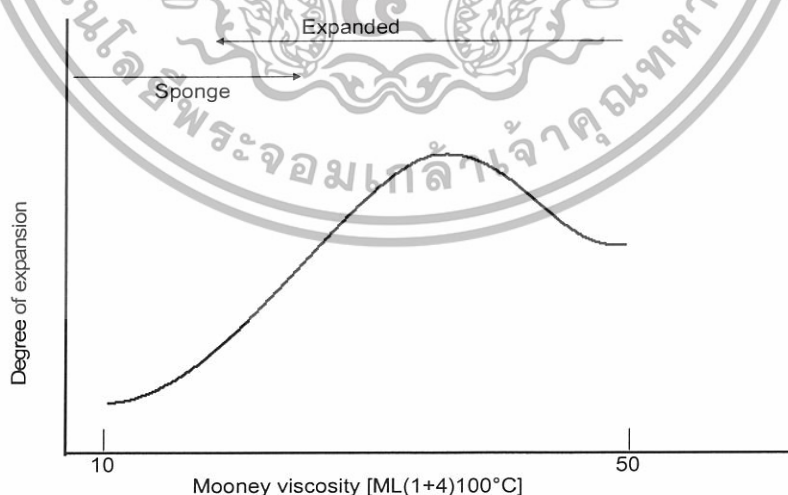
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุมนา แจ่มเหมือน [5] เสนอวิทยานิพนธ์ เรื่องการผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สจล.ปีการศึกษา 2547 โดยศึกษาผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุน (Cellular Rubber) แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

1. Foam rubber
2. Sponge rubber
3. Expanded rubber

Foam rubber เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตมาจากน้ำยาง มีโครงสร้างเซลล์ติดต่อกัน (Open cellular structure) เช่น ยางฟองน้ำ (Latex foam) ส่วน Sponge rubber และ Expanded rubber มีโครงสร้างเซลล์ไม่ติดต่อกัน (Close cellular structure) ในการทำให้เกิดรูพรุนภายใน Sponge rubber และ Expanded rubber ทำโดยการใส่สารให้ฟองซึ่งแตกตัวให้ก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อน การขยายตัวของ Sponge rubber และ Expanded rubber ขึ้นอยู่กับความหนืด (Viscosity) ของยาง สูตรยางที่ใช้ในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber ต้องมีความหนืดต่ำ ความหนืดที่เหมาะสมทำให้การขยายตัวของก๊าซสมบูรณ์ และเมื่อเวลาผ่านไปความหนืดของยางเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ความหนืดต่ำ ยางมีความแข็งแรงต่ำทำให้ฟองก๊าซเกิดการรวมตัวกันหลุดออกจากยางและเกิดการสลายตัวในที่สุด ทำให้ยางมีโครงสร้างแบบเปิดและความหนาแน่นสูงขึ้น ที่ความหนืดสูง ยางมีความแข็งแรงพอที่จะรักษาโครงสร้างของฟองก๊าซทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบปิด แต่ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก ฟองก๊าซถูกควบคุมให้อยู่ภายในยาง ซึ่งทำให้การขยายตัวของฟองก๊าซ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งสำคัญในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber คือชนิดของสารให้ฟอง โดย Sponge rubber ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังสามารถให้สารที่ให้ไนโตรเจน ส่วน Expanded rubber ใช้สารที่ให้ไนโตรเจนเท่านั้น คุณสมบัติการสลายตัวของสารให้ฟองและคุณสมบัติการเชื่อมโยงต้องสมดุลกัน นอกจากนี้สภาวะการผสมก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ความหนืดของพอลิเมอร์ ปริมาณสารที่ทำให้ขึ้น ปริมาณสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยง และชนิดสารให้ฟอง

✓ ขนิษฐา ศรีประทุม และมนต์สุดา นุรารักษ์ [6] เสนอโครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาอย่างล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม สจล. ปีการศึกษา 2546 งานวิจัยนี้ศึกษาถึงชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ได้แก่ ละอองซิลิกา (Fumed silica) และ ซีโอไลต์โซเดียมเอ (Zeolite Na-A) ปริมาณไททานเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสม จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่แบบ พบว่า ปริมาณละอองซิลิกาที่เหมาะสมเท่ากับ 40 phr ให้สมบัติเชิงกลที่ดี ส่วน ซีโอไลต์โซเดียมเอ เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงจะเพิ่มเนื้อเพียงอย่างเดียวและเมื่อเพิ่มปริมาณซีโอไลต์ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

การปรับปรุงความขาวของยางล้างแม่แบบ สามารถทำได้โดย  $TiO_2$  จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ  $TiO_2$  ยางล้างแม่แบบที่ได้จะมีสีที่ขาวมากขึ้น แต่สมบัติเชิงกลลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจาก  $TiO_2$  เป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรง ดังนั้นปริมาณ  $TiO_2$  ที่เหมาะสมเท่ากับ 2 phr เนื่องจากมีความแข็งแรงเพียงพอและไม่ทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงมากนัก

✓ ณัฐนิชา เสงประการ และ มลศิริ ศรีประวีตชัย [7] เสนอโครงการพิเศษเรื่อง การปรับปรุงสมบัติยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม สจล. ปีการศึกษา 2547 งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติสารตัวเติมโดยเปรียบเทียบระหว่าง Hi-Sil<sup>®</sup>233 ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด Hi-Sil<sup>®</sup>HOA และ Hi-Sil<sup>®</sup>255 ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กลงตามลำดับ พบว่า ยางล้างแม่แบบที่ใช้ Hi-Sil<sup>®</sup>233 เป็นสารตัวเติมที่มีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรง และมอดูลัสสูงที่สุดเมื่อเทียบกับยางล้างแม่แบบที่ใช้สารตัวเติมชนิดอื่น ๆ ส่วนยางล้างแม่แบบที่ใช้ ซิลิกา Hi-Sil<sup>®</sup>255 เป็นสารตัวเติมที่มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดมากที่สุด ซึ่งความแข็งแรงฉีกขาดนี้เป็นสมบัติเชิงกลที่สำคัญ เพราะส่งผลต่อความสามารถในการดึงยางออกจากแม่แบบหลังการทำความสะอาด

✓ นพรัตน์ ศิริแก้วกาญจน์ ปรม ศรีวิสุทธิ และอยุทธิ์ วิทย์สุธรรมกุล [8] เสนอโครงการพิเศษเรื่อง การพัฒนาสูตรยางเพื่อลดต้นทุนยางล้างแม่แบบ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม สจล. ปีการศึกษา 2548 MEA (Monoethanolamine) เป็นสารทำความสะอาดมีประสิทธิภาพการทำความสะอาดใกล้เคียงกับ AMP (2-Amino-2-methyl-1-propanol) ซึ่งถูกใช้เป็นสารทำความสะอาดเดิม แม้ว่าการใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาดจะทำให้สมบัติเชิงกลที่สำคัญต่อการนำเอากาสนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางออกจากแม่แบบ ได้แก่ ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรง ฉีกขาดลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ AMP ในปริมาณที่เท่ากัน แต่สมบัติเชิงกลที่ได้ยังคงเพียงพอต่อการนำยางออกจากแม่แบบ MEA จึงสามารถทำหน้าที่เป็นสารทำความสะอาดแทน AMP ได้

การเพิ่มปริมาณสารทำความสะอาดในสูตรยางมีข้อดีคือจะทำให้ประสิทธิภาพการทำ ความสะอาดสูงขึ้น และจำนวนครั้งที่ใช้ทำความสะอาดลดลง แต่มีข้อเสียคือทำให้สมบัติเชิงกลที่สำคัญต่อการนำยางออกจากแม่พิมพ์ลดลงและยากต่อการผสมเพราะไม่สามารถใส่ของเหลว จำนวนมากในยางได้ จุดเหมาะสมสำหรับปริมาณ MEA ในสูตรยางจึงอยู่ที่ 30 phr เพราะเป็น ปริมาณสูงสุดที่สามารถผสมลงในยางได้ มีประสิทธิภาพการทำ ความสะอาดสูงสุดเมื่อเทียบกับการใส่ในปริมาณที่น้อยกว่า และสมบัติเชิงกลยังคงเพียงพอต่อการนำออกจากแม่พิมพ์

Botros S.H.[12] ทำการศึกษาถึงการปรับปรุงความทนทานต่อความร้อนและโอโซนของ ยางบิวทิล ปรับปรุงยาง EPDM ผสมกับยางบิวทิล เนื่องจากยาง EPDM มีโครงสร้างหลักที่เป็น โครงสร้างที่อิมิตัวทั้งหมด จึงทนต่อความร้อน โอโซน และการเกิดออกซิเดชันมาก ยาง EPDM ที่ ศึกษา มี 4 ชนิดคือ Buna AP-447, Vistalon-6505, Keltan-820 และระบบการเชื่อมโยงที่ศึกษา มี 3 ระบบ ได้แก่ การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน/ZEDC การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน/TMTD/MBT และการ เชื่อมโยงด้วย Phenolformaldehyde resin-1054/neoprene-w จากการวิจัยพบว่า การเชื่อมโยง โดยใช้เรซินทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนและโอโซนดีที่สุด ตามด้วย การเชื่อมโยงด้วย กำมะถัน/ZEDC และการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน/TMTD/MBT เมื่อนำยางบิวทิลมาผสมกับยาง EPDM พบว่ายางบิวทิลและยาง EPDM ชนิด Keltan-820 ในสัดส่วน 70:30 ให้ยางที่มีความ แข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนดีที่สุด และจากการทดสอบทางความร้อน โดยนำไปอบที่  $165^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่ามีความ แข็งแรงดึงและสมบัติเชิงกลอื่นๆ ที่ไม่เปลี่ยนแปลง จากการวิจัยนี้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ นำไปใช้ในงานที่อุณหภูมิสูง คือ ที่  $165^{\circ}\text{C}$

Poh B.T. และ NG C.C. [13] ศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อเวลาการเชื่อมโยง (Mooney Scorch time) ของยางธรรมชาติ โดยใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ไซเลนที่ศึกษานี้มี 2 ชนิด คือ  $\gamma$ -Mercaptopropyltrimethoxysilane (A-189) และ Bis(triethoxysilylpropyl)tetrasulfide (Si-69) ใช้อุณหภูมิการเชื่อมโยงที่  $110-160^{\circ}\text{C}$  พบว่าที่อุณหภูมิการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า  $120^{\circ}\text{C}$  เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ A-189 ส่งผลให้เวลาก่อนการเชื่อมโยงลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากหมู่ Thiol ซึ่งเพิ่มอัตราในการเชื่อมโยง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Si-69 ส่งผลให้เวลาก่อนการ เชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากความเกะกะของหมู่ Triethoxysilylpropyl ซึ่งหน่วงการเชื่อมโยงให้ ช้าลง และที่อุณหภูมิการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น เวลาก่อนการเชื่อมโยงไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของ ไซเลน เนื่องมาจากพลังงานทางความร้อนที่ให้มามีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

✓ United States Patent 5563119 [14] สิทธิบัตรฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวันที่ 8 ตุลาคม 1996 คิดค้นโดย Irl E. Ward มีสาระสำคัญคือ ได้มีการนำสารจำพวก Alkanolamine (ในสิทธิบัตรกล่าวอ้างถึง Monoethanolamine) มาเป็นส่วนผสมในสารละลายสำหรับชะล้างแทน ไฮดรอกซีลามี้นโดยใช้ร่วมกับ Tetraalkylammonium hydroxide และ Corrosion inhibitor โดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

1. ใช้สำหรับชะล้างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ตกค้างบนชิ้นงานและวัสดุต่างๆ
2. ใช้สำหรับลอกสารเคลือบต่างๆ ที่ทำจากพอลิเมอร์ เช่น สี แลคเกอร์ หรือสารเคลือบที่ใช้กับแผงวงจรรีเลย์ทรอนิกส์

การใช้ Alkanolamine มีข้อดีเหนือกว่าการใช้สารจำพวกไฮดรอกซีลามี้น คือ มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานมากกว่า เนื่องจากการสัมผัสกับไฮดรอกซีลามี้นโดยตรง จะทำให้ผิวหนังถูกทำลายอย่างถาวรหากหายใจเอาไอระเหยเข้าไปอาจถึงแก่ชีวิตได้ นอกจากนี้ Alkanolamine ยังมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3 วิธีดำเนินการ

### 3.1 แผนการดำเนินการ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงการพิเศษสาขาเคมีอุตสาหกรรม ปีการศึกษา 2546 [3] , 2547 [4] และ 2548 [5] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สจล. เป็นการปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่พิมพ์สำหรับงานอุตสาหกรรม ร่วมกับบริษัทเอส.เค.โพลีเมอร์ จำกัด ซึ่งจะทำการศึกษาลูตรยางที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้ผลิตยางล้างแม่พิมพ์และปรับปรุงลดต้นทุนยางล้างแม่พิมพ์ให้ถูกขึ้นและยังมีประสิทธิภาพดีดังเดิม โดยเป็นการศึกษายางล้างแม่พิมพ์ชนิด “โฟม” ทำได้โดย ใช้สารให้ฟองขึ้นตอนในการทำการวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ออกลูตรยางล้างแม่พิมพ์

3. ทำการผสมและอัดรูปยางล้างแม่พิมพ์

ทำการผสมและอัดขึ้นรูปยางล้างแม่พิมพ์ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และทำการอัดขึ้นรูปยางล้างแม่พิมพ์ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น LP20

4. ทำการทดสอบสมบัติของยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้

1. ศึกษาลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)

2. ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวสารให้ฟองด้วยเทคนิค TGA

3. ทำการทดสอบเชิงกล

- การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D412 [15]

- การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear test) ตามมาตรฐาน ASTM D624 [16]

- ทดสอบความแข็งแรงกด (Hardness test) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [17]

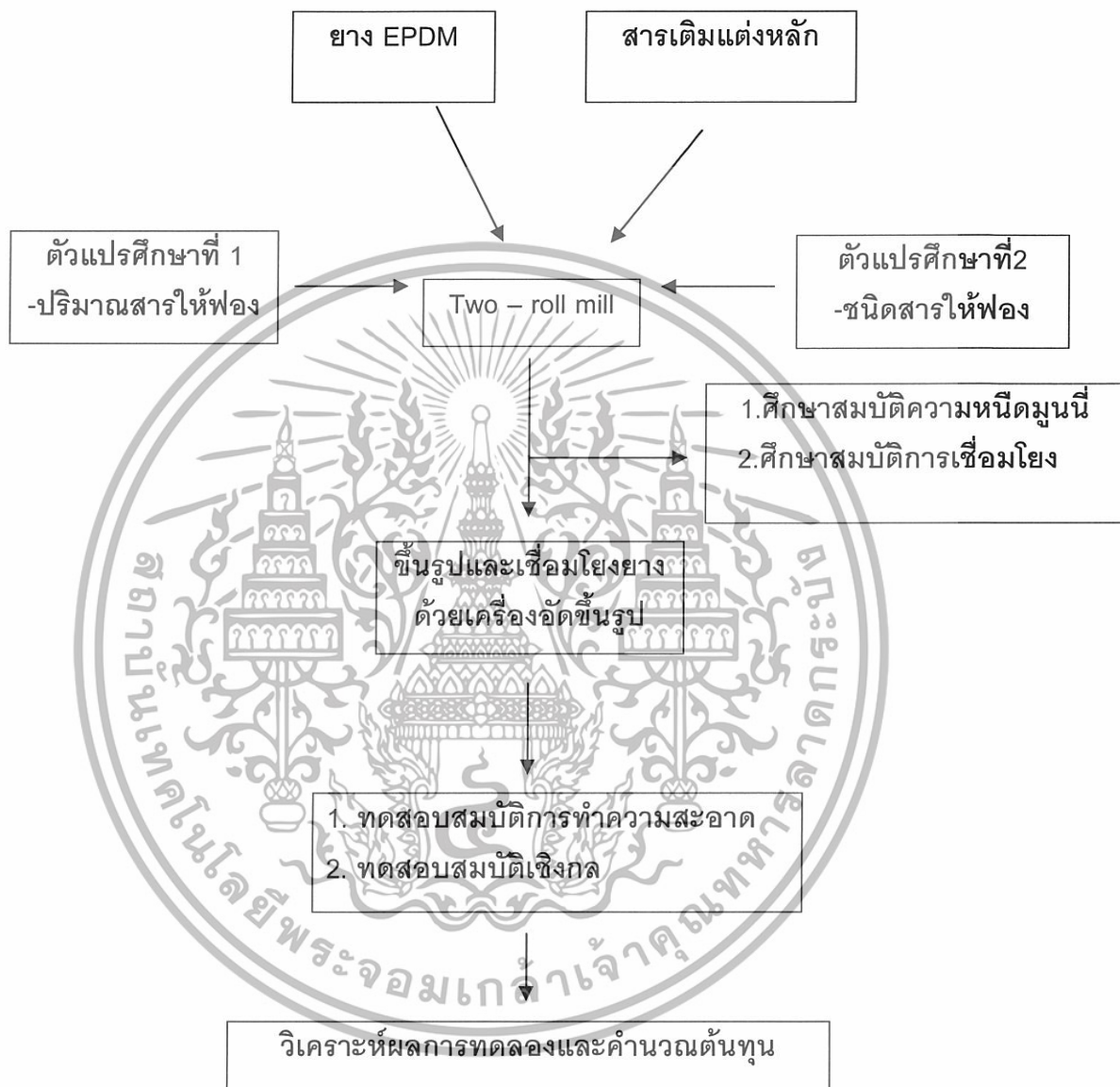
4. การทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้

5. การศึกษาสัณฐานวิทยา

5. การวิเคราะห์ต้นทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แผนภาพการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขอบเขตการศึกษาออกเป็น 2 ตอนหลัก ๆ ด้วยกัน คือ  
ตอนที่ 1 ศึกษาผลของชนิดสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของยางล้างแม่พิมพ์  
ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณสารทำให้เกิดฟองต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของยางล้างแม่พิมพ์

### 3.2 สารเคมีและอุปกรณ์

#### สารเคมี

1. ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-propylene rubber ; EPDM) NORDEL<sup>®</sup> IP 4520 บริษัท Dow Chemical Company (Mooney Viscosity ML (1+4) 125 °C 20)
2. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรดการค้า บริษัท Global Chemical Co.,Ltd.
3. กรดสเตียริก (Stearic acid) บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
4. ซิลิกาชนิดตกตะกอน (Precipitated silica) เกรดการค้า Hi sill<sup>®</sup> 255 G-S
5. ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide;DCP) ความเข้มข้น 40% เกรดการค้า บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
6. สารคู่ควบไซเลน (Coupling agent) SR-350 บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
7. Polyethylene glycol A16011 Cabowax 3350 PEG
8. TiO<sub>2</sub> บริษัท Kijpaiboon Chemical Co.,Ltd.
9. AZ (Azodicarbonamide) บริษัท Dongjin Chemical Co.,Ltd.
10. DNPT (3,7-Di-N-nitrosopentamethylenetetramine)
11. Urea บริษัท Dongjin Chemical Co.,Ltd.
12. MEA ( Monoethanolamine) เกรดการค้า บริษัท รวมเคมี จำกัด
13. สารแอนต็อกซิแดนท์ TMO (Trimethyl quinoline) เกรดการค้า
14. น้ำมันพาราฟิน (Parafinic oil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ EPDM NORDEL<sup>®</sup> IP 4520 [18]

| Typical Polymer                | Test Method | Value       |
|--------------------------------|-------------|-------------|
| Mooney Viscosity ML 1+4 125 °C | ASTM D 1646 | 20          |
| Polymer Composition, mass%     |             |             |
| Ethylene                       | ASTM D 3900 | 50          |
| Propylene                      | ASTM D 3900 | 45          |
| Ethylidenenomene               | ASTM D 6047 | 5.0         |
| Molecular Weight Distribution  | Dow Method  | Medium      |
| Product Density, g/cc          | ASTM D 297  | 0.86        |
| Residual Transition Metal, ppm | Dow Method  | 10 maximum  |
| Ash Content, mass%             | ASTM D 296  | 0.1 maximum |
| Total Volatile, mass%          | Dow Method  | 0.4 maximum |

#### อุปกรณ์

1. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น LP 20 บริษัท แลบเทคเอน-จิเนียร์ริง จำกัด
2. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท แลบเทคเอนจิเนียร์ริง จำกัด
3. เครื่องวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscometer) บริษัท Shimadzu จำกัด Model SMV-201
4. เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Rotorless Moving-Die Rheometer : Curelastimeter) บริษัท Nichigo Shigi Model II F
5. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal tester) บริษัท Intro LLOYD Instruments จำกัด
6. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Hardness tester) บริษัท Intro Enterprise จำกัด
7. เครื่องอัดขึ้นรูป (Hydrolic press) บริษัท Kuemin Machinery Co.,Ltd. รุ่น VO-200 ความดัน 200 psi
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก บริษัท METTLER-TOLEDO รุ่น AB 204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 1. ศึกษาและเปรียบเทียบชนิดของสารทำให้เกิดฟอง

##### การเตรียมยางผสมสูตร

- 1.1 ตัดและชั่งสารเคมีต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.2
- 1.2 ทำการผสมยางสูตรเริ่มจากการนำยาง EPDM มาทำการบดย่อย (Mastication) ที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 30 °C โดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) จนกระทั่งยางพันรอบลูกกลิ้งทำการกรีดฟ้ายางจนกระทั่งยางนิ่มขึ้น ใช้เวลาประมาณ 3 นาที
- 1.3 เติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ได้แก่ ZnO, TiO<sub>2</sub>, TMQ, PEG และค้อย ๆ เติม Silica ลงไปเรื่อย ๆ ในขณะที่พยายามเติมสารประกอบจำพวกของเหลว Parafinic Oil, SR-350 เพื่อช่วยให้ง่ายในการผสม จากนั้นเติม Stearic acid ลงไปกรีดฟ้ายางต่อจนสารเคมีกระจายทั่วทั้งอนุภาคยาง
- 1.4 ตัดแผ่นยางผสมสูตรที่ได้เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2 x 2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำมาวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องมูนนี่วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer) กำหนดอุณหภูมิในการวัดความหนืดที่ 100 °C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4 (100 °C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมयोग
- 1.5 เติมสารเชื่อมयोग DCP และสารที่ใช้ทำควาละลาย MEA และสารให้ฟองลงไป (AZ หรือ DNPT) ทำการบดผสมต่อไป โดยการกรีดฟ้ายาง และใส่คิกเกอร์ Urea ลงไปด้วย กรีดฟ้ายางจนกระทั่งยางมีความอ่อนตัวและสารเคมีผสมเข้ากันดีกับเนื้อยาง โดยใช้เวลาในขั้นตอนนี้ประมาณ 10 นาที
- 1.6 ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ห่างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร แล้วกรีดฟ้ายางออกจากลูกกลิ้ง
- 1.7 ตัดแผ่นยางผสมสูตรเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 2x2 นิ้ว แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมयोग (Cure characteristic) ด้วยเครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง เพื่อหาเวลาก่อนการเชื่อมयोगยาง หรือเวลาสกอร์ช (Scorch time ; T<sub>50</sub>) และเวลาการเชื่อมयोग (Cure time ; t<sub>90</sub>)
- 1.8 นำยางไปทดสอบเพื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์
  - 1.8.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบการดึง (Tensile test) ด้วยเครื่อง Universal Tester ตามมาตรฐาน ASTM D412 [15] โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ (Dumbell shape) กำหนดสภาวะเครื่อง ทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                              |     |                    |
|------------------------------|-----|--------------------|
| ด้วยความเร็วในการดึงยึด      | 500 | มิลลิเมตรต่อวินาที |
| ความยาวเกจ                   | 25  | มิลลิเมตร          |
| ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ | 5   | กิโลนิวตัน         |
| จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ | 10  | ชิ้นงาน            |

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

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด} = [(l-l_0)/l_0] \times 100$$

เมื่อ  $l$  = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน (m)

$l_0$  = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน (m)

#### 1.8.2 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด (Tear test)

ด้วยเครื่อง Universal Tester ตามมาตรฐาน ASTM D624 [16] โดยเตรียมชิ้นงาน

ตัวอย่างรูปปีกนกตามมาตรฐาน ASTM Die C [16] กำหนดสถานะในการทดสอบดังนี้

|                              |     |                    |
|------------------------------|-----|--------------------|
| ความเร็วในการดึงยึด          | 500 | มิลลิเมตรต่อวินาที |
| ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ | 5   | กิโลนิวตัน         |
| จำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบ | 5   | ชิ้นงาน            |

#### 1.8.3 การทดสอบความแข็งกด (Hardness test)

นำชิ้นงานที่เตรียมได้มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบน้ำหนักคงที่

(Dead load hardness tester) ชนิด Shore A ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D2240 [17] ซึ่งอ่านค่าความแข็งกดได้โดยตรงจากเครื่องจากการกดที่ตัวอย่างที่หนาน้อยกว่า  $\frac{1}{4}$  นิ้ว รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย 10 ครั้งในการตรวจสอบต่อ 1 ชิ้นงานตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สูตรผสมยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

| สาร                    | อัตราส่วนโดยน้ำหนัก<br>(ส่วนในร้อยส่วนของยาง , phr) |
|------------------------|---|
| EPDM                   | 100   |
| TMQ                    | 1   |
| PEG                    | 3.6   |
| Silica                 | 60  |
| TiO <sub>2</sub>       | 2   |
| Parafinic oil          | 10  |
| ZnO                    | 7   |
| Stearic acid           | 2   |
| SR-350                 | 2   |
| DCP                    | 5   |
| AZ หรือ DNPT*          | 1,2   |
| Urea                   | 1,2   |
| Monoethanolamine (MEA) | 30  |

หมายเหตุ \* ปัจจัยที่ศึกษา

## 2 การศึกษาการสลายตัวของสารให้ฟอง

### 2.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางล้างแม่พิมพ์

นำยางล้างแม่พิมพ์มาทดสอบ TGA โดยใช้สภาวะดังนี้

- ชั่งตัวอย่างยางประมาณ 5 มิลลิกรัม
- อัตราการให้ความร้อน 20 °C / min
- ช่วงอุณหภูมิ 50 - 600 °C

### 2.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของยางล้างแม่พิมพ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้มาหักที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) โดยแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 20 นาที แล้วหักชิ้นงานเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยอย่าให้รอยที่หักถูกสัมผัส

- ทำการเคลือบชิ้นงานด้วยทองคำ

- นำชิ้นงานไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM

### 2.3 การทดสอบการทำความสะอาดกับแม่พิมพ์ที่ใช้งานจริง

นำยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรมาอัดกับแม่พิมพ์ที่ใช้งานจริงด้วย เครื่องอัดขึ้นรูปยางรุ่น VCC-550S2 เป็นเวลา 4 นาที ที่อุณหภูมิ 175 °C และทำการล้างซ้ำจนกว่าคราบสกปรกบนแม่พิมพ์จะหมดไปแล้วเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่ทำความสะอาดแม่พิมพ์ด้วยยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้ในแต่ละสูตรที่

### 3 การหาความหนาแน่นของยางล้างแม่พิมพ์

นำชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมาหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Sg) เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นสามารถหาค่าได้ง่าย และรวดเร็วโดยวิธีการคือทำการตัดชิ้นงานแล้วนำไปชั่งน้ำหนักโดยทำการชั่งในอากาศ และชั่งในน้ำจากนั้นนำไปแทนค่าในสูตรเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = (\text{น้ำหนักในอากาศ} - \text{น้ำหนักในน้ำ}) / \text{น้ำหนักในอากาศ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในอุตสาหกรรมยางมักจะประสบปัญหาในเรื่องการทำความสะอาดแม่พิมพ์ วิธีที่ใช้ทั่วไปคือ การใช้แรงงานคนในการขัด ซึ่งต้องใช้เวลาในการทำความสะอาดนาน ส่งผลให้กำลังการผลิตลดลง ในงานวิจัยนี้จึงได้ผลิตยางคอมปาวด์ล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมขึ้น เพื่อลดปริมาณยางที่ใช้ในการล้างแม่พิมพ์และเวลาในการทำความสะอาดรวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความสะอาดแม่พิมพ์มากขึ้น

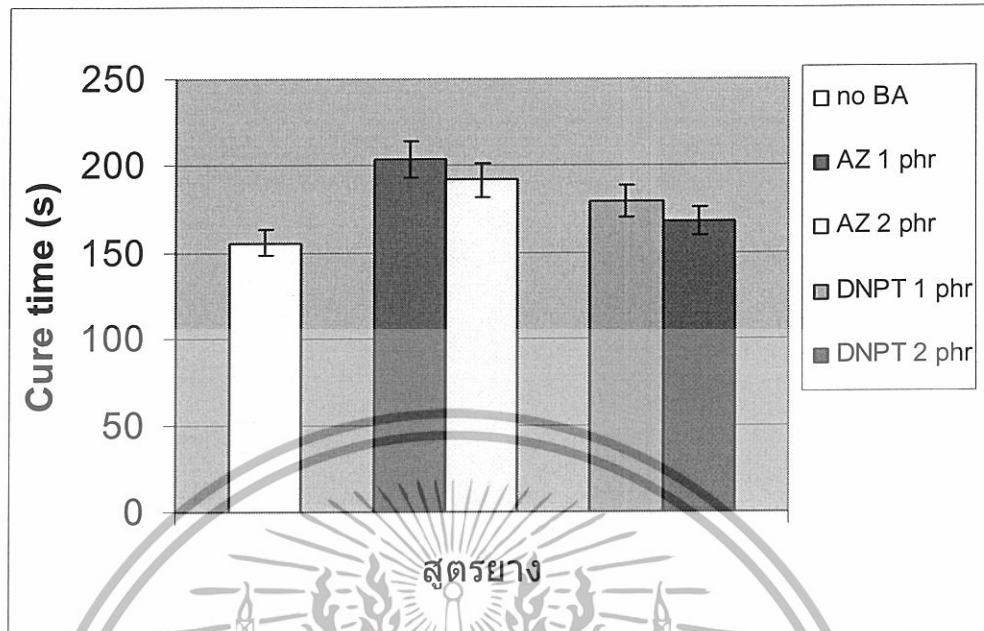
ยางคอมปาวด์ล้างแม่พิมพ์มีลักษณะที่ต้องคำนึงถึง ดังนี้

- สามารถเก็บสารที่ใช้ทำความสะอาดได้ เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของยางล้างแม่พิมพ์คือ สารที่ใช้ทำความสะอาด ซึ่งจะทำงานได้เมื่อเกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นยางล้างแม่พิมพ์นี้ต้องสามารถเก็บสารที่ใช้ทำความสะอาดไว้ได้จนถึงยางเกิดการเชื่อมโยง
- มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดูลัส เพื่อป้องกันการฉีกขาดระหว่างการดึงยางออกจากแม่พิมพ์ เนื่องจากแม่พิมพ์มีลักษณะที่ซับซ้อน
- มีสีอ่อน ๆ หรือสีขาว เพื่อที่จะได้เห็นถึงคราบสกปรกที่ติดออกมากับยางล้างแม่พิมพ์ได้ง่าย
- คุณสมบัติละลายตัวของสารให้ฟองต้องต่ำกว่าหรือใกล้เคียงที่ยางเกิดการเชื่อมโยง
- สิ่งที่สำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึง คือ คุณสมบัติที่ยางเกิดการเชื่อมโยง จะต้องมีความใกล้เคียงกับจุดเดือดของสารทำความสะอาด เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำ ความสะอาดสูงสุด

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาชนิดและปริมาณของสารให้ฟองที่มีผลต่อสมบัติของยางล้างแม่พิมพ์ ซึ่งได้นำสารให้ฟอง 2 ชนิด ได้แก่ AZ และ DNPT โดยใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาด ทำการเตรียมยางทั้งหมด 5 สูตร จากนั้นนำยางล้างแม่พิมพ์ที่เตรียมได้มาศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา ความหนาแน่น และสมบัติการทำความสะอาด ผลการวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 การศึกษาระยะเวลาการเชื่อมโยง ( $t_{90}$ )



รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงระยะเวลาการเชื่อมโยง ของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT

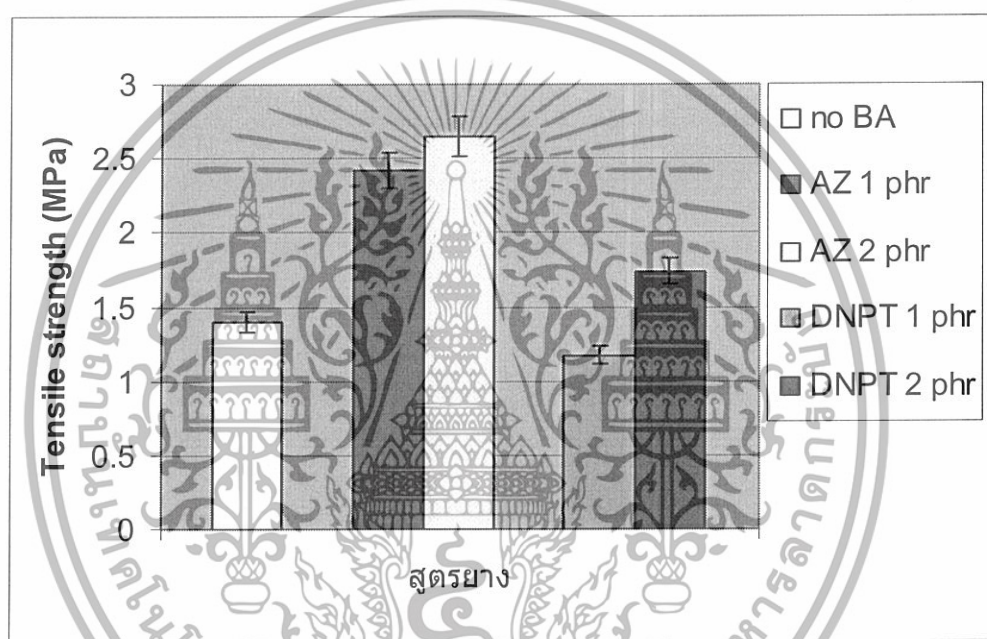
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เวลาในการเชื่อมโยงของยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติมสารให้ฟองลงไปนั้น ใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานกว่ายางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่มีการเติมสารให้ฟอง เป็นผลจากในขณะที่ทำกรขึ้นรูป สารให้ฟองจะสลายตัว โดยดูดความร้อนบางส่วนเข้าไปใช้ในการสลาย ทำให้ความความร้อนของระบบลดลง เป็นผลให้ระยะเวลาในการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งคือ ลักษณะของฟองที่เกิดขึ้น ในกรณีของ AZ 1 phr และ AZ 2 phr เมื่อสารให้ฟองสลายตัวเป็นก๊าซ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวออกจากชิ้นงาน ไม่ถูกกักเก็บอยู่ในชิ้นงาน ทำให้ความความร้อนลดลง เนื่องจากถูกก๊าซนำพาความร้อนออกไปด้วย จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ระยะเวลาในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ในกรณีของ DNPT 1 phr และ DNPT 2 phr ฟองที่เกิดขึ้นจะถูกกักเก็บอยู่ในชิ้นงาน ทำให้ความความร้อนส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในระบบทำให้ระยะเวลาเชื่อมโยงไม่เพิ่มขึ้นมากนัก เมื่อเทียบกับ AZ 1 phr และ AZ 2 phr

การใช้ kicker ที่เป็น urea ซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบส จะทำให้การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะเวลาในการเชื่อมโยงลดลง ในกรณีที่ AZ 2 phr มีระยะเวลาเชื่อมโยงต่ำกว่า AZ 1 phr ก็เช่นกัน ปริมาณ kicker ที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ระยะเวลาในการเชื่อมโยงจึงลดลง เช่นเดียวกับ DNPT 1 phr และ DNPT 2 phr มีระยะเวลาในการเชื่อมโยงลดลงตามลำดับนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

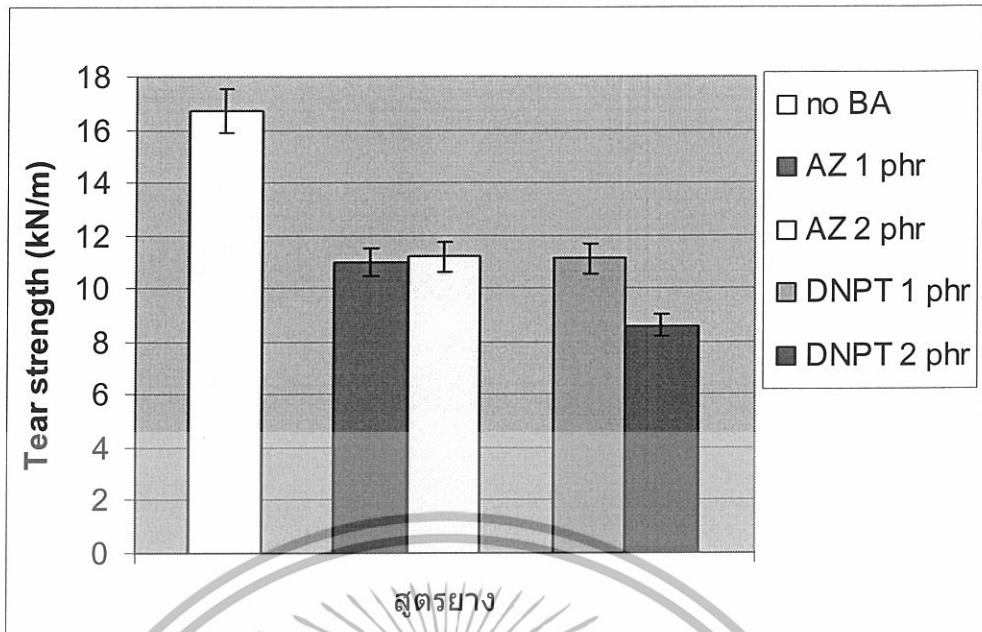
#### 4.2 การศึกษาสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางโฟม ทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากการเตรียมยางผสมสูตรที่มีการเติมสารให้ฟอง จะต้องทำการควบคุมการกระจายตัวของสารให้ฟอง ให้ได้สม่ำเสมอมากที่สุด ซึ่งการกระจายตัวของสารให้ฟอง จะมีผลต่อกลุ่มฟองที่เกิด ว่ามีขนาดรูพรุนและลักษณะอย่างไร รูพรุนที่เกิดจะเป็นตัวแปรหลักถึงสมบัติเชิงกลของยาง การที่ยางมีรูพรุน จุดด่างลั่วจะทำให้เกิดตำหนิ (defect) ในชิ้นงาน ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง แล้วมีช่วงที่ค่อนข้างกว้าง จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบด้วยจำนวนชิ้นงานที่มากกว่าการทดสอบชิ้นงานยางตามมาตรฐานปกติ โดยทำการทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 10 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น

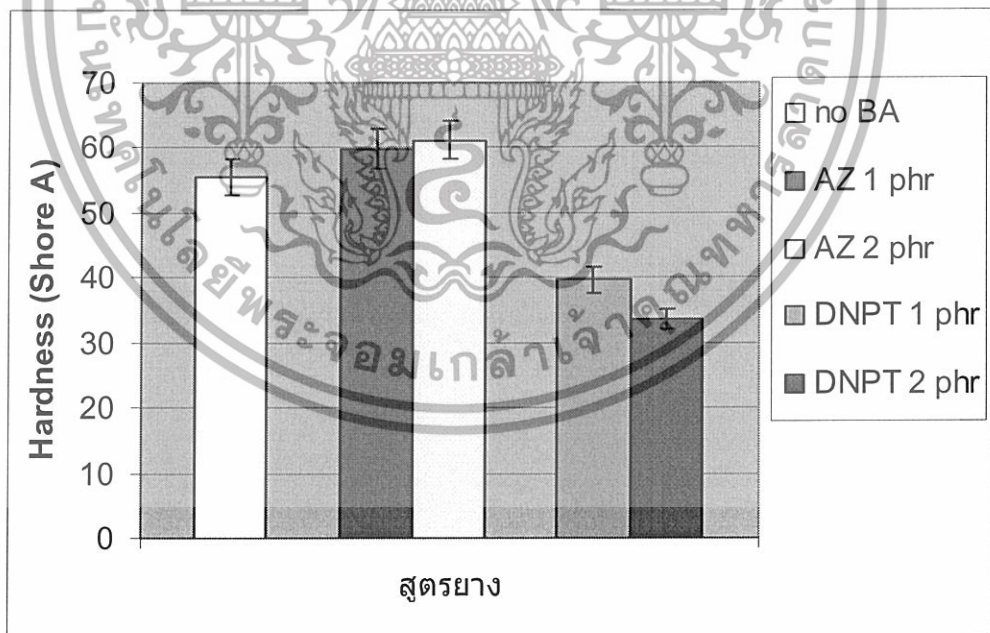


รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงค่า Tensile strength ของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

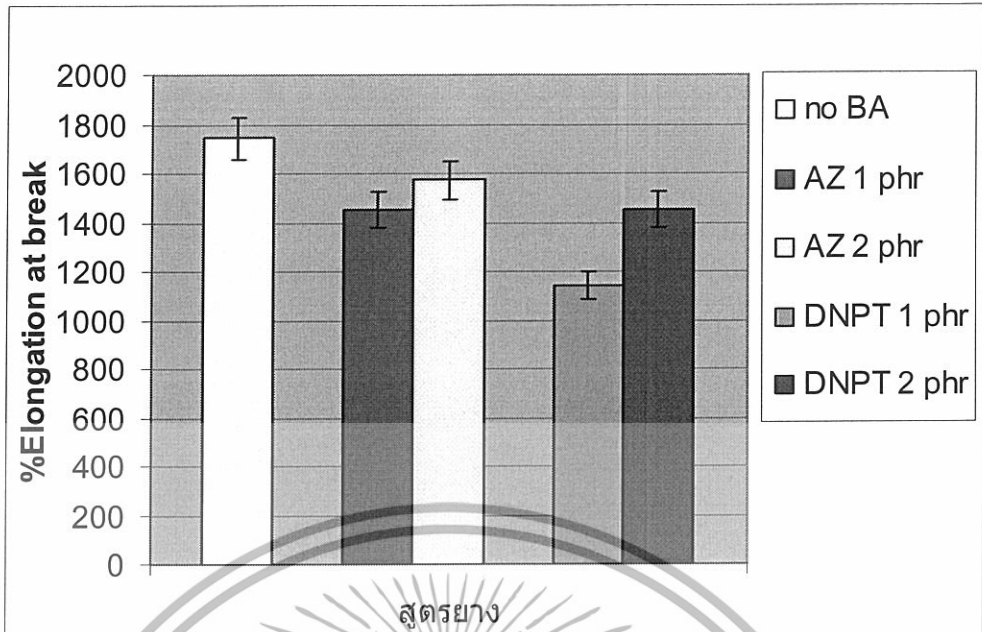


รูปที่ 4.3 แผนภูมิ แสดงค่า Tear strength ของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT

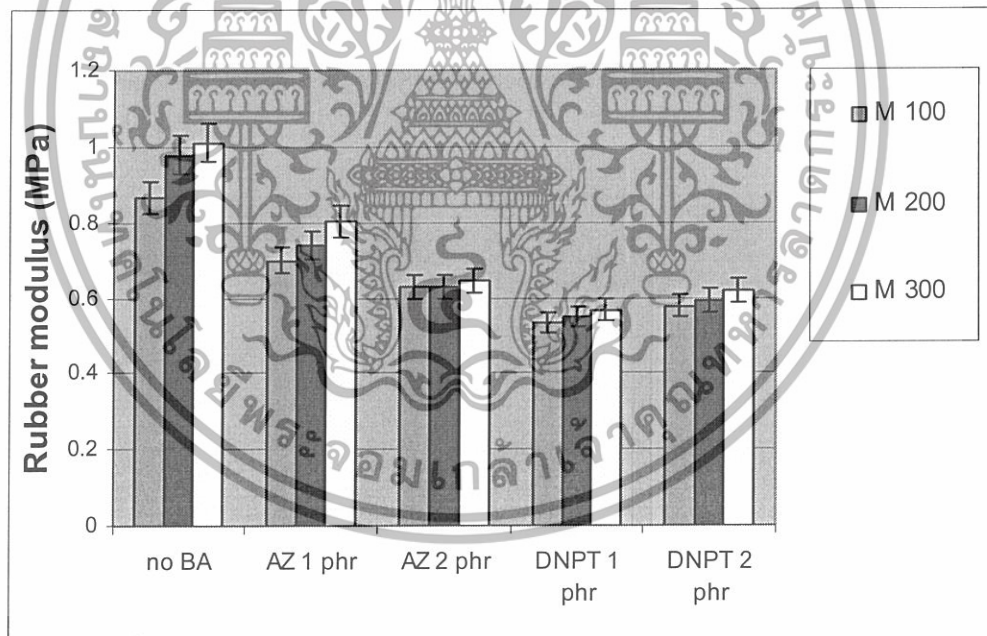


รูปที่ 4.4 แผนภูมิ แสดงค่า Hardness (Shore A) ของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดง ค่า %Elongation at break ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดง Rubber modulus ของยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมเปรียบเทียบผลของชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ทำให้ทราบว่า ชนิดและปริมาณของสารให้ฟองมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ โดย จากรูปที่ 4.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบ ยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารให้ฟองกับ ยางล้างแม่พิมพ์ที่ใส่สารให้ฟอง AZ และ DNPT ยางล้างแม่พิมพ์ที่ใส่สารให้ฟอง จะมีค่า Tensile strength สูงกว่า ยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารให้ฟอง เนื่องจากการใส่สารให้ฟองจะมีการผสมคิกเกอร์กับสารให้ฟองในปริมาณ 1:1 โดยที่คิกเกอร์จะมีฤทธิ์เป็นเบส จึงทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า Tensile strength เพิ่มขึ้น จะเห็นผลได้ชัดในยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติมสารให้ฟอง AZ 1 phr และ 2 phr เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง AZ จะทำให้ได้ค่า Tensile strength ที่สูงขึ้น แต่ในขณะที่ ยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติมสารให้ฟอง DNPT จะมีปริมาณฟองที่ถูกกักเก็บในชิ้นงานมากกว่า AZ ทำให้ชิ้นงานมีตำหนิกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน จึงทำให้ค่า Tensile strength ต่ำกว่า AZ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการเติมสารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr พบว่าการเติม DNPT 2 phr จะมีค่า Tensile strength เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของปริมาณคิกเกอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพเชื่อมโยงสูงขึ้น ทำให้ผลจากฟองที่เกิด (ทำให้ Tensile strength ลดลง) มีผลน้อยกว่า ในขณะที่การเติม DNPT 1 phr ปริมาณคิกเกอร์ที่ใส่มีผลต่อประสิทธิภาพเชื่อมโยงที่ดีขึ้นเช่นกัน แต่ถูกหักล้างด้วยผลของฟองที่เกิดทำให้ Tensile strength ไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารให้ฟองทั้ง AZ และ DNPT จะทำให้ค่า Tensile strength เพิ่มขึ้น เนื่องจาก การใส่ปริมาณคิกเกอร์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงมากขึ้นนั่นเอง

จากรูปที่ 4.3 ค่า Tear strength เมื่อมีการเติมสารให้ฟองลงไป ในยางล้างแม่พิมพ์จะมีผลทำให้ค่าดังกล่าวลดลงเนื่องจาก การเกิดฟองจะทำให้ชิ้นงานมีตำหนิ ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความแข็งแรงฉีกขาดลดลง ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวและปริมาณฟองที่เกิด และเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง ก็ทำให้มีตำหนิที่เกิดในชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้ค่า Tear strength ลดลงตามผลการทดลอง การเติม DNPT 2 phr จะทำให้มีค่า Tear strength ต่ำกว่าการเติม DNPT 1 phr ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเจนว่าการเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง AZ เนื่องจาก DNPT เมื่อขึ้นรูปมีปริมาณฟองที่เกิดขึ้นมากกว่า ในขณะที่สารให้ฟอง AZ นั้น เมื่อเกิดการสลายตัวของสารให้ฟอง ฟองที่เกิดจะกระจายออกไปนอกชิ้นงานทำให้มีฟองอยู่ในชิ้นงานน้อยกว่า DNPT แม้ว่า จะทำการเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง AZ ปริมาณฟองที่ถูกกักเก็บในชิ้นงานก็ยังคงน้อยกว่า DNPT ทำให้ค่า Tensile strength ของ AZ 1 และ 2 phr ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนเหมือนการเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง DNPT

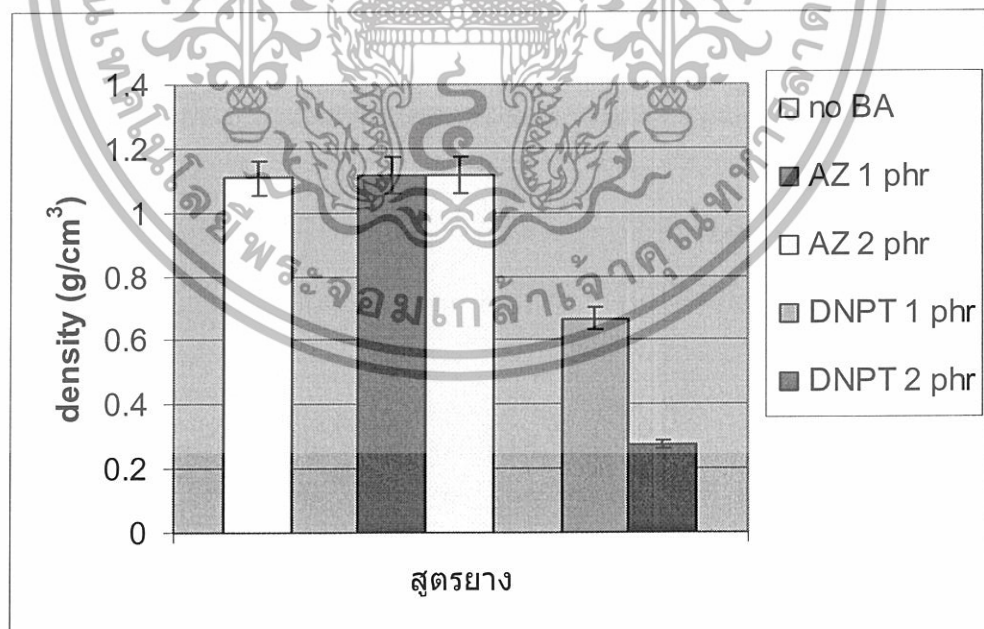
การศึกษาค่า Hardness ทำให้ทราบว่า การเติมสารให้ฟองจะมีผลต่อค่า Hardness ทั้งชนิดและปริมาณของสารให้ฟอง โดย AZ จะมีความแข็งกด มากกว่า DNPT เนื่องจากผลของปริมาณฟองที่เกิด โดย DNPT จะมีปริมาณฟองที่เกิดขึ้นมากกว่า ทำให้ความแข็งกดลดลง การเพิ่มปริมาณสารให้ฟองใน AZ เนื่องจาก มีปริมาณคิกเกอร์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมโยงดีขึ้น และ AZ มีการสลายตัวน้อยกว่า DNPT ที่อุณหภูมิขึ้นรูป จากภาคผนวก ก และ ภาคผนวก ข จึงทำให้ AZ มีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ DNPT มีค่าความแข็งแรงลดลง เนื่องจากปริมาณฟองที่เกิดขึ้นมากกว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง

จากรูปที่ 4.5 %Elongation at break จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อทำการเติมสารให้ฟองจะทำให้ % Elongation at break ของยางลดลง เนื่องมาจากฟองที่เกิดขึ้นในยางจะทำให้ยางมีตำหนิในบริเวณดังกล่าว เมื่อทำการดึงยืดยางไปในระยะหนึ่งยางจะเกิดขาดในบริเวณที่มีตำหนิอยู่มาก แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารให้ฟองทั้ง 2 ชนิด พบว่า % Elongation at break สูงขึ้น ทั้งที่น่าจะลดลงจากผลของฟองที่เกิด สาเหตุที่ทำให้ % Elongation at break เพิ่มขึ้น มาจากคิกเกอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เมื่อประสิทธิภาพการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ % Elongation at break เพิ่มขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.6 Rubber modulus เมื่อเติมสารให้ฟองมีแนวโน้มว่า Rubber modulus จะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบชนิดสารให้ฟอง DNPT มีแนวโน้มว่าจะมีค่า Rubber modulus ต่ำกว่า AZ โดยเป็นผลจากปริมาณฟองที่ถูกกักเก็บในชิ้นงาน DNPT จะมีปริมาณฟองที่ถูกกักเก็บในชิ้นงานมากกว่า AZ ทำให้มีความนิ่มมากกว่ายางจึงถูกดึงยืดที่ระยะเท่ากันแต่ใช้แรงที่น้อยกว่า

#### 4.3 การศึกษาความหนาแน่นของยาง



รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นของยางล้างแม่พิมพ์หลังทำการขึ้นรูป โดยเปรียบเทียบชนิดและปริมาณสารให้ฟอง AZ และ DNPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

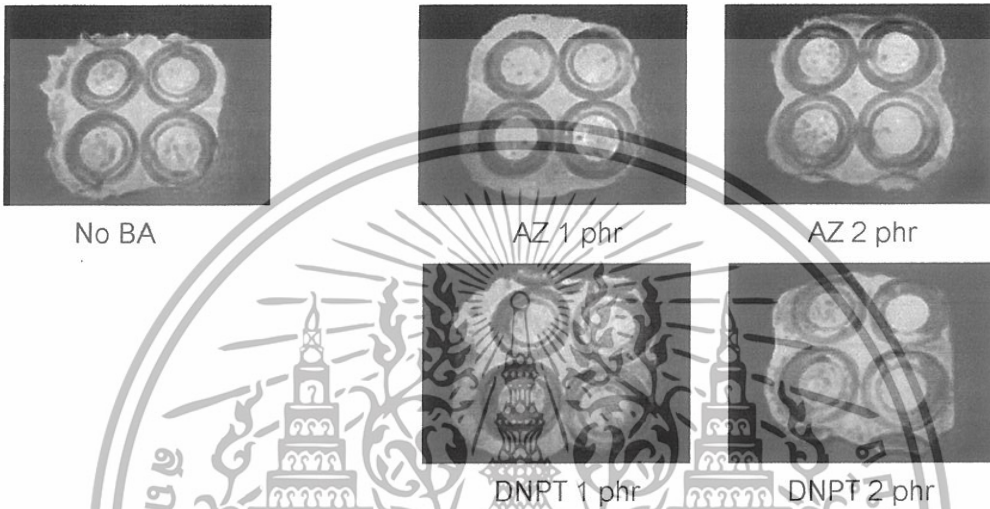
จากการศึกษาค่าความหนาแน่นเป็นการยืนยันผลที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน จากผลที่ได้ทำให้ทราบว่า สารให้ฟองที่มีการสลายตัวเป็นก๊าซแล้วคงอยู่ในชิ้นงานในรูปของฟอง คือ DNPT 1 และ 2 phr เมื่อ DNPT สลายตัวเป็นฟอง ฟองที่เกิดขึ้นจะถูกกักเก็บในชิ้นงานเป็นผลให้ความหนาแน่นของยางลดลง ในขณะที่ AZ มีการสลายตัวแต่ก๊าซที่เกิดขึ้น มีการกระจายออกไปนอกชิ้นงาน ทำให้ปริมาณฟองที่อยู่ในชิ้นงานน้อยมากทำให้ค่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับ ยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ใส่สารให้ฟอง ผลที่ได้ สอดคล้องกับกราฟ TGA ของยางผสมสารให้ฟอง AZ (ภาคผนวก ก) ที่มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวบางส่วนสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ทำให้มีสารบางส่วนยังคงไม่สลายตัวทำให้ได้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นน้อย เมื่อฟองไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างเต็มประสิทธิภาพโอกาสที่ฟองจะถูกกักเก็บในชิ้นงานจึงลดลงไปด้วย ทำให้ Tensile strength และ Hardness มีค่าที่สูงกว่าการใส่สารให้ฟอง DNPT และจากความหนาแน่นของยางล้างแม่พิมพ์ที่ใส่สารให้ฟอง DNPT การเพิ่มปริมาณสารให้ฟองมีผลทำให้ปริมาณฟองที่ถูกกักเก็บในชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นลดลง และจากกราฟ TGA ของยางผสมสารให้ฟอง DNPT (ภาคผนวก ข) ซึ่งช่วงการสลายตัวของ DNPT อยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปทำให้มีการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิขึ้นรูป ทำให้มีปริมาณฟองอยู่ในชิ้นงานเป็นจำนวนมาก ทำให้สมบัติหลายประการลดลง ต่ำกว่า AZ เช่น ค่า Tensile strength, Tear strength และ Hardness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ประสิทธิภาพการทำความสะอาด

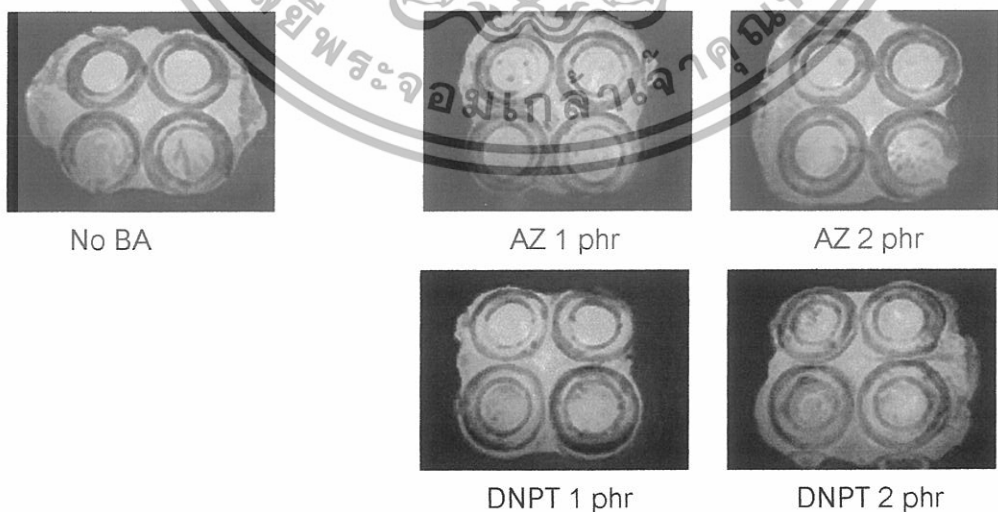
การทดสอบประสิทธิภาพการทำความสะอาดยาล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติมสารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณที่ต่างกัน ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปยางรุ่น VCC-550S2 เป็นเวลา 4 นาที ด้วยอุณหภูมิ 175 °C ทำการทดสอบทั้งหมด 7 ครั้ง โดยแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นแม่พิมพ์สำหรับยาง NR ใต้สำหรับร้อยรวมสายไฟ

ล้างครั้งที่ 1



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 1

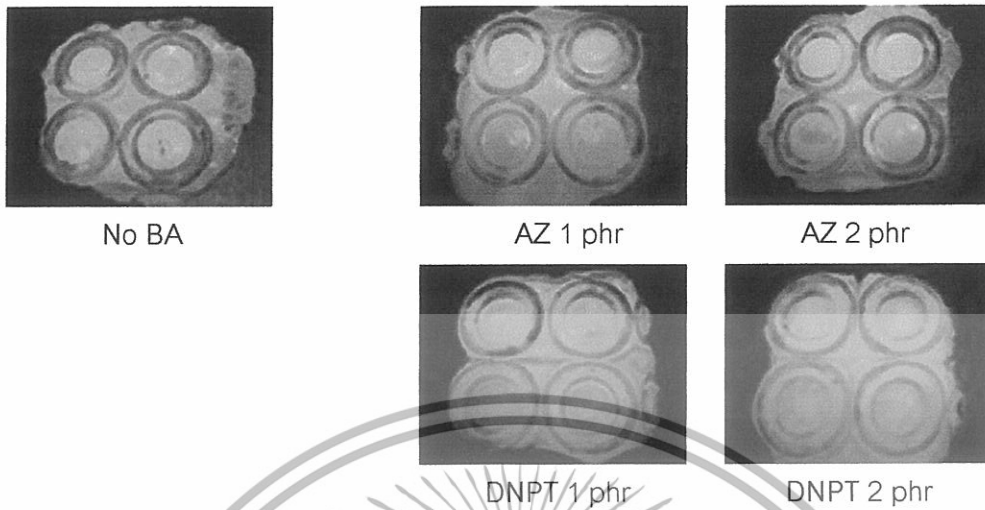
ล้างครั้งที่ 2



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 2

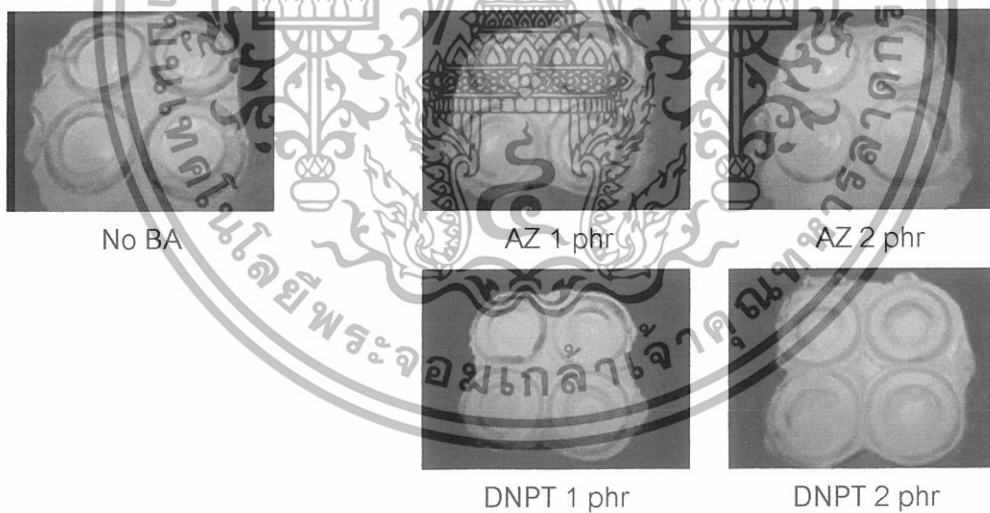
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้างครั้งที่ 3



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 3

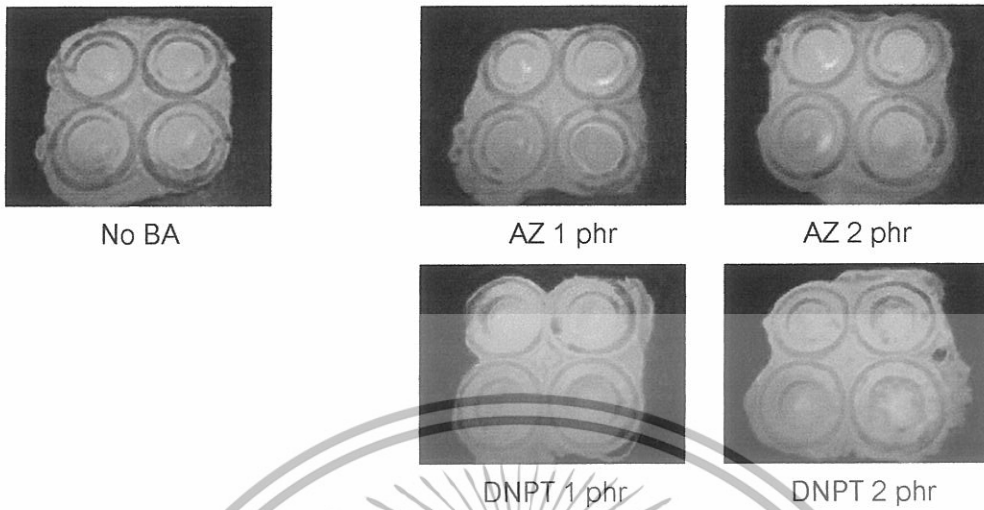
ล้างครั้งที่ 4



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบคราบสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 4

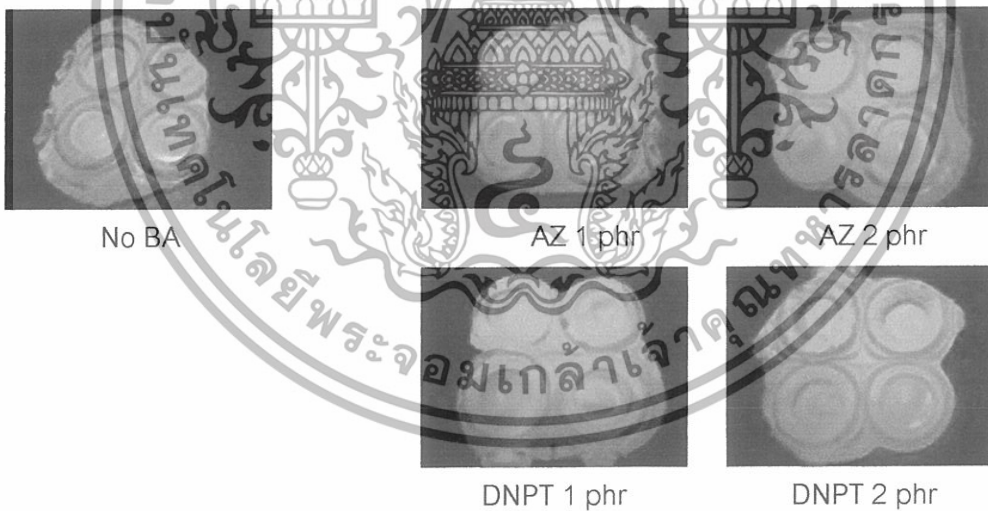
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ล้างครั้งที่ 5



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบความสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 5

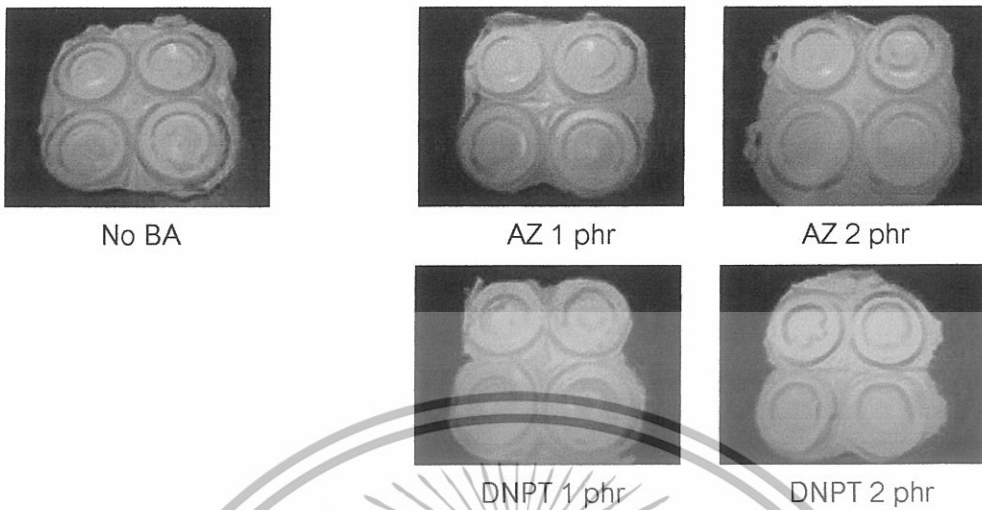
ล้างครั้งที่ 6



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบความสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ล้างครั้งที่ 7



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสกปรกบนยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการเติม สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณแตกต่างกันของ AZ และ DNPT ครั้งที่ 7

จากการทดสอบการทำความสะอาดกับแม่พิมพ์ด้วยกระบวนการขึ้นรูปจริง เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่ายางล้างแม่พิมพ์แต่ละสูตรจะมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันโดยยางล้างแม่พิมพ์ที่เติมสารให้ฟอง DNPT 1 phr และ 2 phr จะมีลักษณะเป็นฟองที่เห็นได้ชัดเจน แต่ยางล้างแม่พิมพ์ที่เติมสารให้ฟอง AZ 1 และ 2 phr จะมีลักษณะคล้ายกับยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ได้เติมสารให้ฟอง (No BA) ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการล้างแม่พิมพ์ที่แตกต่างกันโดยจะสังเกตได้ว่าการล้างครั้งที่ 1 ทุกสูตรจะมีคราบสกปรกติดออกมา ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งยังไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ว่าสูตรไหนมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดมากกว่ากัน การล้างครั้งที่ 2 คราบสกปรกยังคงติดออกมาแต่มีปริมาณลดลงจากครั้งแรก เมื่อเทียบกับในแต่สูตรจะยังคงพบว่ามีความสกปรกใกล้เคียงกัน

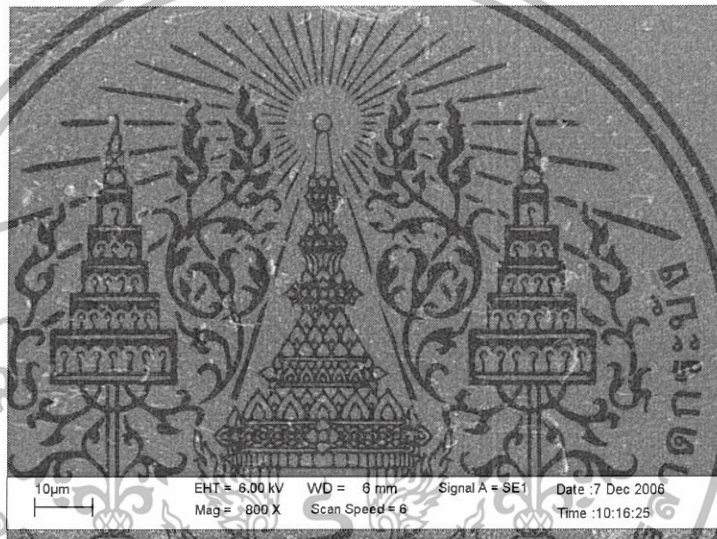
การล้างครั้งที่ 3 จะมีปริมาณคราบสกปรกที่ติดออกมา ลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด โดย DNPT 1 phr และ 2 phr จะมีปริมาณคราบสกปรกที่ติดออกมาน้อยกว่า No BA , AZ 1 และ 2 phr การล้างครั้งที่ 4 คราบสกปรกที่ติดออกมา โดยจะสังเกตเห็นว่า DNPT 2 phr แทบไม่มีคราบสกปรกติดออกมาเลย ส่วน DNPT 1 phr มีปริมาณคราบสกปรกติดออกมาน้อยมาก ในขณะที่ No BA , AZ 1 และ 2 phr ยังคงมีคราบสกปรกติดบริเวณขอบแสดงว่า DNPT 2 phr สามารถทำความสะอาดแม่พิมพ์ได้ภายใน 4 ครั้ง ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดที่ดี การล้างครั้งที่ 5 คราบสกปรกที่ติดออกมาใน DNPT 1 phr แทบไม่มีเลย ในขณะที่สูตรอื่นยังคงมีคราบสกปรกติดออกมาอยู่ นั้นแสดงว่า DNPT 1 phr สามารถล้างแม่พิมพ์ให้สะอาดได้ภายใน 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

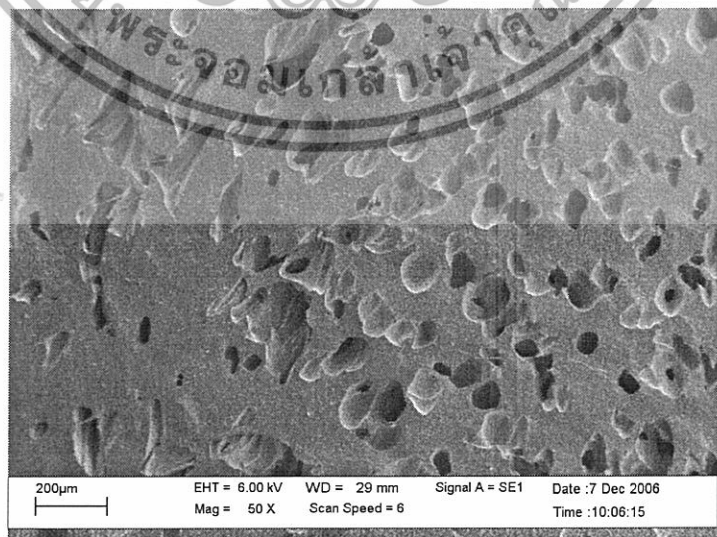
การล้างครั้งที่ 6 ครอบสกปรกที่ติดออกมาใน AZ 1 phr และ 2 phr แทบไม่มีเลย ในขณะที่ No BA ยังคงมีครอบสกปรกติดออกมาอยู่ การล้างครั้งที่ 7 No BA ยังคงมีครอบสกปรกติดบริเวณขอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการทำสะอาดน้อยที่สุด

#### 4.5 สัณฐานวิทยา

เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติม เช่น ซิลิกา และการกระจายตัวของฟองที่เกิดขึ้นจากการใส่สารให้ฟองที่มีชนิดและปริมาณที่แตกต่างกันของ AZ และ DNPT ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของฟอง จะมีผลต่อสมบัติเชิงกลโดยตรง และ จะทำให้สมบัติเชิงกลบางประการลดต่ำลง

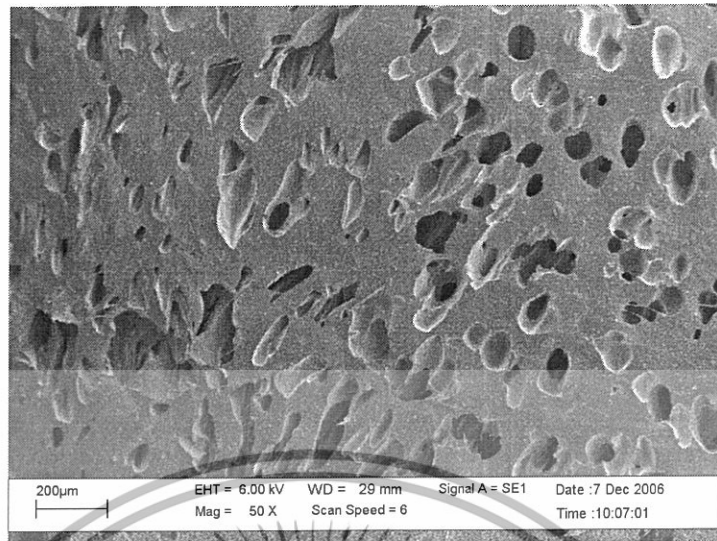


รูปที่ 4.15 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ไม่ใส่สารให้ฟอง

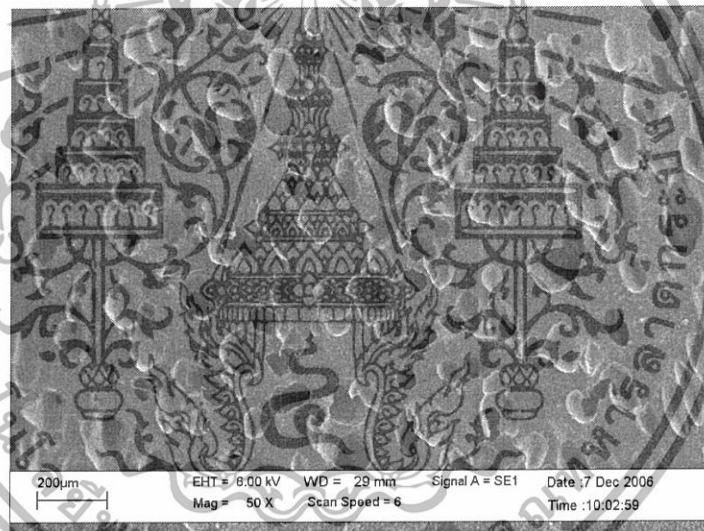


รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง AZ 1 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

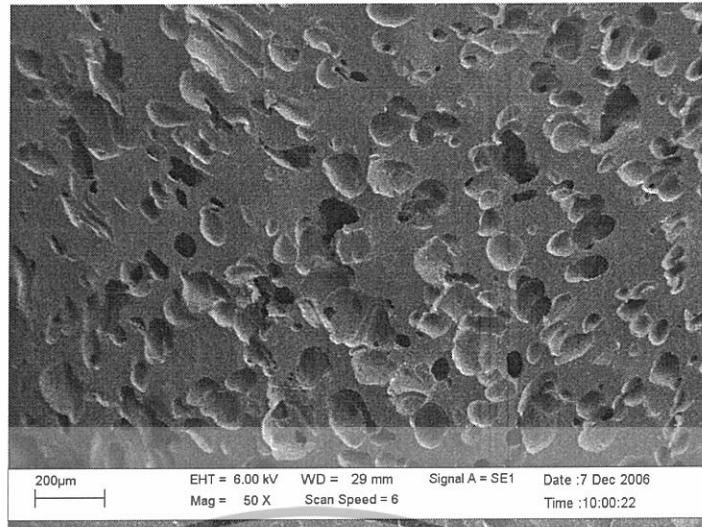


รูปที่ 4.17 สเต็มฐานวิทยายางล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง AZ 2 phr



รูปที่ 4.18 สเต็มฐานวิทยายางล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง DNPT 1 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของล้างแม่พิมพ์ ที่ใส่สารให้ฟอง DNPT 2 phr

จากรูปที่ 4.15 การกระจายตัวของ ซิลิกา ในยางค่อนข้างดี คือมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ แม้จะมีบางบริเวณที่มีการกระจายตัวที่ไม่ดีโดยจะเป็นจุดสีขาวขนาดใหญ่กว่าจุดอื่นๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของสารให้ฟองที่ใช้ AZ และ DNPT ทำให้ทราบว่า DNPT มีปริมาณฟองและการกระจายตัวของ กลุ่มฟองได้ดีกว่า AZ เมื่อดูจากรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเห็นว่าจะมีบางบริเวณของ AZ ที่ไม่เกิดฟอง ในขณะที่การกระจายตัวของฟองของ DNPT มีความสม่ำเสมอมากกว่า รูปที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งอาจเป็นผลจากตัวสารให้ฟองเอง โดย AZ มีช่วงการสลายตัวส่วนหนึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นรูป ในบริเวณที่ไม่เกิดฟองอาจได้รับความร้อนน้อยกว่าส่วนอื่นๆ จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง DNPT เป็น 2 phr ทำให้ฟองที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะหนาแน่นกว่า DNPT 1 phr ซึ่งสอดคล้องกับการหาความหนาแน่นของชิ้นงาน รูปที่ 4.5 และค่า Hardness รูปที่ 4.4 ซึ่งมีค่าลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนของยางล้าแม่พิมพ์

การคำนวณการลดต้นทุนจากปริมาตรยางที่ใช้ล้าแม่พิมพ์ในปัจจุบันเปรียบเทียบกับยางล้าแม่พิมพ์ชนิดโฟมที่เติมสารให้ฟอง DNPT 2 phr สามารถลดต้นทุนได้แสดงได้ดัง ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การคำนวณราคายางล้าแม่พิมพ์จำนวน 1 กิโลกรัมโดยใช้สารให้ฟอง DNPT 2 phr

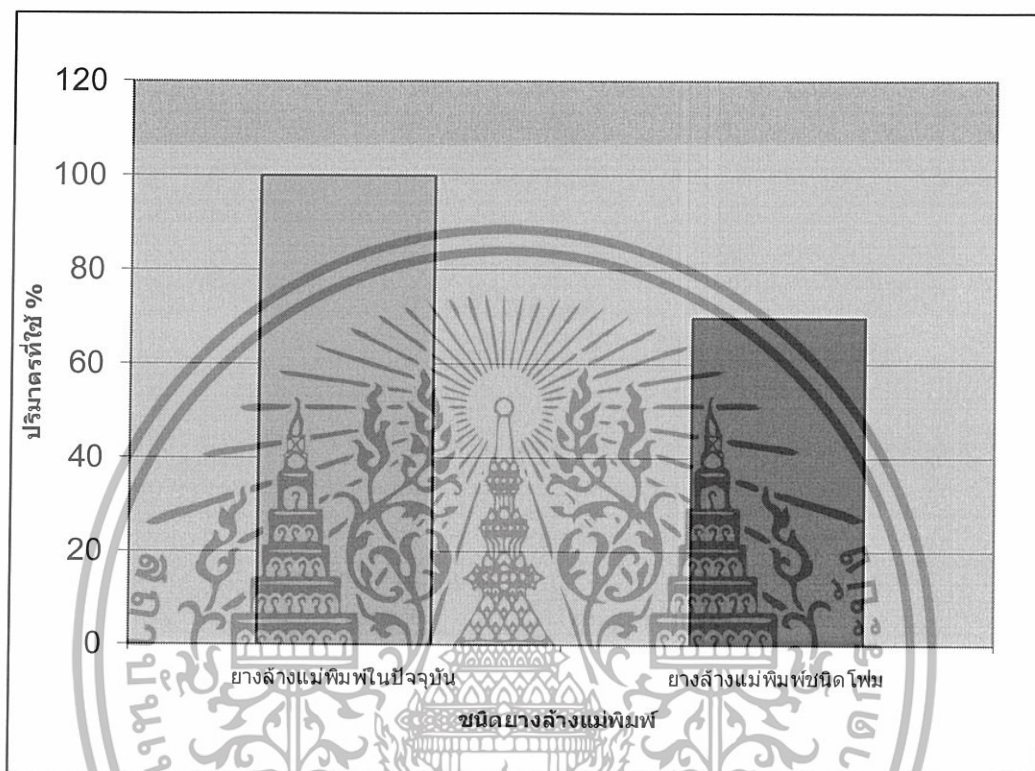
| สารเคมี             | phr   | ราคาวัตถุดิบ/กก. (บาท) | ราคาสูตรยาง<br>(บาท) |
|---------------------|-------|------------------------|----------------------|
| EPDM NORDEL® IP4520 | 100   | 100                    | 44.13                |
| ZnO (RA)            | 7     | 53.50                  | 1.65                 |
| Hisil® 255 G        | 60    | 30                     | 7.94                 |
| PEG                 | 3.6   | 115                    | 1.82                 |
| DCP 40%             | 5     | 150                    | 3.31                 |
| Oil P-150           | 10    | 40.30                  | 1.77                 |
| TMQ                 | 1     | 72                     | 0.31                 |
| SR-350              | 2     | 380                    | 3.35                 |
| TiO <sub>2</sub>    | 2     | 92                     | 0.81                 |
| Stearic acid        | 2     | 30                     | 0.26                 |
| MEA                 | 30    | 144                    | 19.06                |
| DNPT                | 2     | 100                    | 0.88                 |
| Kicker              | 2     | 50                     | 0.44                 |
| รวม                 | 226.6 |                        | 85.78                |

หมายเหตุ ราคาวัตถุดิบ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2550

ไม่คิดค่าแรงงาน และค่าไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้ยางล้างแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมจะคำนึงถึงปริมาตรยางที่ขึ้นรูปตามปกติ โดยจะใช้ยางล้างแม่พิมพ์ให้มีปริมาตรใกล้เคียงหรือมากกว่ายางที่ใช้ขึ้นรูปปกติเล็กน้อย ส่วนยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟม จะใช้ปริมาตรยางลดลงเนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะช่วยแทนที่เนื้อยาง ทำให้ลดปริมาณยางล้างแม่พิมพ์ที่ต้องใช้ตามปกติ



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบปริมาตรยางล้างแม่พิมพ์ในปัจจุบันกับยางล้างแม่พิมพ์ใส่สารฟอง DNPT 2 phr

ปริมาตรยางล้างแม่พิมพ์ที่ใช้ คือ  $5 \text{ cm} \times 34 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm} = 85 \text{ cm}^3$

ปริมาตรยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมที่ใช้ คือ  $5 \text{ cm} \times 34 \text{ cm} \times 0.35 \text{ cm} = 59.5 \text{ cm}^3$

นั่นแสดงว่า สามารถลดปริมาณยางที่ใช้ล้างแม่พิมพ์ได้ถึง  $(85-59.5)/(85 \times 100) = 30 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

- จากการศึกษาทำให้ทราบว่า สามารถทำการขึ้นรูปยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมได้จริง โดยสารให้ฟองที่มีความเหมาะสม คือ DNPT 2 phr
- จากการศึกษาทำให้ทราบว่า ชนิดของสารให้ฟองมีผลต่อระยะเวลาเชื่อมโยง โดยสารให้ฟอง AZ จะใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานกว่าสารให้ฟอง DNPT โดยเกิดจากลักษณะของฟองก๊าซที่เกิด คือ เมื่อทำการขึ้นรูปฟองก๊าซของ AZ จะไม่ถูกกักเก็บอยู่ในชิ้นงาน เป็นผลจากอุณหภูมิขึ้นรูปที่ไม่เหมาะสม ฟองก๊าซที่เกิดจะนำความร้อนออกไปนอกระบบ จึงทำให้สูญเสียความร้อนของระบบไปกับก๊าซที่สลายตัวออกไปทำให้ระยะเวลาเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น
- จากการศึกษาทำให้ทราบว่า ปริมาณของสารให้ฟอง AZ และ DNPT ที่มีการผสมคิกเกอร์ลงไปในอัตราส่วน 1:1 เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง จะทำให้ระยะเวลาเชื่อมโยงลดลง เป็นผลจากคิกเกอร์ที่ใช้ มีความเป็นด่าง ทำให้การใส่สารให้ฟองในปริมาณ 2 phr มีระยะเวลาเชื่อมโยงต่ำกว่า 1 phr
- สมบัติเชิงกลของยางล้างแม่พิมพ์ชนิดโฟมจะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดจะทำให้เกิดรอยตำหนิ (Defect) ในชิ้นงาน บริเวณดังกล่าวจะทำให้สมบัติเชิงกล เช่น Tensile strength, Tear strength และ Hardness ลดลง
- จากการศึกษาช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง ทำทราบว่าสารให้ฟอง DNPT มีความเหมาะสมในการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 175 °C มากกว่าสารให้ฟอง AZ เนื่องจากช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT อยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปทำให้เกิดการสลายตัวให้ฟองก๊าซอย่างสมบูรณ์ในขณะที่เกิดการเชื่อมโยง
- จากการศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาด เมื่อทำการเปรียบเทียบยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ใส่สารให้ฟอง กับยางล้างแม่พิมพ์ที่มีการใส่สารให้ฟอง DNPT 2 phr พบว่า จำนวนครั้งที่ใช้ในการทำความสะอาดแม่พิมพ์ของยางล้างแม่พิมพ์ที่ใส่สารให้ฟอง DNPT 2 phr จะใช้จำนวนครั้งในการทำความสะอาดเพียง 4 ครั้ง ต่างจากยางล้างแม่พิมพ์ที่ไม่ได้ใส่สารให้ฟองซึ่งต้องใช้จำนวนครั้งถึง 7 ครั้ง เพราะก๊าซที่เกิดขึ้นช่วยนำพาสารทำความสะอาดออกจากยางทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเทียบต่อจำนวนครั้งดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปสมบัติของยางสูตรที่เหมาะสมของยางล้างแม่พิมพ์ที่ผสมสารให้ฟอง 2 phr ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปสมบัติบางประการของสูตรยางล้างแม่พิมพ์ที่เหมาะสม

| สมบัติ                           | ค่า       | หน่วย |
|----------------------------------|-----------|-------|
| Tensile strength                 | 1.74      | MPa   |
| Tear strength                    | 8.61      | kN/m  |
| % Elongation at break            | 1,784     | %     |
| Rubber Modulus                   |           |       |
| - M 100                          | 0.57      | MPa   |
| - M 200                          | 0.59      | MPa   |
| - M 300                          | 0.61      | MPa   |
| Hardness (Shore A)               | 33.6      | -     |
| Cure time (ที่ 175 °C)           | 168       | s     |
| Mooney viscosity (ML 1+4) 100 °C | 61.4      | -     |
| ช่วงอุณหภูมิใช้งาน               | 150 – 200 | °C    |
| อุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสม         | 175       | °C    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองมีข้อเสนอแนะซึ่งจะสามารถปรับปรุงสูตรยางล้างแม่แบบให้มีคุณสมบัติขึ้น ดังนี้

- การศึกษาโดยใช้เครื่องผสมที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เช่น เครื่องผสมแบบ Internal mixers และปรับปรุงสภาวะการผสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาด
- ทดลองผสมสารให้ฟอง เพื่อลดอุณหภูมิการสลายตัว หรือลองใช้สารให้ฟองชนิดอื่นที่มีอุณหภูมิการสลายตัวน้อยกว่า เพื่อให้สัมพันธ์กับเวลาการเชื่อมโยงของยางล้างแม่พิมพ์
- การศึกษาการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม เพื่อลดต้นทุน เนื่องจากต้นทุนราคาขงมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกวัน
- การศึกษาอายุการเก็บรักษาของยางล้างแม่แบบซึ่งใช้ MEA เป็นสารทำความสะอาด และผลของอายุการเก็บรักษาต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด
- ทำการทดสอบกับแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นแตกต่างกัน เพื่อศึกษาถึงปริมาณยางล้างแม่พิมพ์ที่เหมาะสมกับแม่พิมพ์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน
- ถ้าแม่พิมพ์มีความซับซ้อนมาก ควรเพิ่มปริมาณยางล้างแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้ความแข็งแรงของยางล้างแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น เพื่อป้องกันการฉีกขาดในขณะดึงยางล้างแม่พิมพ์ออกจากแม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางผสมสารให้ฟอง

ภาคผนวก ก กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางผสมสารให้ฟอง AZ:kicker

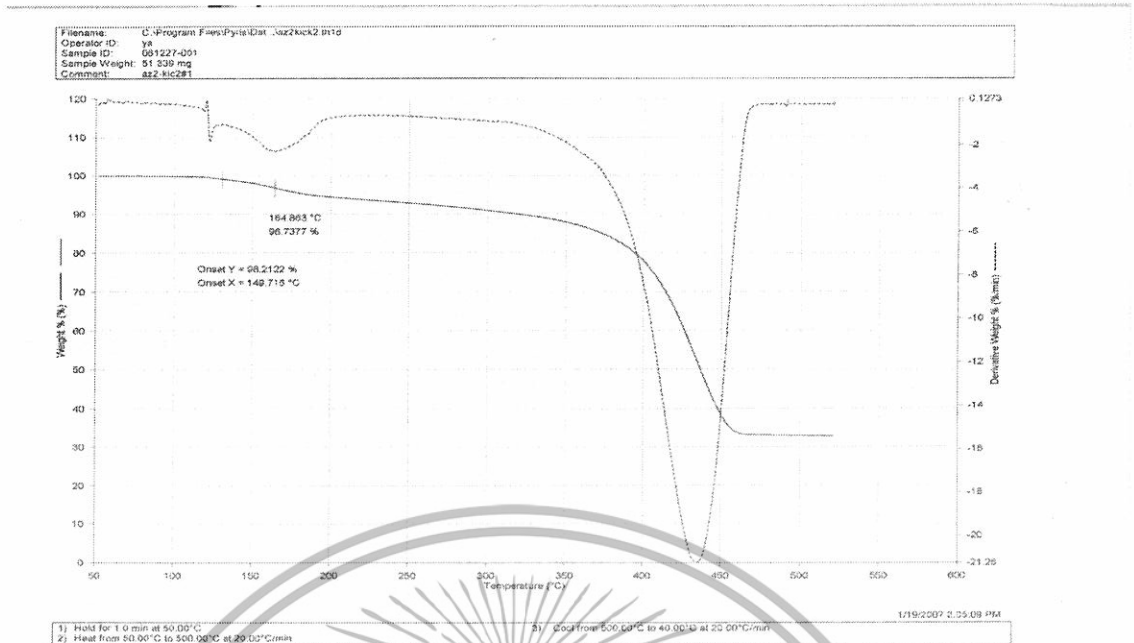
ในอัตราส่วน 1:1

ภาคผนวก ข กราฟแสดงสมบัติทางความร้อน TGA ของยางผสมสารให้ฟอง DNPT:kicker

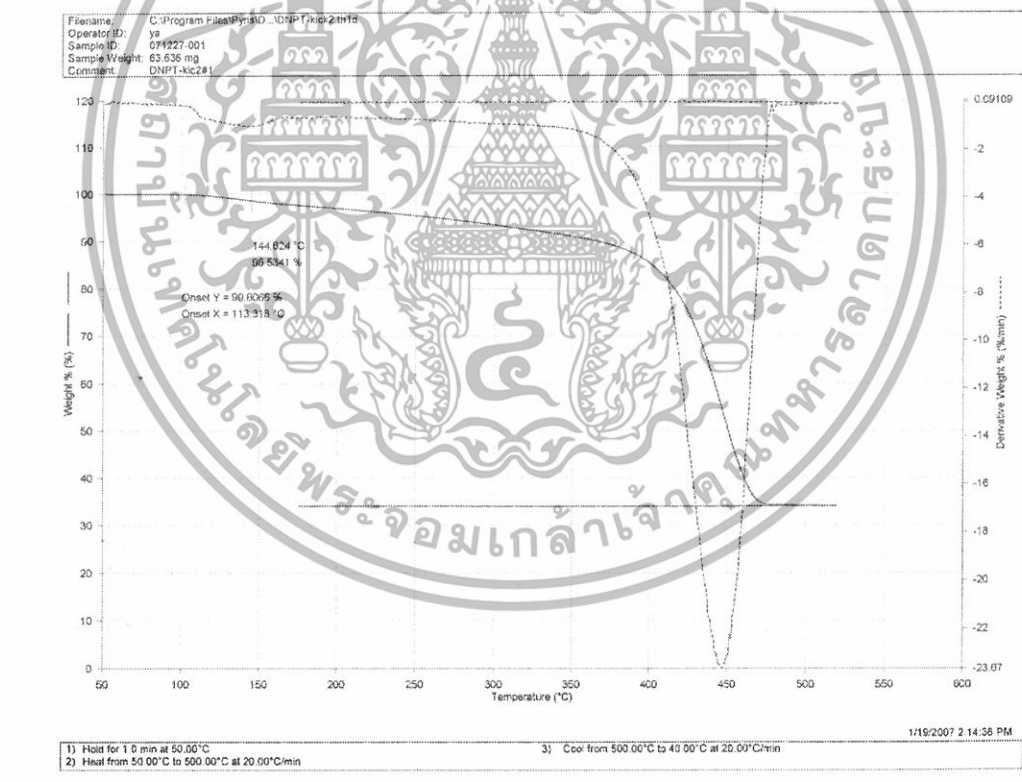
ในอัตราส่วน 1:1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก กราฟ TGA การสลายตัวของยางผสมสารให้ฟอง AZ:kicker ในอัตราส่วน 1:1



ภาคผนวก ข กราฟ TGA การสลายตัวของยางผสมสารให้ฟอง DNPT:kicker ในอัตราส่วน 1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. บริษัท เอส.เค. พอลิเมอร์ จำกัด
2. อธิพิศ แจ้งชัด. 2542. เทคโนโลยีการยาง. เอกสารประกอบการสอนวิชา  
เทคโนโลยีการยาง: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2547. ยาง : ชนิด สมบัติและการใช้งาน. กรุงเทพฯ. ศูนย์  
เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC).
4. พรพรรณ นิธิอุทัย 2528 . สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี : คณะวิทยาศาสตร์ และ  
เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
5. Blow C.M. Rubber Technology and Manufacture. London : Butterworth & Co.  
Publication Ltd. 1971
6. ขนิษฐา ศรีประทุม และมนต์สุดา บุราภิษฐ์.2546. โครงการพิเศษเรื่องการศึกษา  
ยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
7. ณัฐนิชา เสงประภากร และมลลิวี ศรีประวดีชัย.2547. โครงการพิเศษเรื่องการ  
ปรับปรุงสมบัติของยางล้างแม่แบบสำหรับงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ:  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง.
8. นพรัตน์ ศรีแก้วกาญจน์, ปรม ศรีวิสุทธิ และอยุทธิ์ วิทย์สุธรรมกุล.2548. โครงการ  
พิเศษเรื่องการพัฒนาสูตรยางเพื่อลดต้นทุนยางล้างแม่แบบชนิดอัดขึ้นรูป.  
กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ  
ทหารลาดกระบัง
9. Chemical Data Bank 2005. 2- Amino ethanol. [Online]. Available :  
[www.msds.pcd.go.th/](http://www.msds.pcd.go.th/)
10. MORAKA PTE. LTD. 2004. Titanium dioxide Rutile. [Online]. Available :  
[www.moraka.com/pdfs/MC-A. pdf](http://www.moraka.com/pdfs/MC-A.pdf)
11. Nitto Denko Product. 2004. Semiconductor Encapsulating Mold Cleaning  
Sheets. [Online]. Available :  
[www.nitto.com/product/datasheet/semicon/001/index.htm](http://www.nitto.com/product/datasheet/semicon/001/index.htm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Botros S.H. 1998. **Thermal Stability of Butyl/EPDM Rubber Blend Vulcanizates**. Polymer Degradation and Stability. Vol. 62: 471-477.
13. Poh B.T. and NG C.C. 1998. **Effect of Silane Coupling Agents on the Mooney Scorch Times of Silica filled Natural Rubber Compound**. European Polymer journal. Vol. 34:975-979.
14. UNITED STATES PATENT. 2004. **United States Patent 5563119**. [Online]. Available: [www.freepatentsonline.com/5563119.html](http://www.freepatentsonline.com/5563119.html)
15. ASTM D 412 Committee on standard "Standard Test Method for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomers-Tension.", Philadelphia : 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.", Philadelphia : American Society for Testing and Materials.,1991.
17. ASTM D 2240 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness.", Philadelphia : 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 (Mooney Viscometer).", Philadelphia : American Society for Testing and Materials.,1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้