

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความหนาและอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพิตีเอ็ม  
ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม



นางสาวชุตติกาญจน์ วายุระกุล  
นางสาวณัชชา รถกมล

ร/พ.  
56157  
2550

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 107881  
วัน,เดือน,ปี - 8 ส.อ. 2553

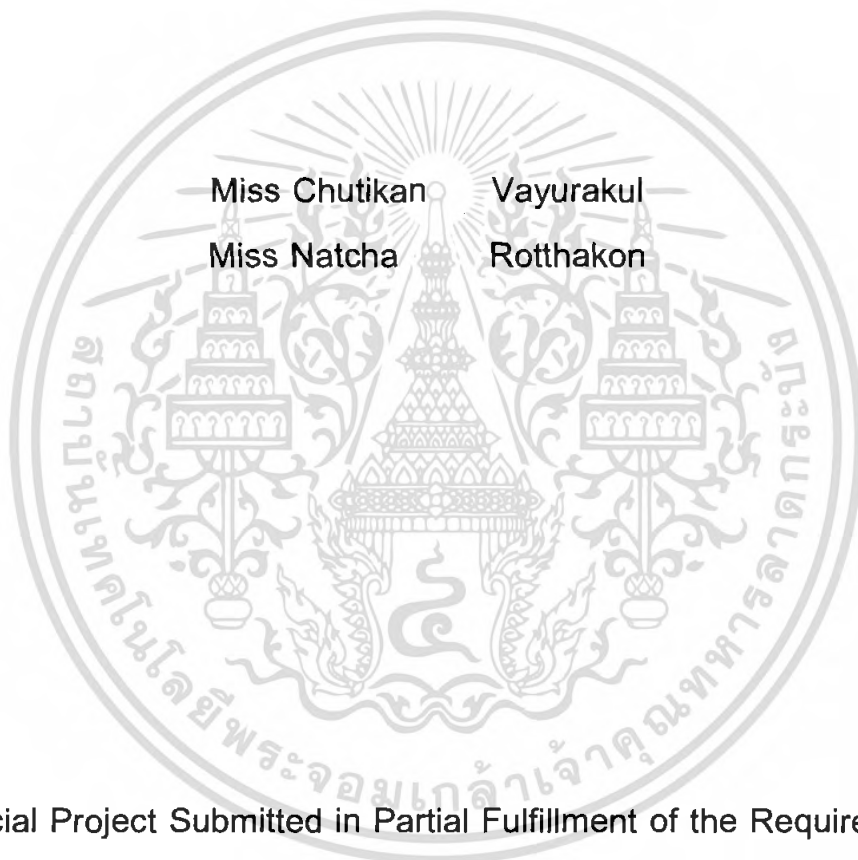
b. 1221353b  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effects of Thickness and NR : EPDM Ratio on  
Properties of Porous Rubber Pipe



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษ** การศึกษาความหนาและอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพีดีเอ็มที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซีม

**นักศึกษา** นางสาวชุตिकाญจน์ วายุระกุล  
นางสาวณัชชา รอดกล

**ภาควิชา** เคมี

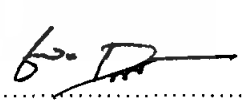
**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** นางสาวสุนนา แจ่มเหมือน (สถาบันวิจัยยาง)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

| คณะกรรมการตรวจสอบ                     | ลายมือชื่อ   |
|---------------------------------------|--|
| ประธานกรรมการ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ |   |
| กรรมการ ผศ.ดร. วันฉัตร ชื่นชม         |  |
| กรรมการ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด         |  |

  
.....  
( ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ )  
หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                      |   |                 |               |
|----------------------|---|-----------------|---------------|
| โครงการพิเศษเรื่อง   | การศึกษาความหนาและอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพิตีเอ็มที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม |                 |               |
| นักศึกษา             | นางสาวชุตिकाญจน์  | วายุระกุล       | รหัส 47050633 |
|                      | นางสาวณัชชา   | รถกล            | รหัส 47050634 |
| ภาควิชา              | เคมี  | คณะ วิทยาศาสตร์ |               |
| สาขาวิชา             | เคมีอุตสาหกรรม  |                 |               |
| ปีการศึกษา           | 2550  |                 |               |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด   |                 |               |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | นางสาวสุมนา แจ่มเหมือน (สถาบันวิจัยยาง)   |                 |               |

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาผลของความหนาของท่อน้ำซึม (สูตรหนา-3.3 mm และสูตรบาง-2.9 mm โดยใช้สัญลักษณ์ A และ B ตามลำดับ) และผลของอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพิตีเอ็ม (80:20 และ 70:30 คือสูตร 1 และ 2 ตามลำดับ) ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มและผงยางรถยนต์(GRT)ที่ใช้แล้ว โดยควบคุมอัตราส่วนของยางต่อ GRT เป็น 40:60 โดยใช้ Supercell<sup>®</sup> DPT เป็นสารให้ฟอง และสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง แล้วทำการขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดียว จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบความร้อนที่อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 20 นาที จากผลการวิจัยพบว่า ท่อที่มีความหนาน้อยกว่าจะมีอัตราการซึมผ่านน้ำมากกว่า และมีค่ามอดุลัสมากกว่าท่อที่มีความหนามาก โดยสูตรที่ใช้ยางธรรมชาติมาก (สูตร 1) จะมีค่าทดสอบแรงดึงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสสูงกว่า และมีอัตราการซึมผ่านน้ำน้อยกว่าสูตร 2 เนื่องจากสูตรที่ 1 มียางธรรมชาติที่มีความแข็งแรงในปริมาณที่มากกว่าสูตรที่ 2 ดังนั้นแรงดันน้ำจึงสามารถดันให้รูพรุนของท่อขยายออกได้น้อย จึงทำให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำน้อย จากงานวิจัยนี้พบว่า ท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนของยางธรรมชาติ:ยางอีพิตีเอ็มเป็น 80:20 และมีความหนา 2.9 mm มีความเหมาะสมที่จะใช้งานเป็นท่อน้ำซึมมากกว่า โดยมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี มีอัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 1-5 l/h/m และมีต้นทุนการผลิตประมาณ 132 บาทต่อกิโลกรัม หรือ 14 บาทต่อเมตร

จากการทำการทดสอบเบื้องต้น โดยนำท่อน้ำซึมมาใช้กับแปลงเกษตร (ปลูกต้นทานตะวัน ผักบุ้ง สามกษัตริย์ เก๊กแก้ว) เทียบกับการให้น้ำระบบน้ำหยด และการรดน้ำปกติ เมื่อทำการเปรียบเทียบความสูงของต้นไม้จากการให้น้ำทั้ง 3 แบบพบว่า แปลงเกษตรที่ใช้ท่อน้ำซึมนั้นต้นไม้อัตราการเจริญเติบโตที่ใกล้เคียงกัน และท่อน้ำซึมยังสามารถใช้งานได้สะดวก สามารถให้น้ำต้นพืชได้อย่างทั่วถึง และช่วยประหยัดแรงงานกว่าการให้น้ำจากระบบน้ำหยดและการรดน้ำปกติ

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| <b>Special Project Title</b>      | Effects of Thickness and NR : EPDM Ratio on Properties of Porous Rubber Pipe |
| <b>Name</b>                       | Miss Chutikan Vayurakul<br>Miss Natcha Rotthakon                             |
| <b>Department</b>                 | Chemistry  |
| <b>Program</b>                    | Industrial Chemistry   |
| <b>Academic Year</b>              | 2007   |
| <b>Special Project Advisor</b>    | Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud  |
| <b>Special Project Co-advisor</b> | Miss Sumana Jammuan<br>(Rubber Research Institute of Thailand)               |

### ABSTRACT

This work was focused on studying effects of thickness of porous rubber pipe with thickness of 3.3 mm and 2.9 mm (designated as Formula A and B respectively) and also effects of NR:EPDM based rubber ratio (80:20 and 70:30 designated as Formula 1 and 2 respectively). The ratio of the based rubbers to the ground rubber tire (GRT) was fixed at 40:60 (w/w). In the rubber pipe formula, Supercell<sup>®</sup> DPT was used as a blowing agent and urea compound was used as a kicker in order to create cellular structure in the rubber pipe. The formular was compounded by using a two-roll mill and shaped into hollow pipe by a single screw extruder. The pipe was cured by using a hot-air oven at 165°C for 20 min. It was found that the thin wall pipe had higher water irrigation rate and more rigid (higher modulus) than the thick wall pipe. The pipe made from higher NR ratio (Formula 1) had higher tensile strength, % elongation at break and modulus compared to Formula 2. This might derive from the higher strength and elongation characteristics of NR. The higher water irrigation rate of the Formula 2 could be explained by softer pipe yielding larger holes in the pipe resulting in more water allowed to pass. From the results in this work, it can be concluded that Formula A (80:20 NR:EPDM) and thin wall pipe (2.9 mm) might be better choices to produce the porous water pipe commercially.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Field test of the porous rubber pipe was also carried out in this work. Comparative study of growing plants (i.e. Sunflower, Morning glory, Samkasad, and Ketkeaw) watered by three watering systems, i.e., PVC dripping pipe, manual watering, and porous rubber pipe from this work. It was found that growth rate of the plants was comparable for all 3 systems. However, the porous rubber pipe has some advantages including no labor cost and good water distribution.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และผศ.ดร. วันฉัตร ชื่นชม ที่กรุณาเป็นกรรมการตลอดจนให้คำแนะนำโครงการพิเศษนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร โดย ดร.นุชนาฏ ณ ระนอง ที่ให้การสนับสนุนในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณสุมนา แจ่มเหมือน อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ช่วยประสานงานและคอยให้คำแนะนำ ตลอดจนช่วยอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ Polymer workshop สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้สอนวิธีใช้เครื่องมือ และคอยอำนวยความสะดวกทุกอย่าง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นแรงใจแรงกายที่สำคัญ และให้การสนับสนุนด้านการศึกษาจนประสบความสำเร็จ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาว ชุติกาญจน์ วายุระกุล

นางสาว ณิชชา รทดล

## สารบัญ

|                         | หน้า |
|-------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....    | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....    | ง    |
| สารบัญ.....             | จ    |
| สารบัญตาราง.....        | ช    |
| สารบัญรูปภาพ.....       | ณ    |

### บทที่ 1 บทนำ

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....     | 1 |
| 1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....     | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....         | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |

### บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

|  |    |
|--|----|
| 2.1 ยางธรรมชาติ.....                     | 4  |
| 2.2 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....            | 6  |
| 2.2.1 สารเชื่อมโยง.....                  | 6  |
| 2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน.....     | 6  |
| 2.2.1.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยง.....      | 7  |
| 2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง.....     | 9  |
| 2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง.....  | 10 |
| 2.2.3.1 ซิงค์ออกไซด์.....                | 10 |
| 2.2.3.2 กรดไขมัน.....                    | 10 |
| 2.2.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ.....       | 10 |
| 2.2.4.1 สารป้องกันออกซิเดชัน.....        | 11 |
| 2.2.4.2 สารป้องกันโอโซน.....             | 11 |
| 2.2.5 สารตัวเติม.....                    | 11 |
| 2.2.5.1 เขม่าดำ.....                     | 12 |
| 2.2.5.2 ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง..... | 12 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|         |                               |    |
|---------|-------------------------------|----|
| 2.2.6   | สารช่วยกระบวนการผลิต.....     | 13 |
| 2.2.6.1 | เปฟไทเซอร์.....               | 13 |
| 2.2.6.2 | พลาสติกไซเซอร์.....           | 13 |
| 2.2.7   | สารให้ฟอง.....                | 13 |
| 2.2.7.1 | สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์.....   | 14 |
| 2.2.7.2 | สารให้ฟองชนิดอินทรีย์.....    | 14 |
| 2.2.8   | สารกระตุ้นปฏิกิริยา.....      | 17 |
| 2.3     | ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูปพรุน..... | 18 |
| 2.4     | ผงยางรถยนต์.....              | 20 |
| 2.4.1   | การบดที่อุณหภูมิต่ำ.....      | 20 |
| 2.4.2   | การบดที่อุณหภูมิห้อง.....     | 21 |
| 2.5     | ยางเอทิลีนพรอดพิลีน.....      | 23 |
| 2.6     | เครื่องอัดรีดสำหรับยาง.....   | 24 |
| 2.7     | งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....    | 25 |

### บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 3.1      | แผนการดำเนินงาน.....                     | 35 |
| 3.2      | สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....             | 35 |
| 3.3      | เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....          | 37 |
| 3.4      | วิธีการทดลอง.....                        | 37 |
| ตอนที่ 1 | การบดผสมยาง.....                         | 37 |
| ตอนที่ 2 | การขึ้นรูปเป็นท่อ.....                   | 38 |
| ตอนที่ 3 | การเชื่อมโยงท่อยาง.....                  | 40 |
| ตอนที่ 4 | ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ.....               | 40 |
| 1.       | การทดสอบแรงดึง.....                      | 40 |
| 2.       | การทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์..... | 40 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 3. การทดสอบความหนาแน่น.....           | 41 |
| 4. การทดสอบความต้านทานต่อไอโซน.....   | 42 |
| 5. การศึกษาสัณฐานวิทยา.....           | 43 |
| 6. การทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ..... | 43 |

### บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

|  |    |
|--|----|
| 4.1 การศึกษาความหนาที่มีผลต่อท่อน้ำซึม.....  | 46 |
| 4.2 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม และผงยางรถยนต์.....                        | 47 |
| 4.3 การศึกษาความต้านทานต่อไอโซน.....   | 57 |
| 4.4 การศึกษาผลจากการนำท่อน้ำซึมไปใช้งานจริง.....   | 58 |
| 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....   | 60 |
| 4.6 สรุปสมบัติของท่อน้ำซึม และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางอีพิตีเอ็ม<br>ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 62 |

### บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 63 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....     | 63 |

เอกสารอ้างอิง..... 65

ภาคผนวก ก นิยามศัพท์ที่ใช้ในโครงการพิเศษ..... 69

ภาคผนวก ข การหาความยาวท่อน้ำซึมที่ผลิตจากยางผสมสูตรหนัก 1 กิโลกรัม..... 71

ภาคผนวก ค ตารางและรูปภาพแสดงผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบ  
น้ำหยด , ท่อน้ำซึม และรดน้ำปกติ..... 73

ภาคผนวก ง ตารางแสดงผลความหนาของท่อน้ำซึม..... 81

ภาคผนวก จ ตารางแสดงผลค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึม..... 83

ภาคผนวก ฉ ตารางแสดงผลอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม..... 85

ภาคผนวก ช แสดงผลค่าความหนืดมูนนี่(Mooney)ของท่อน้ำซึม..... 87

ภาคผนวก ซ แสดงผลค่า Cure Time ของท่อน้ำซึม..... 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่   | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ตัวอย่างชนิดของสารให้ฟองที่เหมาะสมกับการใช้งานต่าง ๆ.....  | 15   |
| 2.2 ผลของกรดต่อการสลายตัวของ DPT.....  | 16   |
| 3.1 สมบัติบางประการของยูเรียที่ใช้ในงานวิจัย.....  | 37   |
| 3.2 การรายงานผลของลักษณะรอยแตก.....  | 43   |
| 3.3 สูตรที่ใช้ในการศึกษา.....  | 45   |
| 4.1 แสดงค่าแรงดันสูงสุดที่ท่อน้ำซีมสามารถรับได้.....   | 57   |
| 4.2 แสดงผลของความต้านทานต่อไอโซนของท่อน้ำซีมสูตร 1 (อัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM: GRT เป็น 80:20:150) กำมะถัน 2.5 phr และเขม่าดำ 50 phr..... | 57   |
| 4.3 แสดงผลของความต้านทานต่อไอโซนของท่อน้ำซีมสูตร 2 (อัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT เป็น 70:30:150) กำมะถัน 2.5 phr แลเขม่าดำ 50 phr.....   | 57   |
| 4.4 แสดงปริมาณน้ำที่แต่ละแปลงได้รับ.....   | 58   |
| 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีมสูตร 1 ที่ประกอบด้วย NR/EPDM:GRT:S:CB (40:60:2.5:50) ที่เวลาเชื่อมโยง 20 นาที.....                 | 61   |
| 4.6 แสดงสมบัติบางประการของท่อน้ำซีมที่ผลิตได้.....   | 62   |
| ค.1 แสดงผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด, ท่อน้ำซีม และรดน้ำปกติ ประจำเดือนมกราคม พ.ศ. 2551.....                 | 74   |
| ค.2 แสดงผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด , ท่อน้ำซีม และรดน้ำปกติ ประจำเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....            | 75   |
| ง.1 แสดงผลความหนาของท่อน้ำซีม.....   | 82   |
| จ.1 แสดงผลค่าความแข็งกดของท่อน้ำซีม.....   | 84   |
| ฉ.1 แสดงผลอัตราการซีมผ่านน้ำของท่อน้ำซีม.....  | 86   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 1.1    | ยางล้อรถยนต์ที่ใช้แล้ว.....  | 2    |
| 1.2    | ตัวอย่างท่อน้ำซึม.....   | 3    |
| 2.1    | โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซีเอส - 1,4 – พอลิไอโซพรีน.....                                 | 4    |
| 2.2    | กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve).....   | 8    |
| 2.3    | โครงสร้างของไดโนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DPT) .....  | 16   |
| 2.4    | ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของ Unipaste® (ยูเรีย) ต่อสารให้ฟอง AZ, DNPT และ OBSH.....                | 18   |
| 2.5    | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ.....                                      | 19   |
| 2.6    | ตัวอย่างการบดยางที่อุณหภูมิต่ำ.....  | 21   |
| 2.7    | ตัวอย่างการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง.....   | 22   |
| 2.8    | ตัวอย่างการบดที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก.....  | 22   |
| 2.9    | แสดงโครงสร้างทางเคมีของ EPDM.....  | 23   |
| 2.10   | เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางร้อน (Hot feed extruder) .....  | 24   |
| 2.11   | เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางเย็น (Cold feed extruder) .....   | 25   |
| 3.1    | เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว.....  | 38   |
| 3.2    | ลักษณะของดาย (Die) .....   | 39   |
| 3.3    | ขั้นตอนทดสอบรูปดัมเบลล์ดายซี (Die C) ตามมาตรฐาน ASTM D 412.....                                | 40   |
| 3.4    | เครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์ชนิด ซอร์ เอ.....                                       | 41   |
| 3.5    | เครื่องทดสอบความหนาแน่น.....   | 41   |
| 3.6    | เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance) .....                                       | 42   |
| 3.7    | การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการซึมผ่านของท่อน้ำซึม.....                                   | 44   |
| 4.1    | แสดงอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึมสูตร 1 และสูตร 2 ที่มีความหนาแตกต่างกัน.....              | 47   |
| 4.2    | กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน..... | 48   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

หน้า

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.3  | กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....   | 48 |
| 4.4  | กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์(M100) ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....  | 49 |
| 4.5  | กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 200 เปอร์เซ็นต์(M200) ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....  | 49 |
| 4.6  | กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....  | 50 |
| 4.7  | SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำกำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 1A ประกอบด้วย NR:EPDM:GRT (80:20:150) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 20 นาที..... | 51 |
| 4.8  | SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำกำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 1B ประกอบด้วย NR:EPDM:GRT (80:20:150) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 20 นาที..... | 51 |
| 4.9  | SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำกำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 2A ประกอบด้วย NR:EPDM:GRT (70:30:150) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 20 นาที..... | 52 |
| 4.10 | SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำกำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 2B ประกอบด้วย NR:EPDM:GRT (70:30:150) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 20 นาที..... | 52 |
| 4.11 | กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....  | 53 |
| 4.12 | กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5 บาร์ ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....  | 54 |
| 4.13 | กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.75 บาร์ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....  | 54 |
| 4.14 | กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 1.0 บาร์ ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....  | 55 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.15 | กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 1.25 บาร์ ที่ประกอบด้วย<br>อัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....           | 55 |
| 4.16 | กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 1.5 บาร์ ที่ประกอบด้วย<br>อัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM:GRT ที่ต่างกัน.....            | 56 |
| 4.17 | ผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ท่อน้ำซึม และรดน้ำ<br>ปกติ ของเดือนมกราคม พ.ศ. 2551.....                  | 59 |
| 4.18 | ผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ท่อน้ำซึม และรดน้ำ<br>ปกติ ของเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....              | 59 |
| ค.1  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นทานตะวันที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำซึม ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....              | 76 |
| ค.2  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งและสามกษัตริย์ที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบ<br>น้ำซึม ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551..... | 76 |
| ค.3  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นเก๊กแก้วที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำซึม ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....              | 77 |
| ค.4  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นทานตะวันที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....              | 77 |
| ค.5  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งและสามกษัตริย์ที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบ<br>น้ำหยด ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551..... | 78 |
| ค.6  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นเก๊กแก้วที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....              | 78 |
| ค.7  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นทานตะวันที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....                        | 79 |
| ค.8  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....                         | 79 |
| ค.9  | แสดงการเจริญเติบโตของต้นเก๊กแก้วที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....                        | 80 |
| ค.10 | แสดงการเจริญเติบโตของต้นสมกษัตริย์ที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่<br>เดือนมกราคม- เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551.....                     | 80 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| ข.1 แสดงผลค่าความหนืดมูนนี่(Mooney) (ML 1+4(100 °C)) ของท่อน้ำซีเมนต์ 1..... | 88 |
| ข.2 แสดงผลค่าความหนืดมูนนี่(Mooney) (ML 1+4(100 °C)) ของท่อน้ำซีเมนต์ 2..... | 88 |
| ข.1 แสดงผลค่า Cure Time ของท่อน้ำซีเมนต์ 1.....                              | 90 |
| ข.2 แสดงผลค่า Cure Time ของท่อน้ำซีเมนต์ 2.....                              | 90 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตยางพารามากเป็นอันดับหนึ่งของโลก มีปริมาณผลผลิตยางเฉลี่ยถึงปีละมากกว่า 3 ล้านตัน โดยผลผลิตที่ได้จะใช้ในสัดส่วนประมาณ 10% และส่งออก 90% (ผลิตเป็นยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง น้ำยาง และยางเครฟ) โดยมีตลาดสำคัญ 5 อันดับแรกได้แก่ จีน ญี่ปุ่น มาเลเซีย สหรัฐอเมริกา และเกาหลีใต้ ถ้าหากว่าเกษตรกรรายเฉพาะยางธรรมชาติดิบ เช่น ยางแผ่น ยางแท่ง และยางน้ำข้น โดยไม่มีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าเพิ่ม ก็อาจส่งผลให้ราคาน้ำยางธรรมชาติตกต่ำลงได้ [1] จึงมีการเตรียมรับมือกับปริมาณผลผลิตยางที่เพิ่มขึ้น คือ การเร่งผลักดันโครงการเมืองยางพารา โดยเน้นส่งเสริมอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่ใช้ยางพาราเป็นวัตถุดิบหลัก ทั้งนี้เพื่อเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับอุตสาหกรรมยางพารา โดยส่งเสริมการส่งออกผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูป แทนที่การส่งออกในลักษณะวัตถุดิบเช่นในปัจจุบัน [2]

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกยางเป็นอันดับหนึ่งของโลก และเป็นแหล่งผลิตยางล้อรถยนต์ที่สำคัญของโลกโดยมีปริมาณการใช้ภายในประเทศถึงปีละประมาณ 134,194 ตัน หรือ 17 ล้านเส้น ในขณะที่เดียวกันมีปริมาณการทำลายเพียงร้อยละ 9 [3] จึงทำให้ปริมาณยางที่ใช้แล้วในประเทศไทยมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่มีการนำไปแปรรูปเพื่อลดปริมาณยางที่ใช้แล้วก่อให้เกิดเป็นขยะ ส่งผลต่อมลภาวะแวดล้อม เป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุง ซึ่งไม่ก่อให้เกิดรายได้แต่อย่างใด

งานวิจัยนี้จึงได้นำยางที่ใช้แล้วมาแปรรูปเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ยางธรรมชาติที่เหลือใช้ เป็นการลดปริมาณขยะอีกทั้งยังเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อม โดยการนำมาพัฒนาเป็นท่อขายน้ำซึม (Porous pipe) ที่เตรียมจากยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ผสมยางอีพีดีเอ็ม (Ethylene Propylene Rubber, EPDM) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางเกษตรกรรมสำหรับส่งน้ำหรือให้ปุ๋ยแก่พืช ทดแทนระบบให้น้ำเฉพาะบริเวณและระบบน้ำดัน (Sprinkler) ซึ่งต้องใช้ความดันสูงและใช้ปริมาณน้ำมากเป็นผลให้เกิดการกัดเซาะของดิน โดยปกติจะใช้ฝังลงใต้ผิวดินที่ระดับความลึกประมาณ 3-12 นิ้ว อาจทำให้ให้น้ำใต้ผิวดินเพื่อป้องกันดินทรุดตัว ท่อขายน้ำซึมมีหลักการทำงานเหมือนกับเยื่อเมมเบรน การปรับอัตราการซึมผ่านของน้ำทำได้จากการปรับส่วนผสมของวัตถุดิบและการควบคุมความเป็นรูพรุนของท่อ ท่อน้ำซึมเป็นท่อสายยางที่ประกอบด้วยผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว และยางผสมในอัตราส่วนที่เท่ากันโดยใช้สารให้ฟอง (Blowing agent) เช่น ไดไนโตรโซเพนตะเมทิลินเตตระมีน (Dinitroso pentamethylene tetramine, DPT) โดยยังผสมทำหน้าที่เป็นสารยึดเชื่อม (Binder) ระหว่างอนุภาคผงยาง ท่อที่ได้มีค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยืดหยุ่นสามารถโค้งงอได้มีรูพรุนเล็กเชื่อมต่อกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านออกมาได้ในอัตราคงที่ที่ความดันต่ำและปริมาณน้ำต่ำ ทำให้สามารถให้น้ำแก่รากได้โดยตรง ไม่เกิดการกัดเซาะของหน้าดิน นอกจากนี้ยังสามารถใช้น้ำได้โดยไม่จำกัดขนาดพื้นที่ ประหยัดพลังงาน เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มของขยะประเภทยางรถยนต์ และลดปัญหาขยะยางรถยนต์ใช้แล้ว ซึ่งโดยปกติจะทำการกำจัดโดยการฝังกลบ หรือเผา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อพัฒนาความหนาและอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพีดีเอ็มของท่อยางน้ำซึม ให้เหมาะสมกับการใช้งานและมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์



รูปที่ 1.1 ยางล้อรถยนต์ที่ใช้แล้ว

## 1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาความหนา และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) ที่มีผลต่อสมบัติของท่อยางน้ำซึมที่เตรียมได้เตรียมได้จากยางธรรมชาติ (NR) ผสมยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) และผงยางรถยนต์ (GRT)
2. เพื่อศึกษาสมบัติการซึมน้ำของท่อยางน้ำซึมที่เตรียมได้

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ ความหนาของท่อน้ำซึม และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางอีพีดีเอ็ม (EPDM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาสมบัติต่างๆของท่อน้ำซึมที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ  
 ฐานฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ
4. ศึกษาต้นทุนในการผลิต



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างท่อน้ำซึม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ส่งเสริมการแปรรูปยางรถยนต์ที่เหลือใช้มาก่อให้เกิดประโยชน์ ลดปริมาณยางรถยนต์ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ภายในประเทศ โดยนำยางรถยนต์ที่ใช้แล้วมาแปรรูปเป็นท่อน้ำซึมบนดินเพื่อใช้ในทางเกษตร เพื่อลดปริมาณการสูญเสียน้ำในทางเกษตร
2. สามารถผลิตท่อน้ำซึมที่มีประสิทธิภาพได้ด้วยต้นทุนการผลิตที่ต่ำ
3. สามารถนำท่อน้ำซึมที่ผลิตได้ไปใช้ในเกษตรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทดแทนระบบน้ำหยดและระบบน้ำดำ
4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการทำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้แล้ว โดยนำผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้แล้วมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม
5. สามารถเตรียมท่อน้ำซึมที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมยางอีพีดีเอ็ม และผงยางรถยนต์ ที่มีความสามารถในการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสม สามารถนำไปผลิตในเชิงพาณิชย์ได้
6. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการปรับปรุงท่อน้ำซึมชนิดบนดินเพื่อใช้ผลิตเชิงพาณิชย์
7. มีการนำท่อน้ำซึมไปใช้ผลิตในเชิงพาณิชย์และใช้ในทางเกษตร เพื่อลดทรัพยากรน้ำที่ใช้

#### เป็นการช่วยลดภาวะโลกร้อน

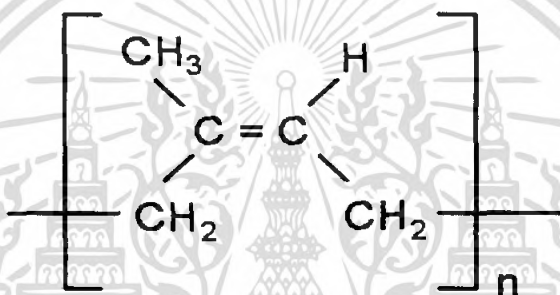
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [5]

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีชื่อทางเคมี คือ ซิส - 1,4 - พอลิไอโซพรีน (Cis -1,4 - Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง ยาว มีหน่วยซ้ำ ๆ กัน คือ ไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือ ต้นยางพารา ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ "ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส" (*Hevea brasiliensis*) บางครั้งจึงเรียกยางธรรมชาติว่า "ยางฮีเวีย" (*Hevea latex*) หรือยางพารา



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ซิส - 1,4 - พอลิไอโซพรีน [5]

ยางเป็นวัสดุที่สามารถยืดตัวออกหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่า (อย่างน้อยสองเท่า) เมื่อทำการให้แรง และสามารถหดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง ในการใช้ประโยชน์จากยางจึงต้องมีการนำยางมาทำการเชื่อมโยง หรือ วัลคาไนเซชัน (Crosslinking หรือ Vulcanization) หรืออาจเรียกว่า การทำให้ยางสุก (Curing) ซึ่งเป็นขบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยาง จากโซ่ตรง (Linear chains) เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) หรือเทอร์โมเซต (Thermosets) ยางจะมีสมบัติที่ดีขึ้น กล่าวคือเปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อนนิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด ไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง และไหลได้เมื่อทิ้งไว้นานกลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง

ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติ จะต้องทำการแปรรูปน้ำยางดิบให้อยู่ในรูปอื่น เพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา ซึ่งมี 2 รูปแบบคือ

1. ยางแห้ง (Dry rubber) เป็นรูปแบบของยางธรรมชาติที่นิยมใช้ที่สุด เนื่องจากความง่ายในการใช้งานขนส่ง และเก็บรักษา ซึ่งน้ำยางสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปยางแห้งได้หลายแบบ ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheets, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air – dried sheets, ADS) ยางแท่ง (Block rubbers) ยางเครพ (Crepe rubbers) เป็นต้น

### 1.1 ยางแผ่นรมควัน ( Ribbed smoked sheets, RSS)

ยางแผ่นรมควัน เป็นยางธรรมชาติที่แปรรูปเป็นยางแห้ง มีผลผลิตประมาณร้อยละ 80 ของยางทั้งประเทศ การผลิตยางแผ่นรมควันสามารถทำได้โดยการตากยางแผ่นในโรงรมควันที่มีการเผาพื้นไม้ให้ควันด้านล่างโรงรมควันจะมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C ทำให้ยางแห้งภายใน 4 – 7 วัน ยางแผ่นรมควันที่แห้งจะใส สีน้ำตาลเข้มอันเนื่องมาจากควันไฟการรมแผ่นยางด้วยควันไฟ จะช่วยให้ยางแห้งและป้องกันการเกิดเชื้อรา เป็นการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเนื่องจากควันไฟมีสารจำพวกฟีนอล (Phenol) ซึ่งเป็นสารต่อต้านการเกิดเชื้อราตามธรรมชาติ

การจัดแยกเกรดหรือชั้นยางแผ่นรมควันจะดูด้วยสายตา โดยพิจารณาจาก ขนาด รูปร่าง ความหนา ความสม่ำเสมอของสี ปริมาณฟองอากาศ เชื้อราบนแผ่นยาง ตำนานิจการรมควัน ความชื้น สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ชั้น คือ [6]

#### ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ

เป็นยางแผ่นรมควันที่มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ

#### ยางแผ่นรมควันชั้น 1

ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากหรือน้อยเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ

#### ยางแผ่นรมควันชั้น 2

ก้อนยางแต่ละก้อนมีเชื้อราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 5% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

#### ยางแผ่นรมควันชั้น 3

ก้อนยางแต่ละก้อนมีเชื้อราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 10 % (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่าง และฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

#### ยางแผ่นรมควันชั้น 4

ก้อนยางมีเชื้อราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 20% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

#### ยางแผ่นรมควันชั้น 5

ก้อนยางมีเชื้อราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 30% (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรรมควันไม่สม่ำเสมอ จำนวนมาก

2. น้ำยางข้น (Concentrated latex) ปกติน้ำยางสดจะมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) ประมาณ 30 – 45 % หรือ เจลลี่ประมาณ 35% เป็นน้ำประมาณ 65% ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้มีการผลิตน้ำยางข้น ที่มีเนื้อยางแห้งประมาณ 60%

## 2.2 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for Rubber) [5 – 7]

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีการ “ออกสูตรยาง” (Rubber formulation) ซึ่งเป็นการกำหนดชนิดและปริมาณสารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมเข้ากับยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ส่วนประกอบของสูตรผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ สามารถแบ่งเป็นกลุ่มหลักได้ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing Agents )

ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3 – D network) โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำใหยางซึ่งเป็นวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด ไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง และไหลได้เมื่อทิ้งไว้นาน กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง สารเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

1. กำมะถัน (Sulfur)
2. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor)
3. สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide)
4. ซีลีเนียม (Selenium) และเทลลูเรียม (Tellurium)
5. สารอื่น ๆ เช่น ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxides), ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins)

#### 2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization)

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เป็นวิธีที่นิยมที่สุดเนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยางที่สำคัญที่สุดคือ ยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นอย่างที่ไม่อิมิตัว มีพันธะคู่เป็นจำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) และยางบิวตะไดอีน (BR) ฯลฯ จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยให้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) กำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปผลึก ромบิก (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน (Cyclic or ring structure) ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม ( $S_8$ ) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $300\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) เป็นชนิดที่นิยมทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถันประมาณ 1 – 3 phr ถ้าใส่กำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการ “บลูม” (Bloom) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำมะถันเกิดการแพร่จากภายในออกมาสะสมเป็นผลึกที่ผิวของผลิตภัณฑ์เห็นเป็นรอยคราบสีเหลือง หรือสีขาว

2. กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ละลายในตัวทำละลายและยาง ผสมเข้ากับยางได้ยากกว่ากำมะถันชนิดละลาย แต่เมื่อผสมเข้ากันแล้วจะเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนกับยาง ทำให้ไม่เกิดการบลูม จึงนิยมใช้กำมะถันชนิดนี้เมื่อต้องการใส่กำมะถันในปริมาณมาก เช่น ยางชนิดแข็งมาก ข้อจำกัดของกำมะถันชนิดนี้คือ มีราคาแพง (แพงกว่ากำมะถันชนิดละลายประมาณ 5 เท่า) นอกจากนี้อาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ที่อุณหภูมิสูงเกิน  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $210\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) จึงต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกิน ถ้าต้องการใช้ประโยชน์กำมะถันชนิดไม่ละลาย

### 2.2.1.2 เครื่องวัดการเชื่อมयोग (Curemeters for rubber compounds)

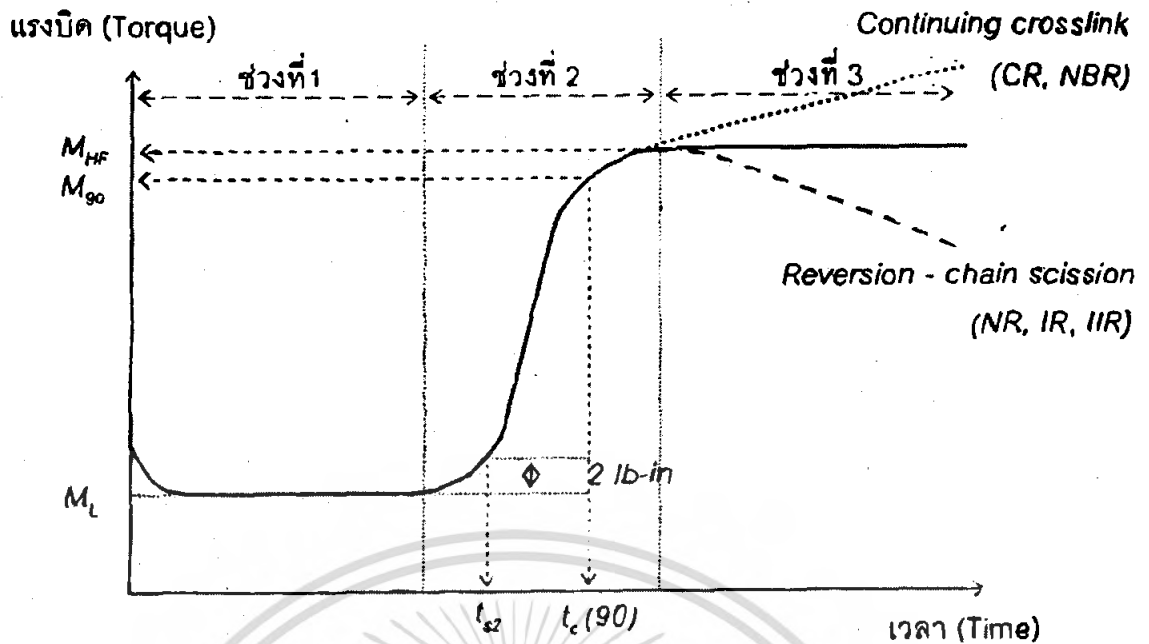
เครื่องวัดการเชื่อมयोगยาง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating Disc Rheometers, ODR) เป็นเครื่องที่สามารถวัดการเชื่อมयोगยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางและห้องปฏิบัติการทดสอบยางทั่วไป เพื่อใช้หาสภาวะการเชื่อมयोगที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงาน คือ การตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงบิด (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนสั้นอยู่ในตัวอย่างยาง ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

2. เครื่องวัดการเชื่อม योगแบบไร้จานหมุน (Rotorless curemeters หรือ Moving Die Rheometer, MDR) เป็นเครื่องวัดการเชื่อม योगชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้เกิดการเชื่อม योगได้รวดเร็วกว่า ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ซึ่งให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ให้ข้อมูลมากกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E) อัตราการเชื่อม योग (Cure rate) และ Phase angle

การวัดการเชื่อม योगยางสามารถวัดได้จากการเพิ่มแรงบิด (Torque) ที่ใช้เพิ่มทำการหมุนของจานที่มุมคงที่ เนื่องจากทดสอบที่อุณหภูมิสูง จึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแรงบิดอันเนื่องมาจากความหนืด ดังนั้นการเพิ่มแรงบิดของตัวอย่างยางที่เกิดการเชื่อม योगจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุดเชื่อม योगที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ผลการทดสอบสามารถแสดงในกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งเรียกว่า กราฟ การเชื่อม योग (Cure curve) ดังรูปที่ 2.2 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) [5]

ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่าง ๆ ในกราฟการเชื่อมโยง ดังนี้

- $M_L$  = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
- $M_{HF}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)
- $M_{HR}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)
- $M_H$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ยืดหยุ่น เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)
- $T_{S2}$  = เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือ เวลาสกอร์ช (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิด เพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว (lb-in) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ )
- $M_{90}$  = ค่าแรงบิดที่ 90% ของการเชื่อมโยงคำนวณได้จาก
- $M_{90} = M_L + 0.9 (M_{HF} - M_L)$
- $TC(90)$  = เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90% ( $M_{90}$ ) นิยามเท่ากับเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเชื่อมโยงยาง (Optimum curetime)
- $CRI$  = ดัชนีอัตราเร็วเชื่อมโยง (Cure rate index) คำนวณได้จากสมการ

$$\text{Cure rate index (CRI)} = 100 / (t_{c(90)} - t_{s2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาการเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และกำมะถันปริมาณน้อยลง เนื่องจากการใช้สารเชื่อมโยงเพียงอย่างเดียวสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้แต่จะใช้เวลานานมากจึงจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์ สามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM เป็น 6 กลุ่ม ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)
- กลุ่มที่ 2 ไทเอโซล (Thiazoles)
- กลุ่มที่ 3 กัวนิดีน (Guanidines)
- กลุ่มที่ 4 ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)
- กลุ่มที่ 5 ไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)
- กลุ่มที่ 6 ไทยูแรมชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าเรียกว่า สารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerators) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก” (Synergistic effects) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน ในงานวิจัยนี้ใช้สารเร่ง 2 ชนิด คือ

1. CBS (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide)

CBS เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มซัลเฟนาไมด์ ซึ่งเป็นสารเร่งที่มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) ยาวกว่าไทเอโซล การใส่ซัลเฟนาไมด์เพิ่มขึ้น ทำให้ Scorch time สั้นลงบ้างแต่ทำให้เวลาเชื่อมโยง (Cure time) สั้นลงมากและมอดุลัสสูงชันมาก เนื่องจากซัลเฟนาไมด์มี Scorch time ยาวทำให้เกิดการเชื่อมโยงในแม่แบบดี เพราะมีเวลาให้ยางไหลได้เต็มแม่แบบและไม่เหมาะแก่การเชื่อมโยงแบบร้อน แต่เมื่อนำซัลเฟนาไมด์ผสมกับเตตระเมทิลไทยูแรมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethyl Thiuram Monosulfide, TMTM) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้เร็วขึ้น

2. TMTD (Tetramethyl thiuramdisulfide)

TMTD เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มไทยูแรมซัลไฟด์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดและนิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มนี้ ยางใช้ไทยูแรมเป็นสารเร่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้หลายวิธี เช่น ใช้เครื่องอบไอน้ำและอากาศร้อน ซึ่งทำให้ยางเกิดการจับตัวก่อนที่จะเสีรูปในขณะเชื่อมโยง ในบางครั้งอาจใช้ไทยูแรมเป็นสารเร่งทุติยภูมิร่วมกับสารเร่งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์ได้

### 2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก (ZnO / Stearic acid) เนื่องจาก มีราคาไม่แพง และยังมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริก เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต ( Zinc stearate ) ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน (Zinc ion) ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง ลักษณะสำคัญของตัวกระตุ้นคือ มีความเป็นต่าง

#### 2.2.3.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่เป็นสารอนินทรีย์ที่สำคัญ และนิยมใช้เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มอดุลัสจะเพิ่มขึ้น และปริมาณของซิงค์ออกไซด์ที่ให้มอดุลัสสูงสุด คือ มากกว่า 3 phr โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณ 3 - 5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถใช้ในปริมาณ 1 phr ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีมอดุลัสสูง และใส

#### 2.2.3.2 กรดไขมัน (Fatty Acid)

กรดไขมันเป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ สำหรับสารเร่งการเชื่อมโยงบางตัว เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก กรดลอริก เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดอะลิฟาติก อิ่มตัว ที่มีคาร์บอน 12 ถึง 18 อะตอม ปริมาณการใช้กรดไขมันในยางขึ้นกับชนิดยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ปริมาณน้อย สำหรับยางธรรมชาติที่มีกรดไขมันอยู่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งอยู่ในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่มีอยู่ในยางธรรมชาติมีปริมาณต่างกันมาก ซึ่งทำให้เวลาในการเชื่อมโยงต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ในยางธรรมชาติ จะใช้ประมาณ 1 - 4 phr

### 2.2.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant)

ยางที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางเอสปีอาร์ (SBR) ยางปีอาร์ (BR) ฯลฯ ยางเหล่านี้มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลัก ซึ่งพันธะคู่นี้มีความไวต่อการทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และโอโซน (O<sub>3</sub>) ในบรรยากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(oxidation) และโอโซนชัน (ozonation) ตามลำดับ เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยาง

สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางสามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆคือ

#### 1. สารป้องกันการออกซิเดชัน (Antioxidant)

เป็นสารที่ป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสลายได้เมื่อดังตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ซึ่งออกซิเจนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อมสลายของยาง โดยที่โลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยาง เป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสลายเร็วขึ้น

สารป้องกันการออกซิเดชัน สามารถแบ่งตามสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น 3 ชนิดคือ

1. สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์
2. สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์
3. Imidazyl derivative

#### 2. สารป้องกันโอโซน (Antiozonant)

เป็นสารที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ตั้งยาง เมื่อนำยางไปยึดไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่งยางชนิดไม่ อิ่มตัว เช่น ยางบิวไทล์ (IIR) หรือยางอีพียาร์ (EPR) สารป้องกันโอโซนที่ดีคือ P-Phenylene diamine (PPD) นอกจากนี้ยังพบว่าขี้ผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax) ยังเป็นสารที่ใช้ป้องกันโอโซนได้ด้วย โดยปริมาณขี้ผึ้งที่ใช้ต้องมากพอที่จะแพร่ออกมาที่ผิววนอก เกิดเป็นชั้นฟิล์มขี้ผึ้งบางๆเคลือบผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับผิวยางที่มีความทนทานต่อโอโซนในอากาศ

#### 2.2.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อเป็นสารที่มีราคาถูก เทียบกับยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีราคาแพง สามารถใช้ผสมในยางเพื่อปริมาณของยางผสมสูตรหรือผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยางโดยทำให้พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมมีความแข็งแรงสูงขึ้นและบางชนิดสามารถทำให้ยางผสมสูตรมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นกว่า 10 เท่า

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต เพียงอย่างเดียว ไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ได้แก่ แคลเซียม-คาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ดินขาว (Clay or Kaolin) ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอุตสาหกรรมยางสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุด คือ เขม่าดำ (Carbon black) เนื่องจากมีราคาถูกและช่วยเสริมแรงอย่างมากให้กับยางแต่จะใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีดำเท่านั้น

### 2.2.5.1 เขม่าดำ (Carbon Black)

เขม่าดำได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์หรือการแตกตัวเนื่องจากความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เขม่าดำจึงจัดเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุด ในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก อาจให้ความแข็งแรง (Strength) ของยางเพิ่มมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรง ได้แก่

1. ขนาด (Size) หรือพื้นที่ผิว (Surface area) ขนาดอนุภาคของเขม่าดำจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว สารตัวเติมยังมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเขม่าดำขนาดเล็ก การผสมเขม่าดำเข้ากับยางยิ่งทำได้ยากขึ้น
2. โครงสร้าง (Structure) ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่อยาง ส่วนใหญ่จะมีผลทางด้านการแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง จะผสมกระจายในยางได้ดี ทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีด (Extrusion) มีผิวเรียบ แต่ผสมในยางได้ปริมาณน้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ
3. เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณน้อยปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะให้ความเป็นกรด - ด่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน ซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เขม่าดำที่มีความเป็นต่างจะเกิดการเชื่อมโยงเร็วกว่าเขม่าดำที่มีความเป็นกรด
4. ความเป็นรูพรุน ความเป็นรูพรุนในเขม่าดำจะมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เพราะรูพรุนนี้จะดูดสารเร่งเข้าไปทำให้การเชื่อมโยงช้าลง

### 2.2.5.2 ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง

1. ความแข็งแรงดึง เขม่าดำเกือบทุกตัวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่เขม่าดำปริมาณ 40 - 50 phr จะให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด
2. ความทนทานต่อการขีดถู ขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีผลอย่างมากต่อความทนทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการขีดถูจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคของเขม่าดำเล็กลง โดยที่ปริมาณเขม่าดำ 60 phr จะให้ความทนทานต่อการขีดถูสูงสุด
3. ความแข็งกด (Hardness) ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ และถ้าขนาดอนุภาคของเขม่าดำลดลง ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.6 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing Aids)

สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือ สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ใช้เวลา และพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่าง ๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติจะใช้สารช่วยกระบวนการผลิตในปริมาณน้อยไม่เกิน 5 phr สารช่วยกระบวนการผลิตมีหลายชนิด คือ

#### 2.2.6.1 เปปไทเซอร์ (Peptizers)

เปปไทเซอร์ หรือสารตัดสายโซ่ เป็นสารที่ทำให้ยางนิ่ม เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ของยางทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความหนืดของยางลดลง เกิดการผสมได้ง่ายขึ้น นิยมใช้เพื่อลดเวลาการบดย่อย (Mastication) โดยเฉพาะยางดิบที่แข็ง เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณเปปไทเซอร์ที่ใส่ยางประมาณ 1-3 phr ตัวอย่างของเปปไทเซอร์ ได้แก่ กรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรโรไทโอฟินอล (Pentachlorothiophenol) เป็นต้น

#### 2.2.6.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเติมแต่งที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง ช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์ เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ช่วยเพิ่มปริมาตรอิสระ (Free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ลดลง ทำให้วัสดุมีสมบัติความยืดหยุ่นเป็นที่ดีขึ้น นิ่มตัวขึ้น และเพิ่มสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยางไม่แพร่ออกมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ เช่น กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมัน สารจำพวกเอสเทอร์ (Oils) น้ำมันสน (Pine) ฯลฯ

### 2.2.7 สารให้ฟอง (Blowing Agent)

สารให้ฟอง คือ สารที่ใส่เข้าไปในยาง เมื่อให้ความร้อนแก่ยางในขณะทำการเชื่อมโยง โมเลกุลของสารให้ฟองจะสลายตัวให้ก๊าซออกมาซึ่งทำใหยางเกิดรูพรุนในรูปของฟองน้ำ (Sponge) หรือยางรูพรุนขนาดเล็ก (Micro – Cellular rubber)

สารให้ฟองที่ดีมีลักษณะดังนี้คือ

- ควรปล่อยก๊าซออกมาในช่วงอุณหภูมิแคบและแน่นอน เพื่อสามารถควบคุมได้ง่ายและรวดเร็วพอสมควร
- ก๊าซที่ให้ออกมาไม่ควรกัดกร่อนโลหะ เช่น ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ควรเป็นก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- สามารถกระจายและละลายในยางได้ดี
- มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่มีผลต่ออัตราการเชื่อมโยงยาง
- ไม่ควรทำให้ยางหดตัวหรือยุบตัวภายหลังการเชื่อมโยง
- ราคาถูก

สารให้ฟองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

#### 2.2.7.1 สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต และ แอมโมเนียมคาร์บอเนต ซึ่งสารทั้งสามชนิดนี้จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันนิยมใช้ โซเดียมไบคาร์บอเนตมากที่สุด เนื่องจากแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต และแอมโมเนียมคาร์บอเนต เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต่างและกรดตามลำดับ ก๊าซเหล่านี้ถ้าหากเก็บอยู่ในยางจะรวมตัวกันได้ ดังนั้นโอกาสของยางที่ขยายตัวจะยุบตัวกลับเล็กน้อยได้ นอกจากนี้ความเป็นด่างทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

#### 2.2.7.2 สารให้ฟองชนิดอินทรีย์

ปัจจุบันจะใช้สารให้ฟองชนิดอินทรีย์เกือบทั้งหมด เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถละลายในยางได้ดี ทำให้การกระจายของสารให้ฟองเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ฟองอากาศที่อยู่ในยางจะกระจายทั่วถึงกันตลอด สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามโครงสร้างดังนี้

- สารประกอบเอโซ (Azo Compounds) เช่น Diazoamino – Compounds, Azonitrile และ Azodicarbonamide (AZ)
- อนุพันธ์ของไฮดราซีน (Hydrazine Derivatives) เช่น Benzenesulfohydrazide (BSH) , Benzene – 1,3 – disulfohydrazide , Diphenyloxide – 4,4'- disulfohydrazide และ p – Toluenesulfonic acid hydrazid
- สารประกอบไนโตรโซ (N–Nitroso Compounds) เช่น N,N'–Dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT หรือ DPT) และ N,N' – Dimethyl – N,N' - Dinitrosophthalamide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างชนิดของสารให้ฟองที่เหมาะสมกับการใช้งานต่าง ๆ [8]

|   | Benzene-Sulfo-Hydrazide          | Benzene1,3-disulfo-hydrazide | Dinitrosopen-tamethylene tetramine | Azodicarb-onamide |
|---|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| กระบวนการเกิดฟองก๊าซก่อนการเชื่อมโยง        |                                  |                              |                                    |                   |
| ยางพองน้ำ                                   | ดีมาก                            | ดี                           | ใช้ได้                             | ไม่แนะนำให้ใช้    |
| พื้นรองเท้าแตะ                              | ดีมาก                            | ดีมาก                        | ใช้ได้                             | ไม่แนะนำให้ใช้    |
| ยางพองน้ำเซลล์ปิด <sup>1)</sup>             | ดีมาก                            | ดี                           | ใช้ได้                             | ใช้ได้            |
| ยางพองน้ำเซลล์ปิด <sup>2)</sup>             | ใช้ได้                           | ดี                           | ดีมาก                              | ดีมาก             |
| กระบวนการเกิดฟองก๊าซหลังการเชื่อมโยง        |                                  |                              |                                    |                   |
| ยางรูปทรงแท่งขนาดเล็กชนิดนิ่ม <sup>3)</sup> | ดีมาก                            | ดี                           | ดีมาก                              | ดีมาก             |
| พื้นรองเท้าที่มีรูปทรงแท่ง                  | ดีมาก                            | ดี                           | ดีมาก                              | ดี                |
| พื้นรองเท้าที่มีรูปทรงแท่งขนาดเล็กชนิดแข็ง  | ใช้ได้                           | ดีมาก                        | ดีมาก                              | ดี                |
| ยางอีโบนท์ที่มีรูปทรงแท่ง                   | ดีมาก                            | ดี                           | ดี                                 | ใช้ได้            |
| ชนิดของรูปทรงแท่ง                           | ละเอียดมากจนมองไม่เห็นรูปทรงแท่ง | มองเห็นรูปทรงแท่ง            | ละเอียดมากจนมองไม่เห็นรูปทรงแท่ง   | ละเอียดมาก        |

<sup>1)</sup> เชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน

<sup>3)</sup> ความหนาแน่นประมาณ 0.3 g/cm<sup>3</sup>

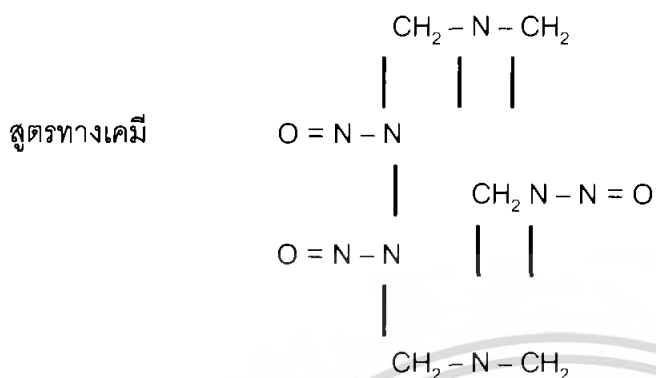
<sup>2)</sup> เชื่อมโยงโดยใช้เกลือเหลวหรือความถี่สูง

<sup>4)</sup> คล้ายหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Nitroso compound

สูตรทั่วไปของไนโตรซคือ  $-N-N=O$  ตัวอย่างได้แก่ Dinitroso pentamethylene tetramine



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไดไนโตรซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DPT)

ตัวย่อ คือ DNPT หรือ DPT หรือ DNP

เป็นสารฟูที่ใช้กันมานานแล้วตั้งแต่ปี พ.ศ. 2491 ใช้กันแพร่หลายในการทำรองเท้าฟองน้ำ ฟองน้ำขอบประตูรถยนต์ และลูกบอลฟองน้ำ เป็นต้น การใช้จะใช้ปริมาณ 1-2 phr ยกเว้นกรณีทำ Microcellular rubber จะใช้ 3-5 phr เป็นต้น

DPT จะสลายตัวที่อุณหภูมิ  $207^{\circ}\text{C}$  ส่วน DPT ทางการค้าจะสลายตัวประมาณ  $190-200^{\circ}\text{C}$  ถ้ามีกรดอยู่ด้วย DPT จะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าใช้กรดแก่จะสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลงไปอีก ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของกรดต่อการสลายตัวของ DPT

| กรด               | pKa   | อุณหภูมิในการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------------|-------|---|
| Hydrochloric acid | < 1.0 | ที่อุณหภูมิห้องพร้อมทั้งติดไฟ               |
| Oxalic acid       | 1.19  | 60-70                                       |
| Salicylic acid    | 2.97  | 100   |
| Phthalic acid     | 2.89  | 115   |
| Benzoic acid      | 4.20  | 130   |
| Boric acid        | 9.14  | 130   |
| Fatty acid        | >10.0 | 180   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DPT เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซต่างๆกัน เช่น ไนโตรสออกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน น้ำ และฟอร์มาลดีไฮด์ ข้อควรระวัง คือ DPT เป็นตัวออกซิไดซ์ต้องระวังอย่าให้ถูกกับสารรีดิวซ์ (เช่น พวกไฮโอฟินอลหรือเมอร์แคปไทด์) มิฉะนั้นจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรงที่อุณหภูมิในการแปรรูปยางได้ DPT เป็นสารที่ติดไฟและก่อประกายไฟได้ง่ายด้วย เช่น เมื่อมีการเสียดสีบนลูกกลิ้ง เป็นต้นดังนั้น DPT มักใช้ปนกับสารอื่นเสมอ เพื่อลดอันตรายเกี่ยวกับเรื่องไวไฟนี้ สารที่ใช้ปนนั้นอาจเป็นซิลิกาหรือเคลลล์ เป็นต้น

อนึ่ง DPT เป็นสารที่ไวไฟในการทำปฏิกิริยากับกรดตัวนั้นมักจะใส่ต่างเข้าไปปนกับ DPT ด้วย เช่น การใช้สารออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม ซิงค์ หรือแมกนีเซียม เพื่อให้เป็นสเตบิลไรเซอร์ (Stabiliser) ของ DPT

DPT และสิ่งที่เหลือจากการสลายตัวของ DPT ไม่ค่อยเป็นพิษและมีฤทธิ์ทำให้ผิวหนังระคายเคืองเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจาก DPT เป็นสารที่สลายตัวที่อุณหภูมิสูงจึงมักใช้กรด Salicylic หรือกรด Phthalic เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการสลายตัวของ DPT แต่ผลผลิตที่ออกมาจะมีกลิ่น (คล้ายกลิ่นปลา) และกรดจะทำให้ยางวัลคาไนซ์ช้าลงไปอีกด้วย

นอกจากจะใช้กรดเป็นตัวลดอุณหภูมิการสลายตัวของ DPT แล้ว สารที่เป็นต่าง เช่น ยูเรียหรือสารผสมที่มียูเรียอยู่ ก็สามารถใช้เป็นตัวควบคุมการสลายตัวของ DPT ได้เช่นกัน ส่วนสารที่เป็นกลางช่วยให้ DPT สลายตัว ได้แก่ ไกลคอล เช่น Diethylene glycol, Triethylene glycol, Polyethylene glycol เป็นต้น การใช้สารเป็นกลางนี้ทำให้ไม่มีกลิ่น นอกจากนั้นสารที่เป็นกลางและเป็นต่างจะทำให้การวัลคาไนซ์ยางเป็นไปได้เร็วขึ้น

### 2.2.8 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) หรือ คิกเกอร์ (Kicker) เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาของสารให้ฟอง โดยช่วยลดช่วงอุณหภูมิการทำงานของสารให้ฟอง และทำให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง คิกเกอร์มีหลายชนิด การเลือกใช้คิกเกอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นมีความสำคัญมาก ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการเลือก ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง สภาพะของการใช้งาน ความสามารถในการผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ หรือความเข้ากันได้ (Compatibility) ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์และสารตัวเติมต่าง ๆ เป็นต้น คิกเกอร์เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้สามารถใช้งานสารให้ฟองได้ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้าง และสามารถใช้งานได้กับสารให้ฟองหลายชนิด

คิกเกอร์ที่ใช้งานกับสารให้ฟองชนิด DPT มีหลายชนิด ได้แก่

- สารที่เป็นกรด เช่น กรดซาลิไซลิก และกรดพทาลิก (Phthalic) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกลิ่น

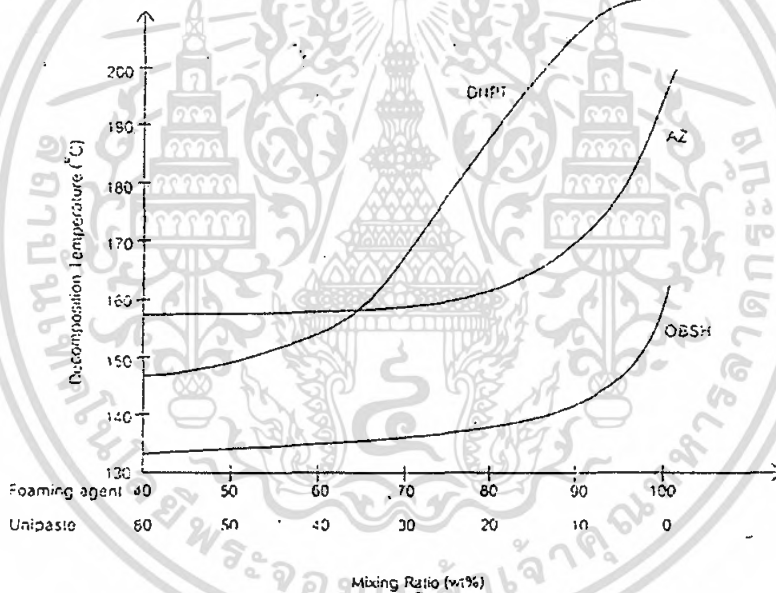
และกรดทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก 107881 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารที่เป็นต่าง เช่น ยูเรีย และสารผสมที่มียูเรีย ซึ่งทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น
- สารที่เป็นกลาง เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล การใช้สารที่เป็นกลาง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกลิ่น และยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

ยูเรียเป็นคิกเกอร์ที่นิยมใช้กับสารให้ฟอง DPT เนื่องจากทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของ DPT เหมาะสมกับกระบวนการผลิต ช่วยกระตุ้นอัตราการเชื่อมโยง (มีสมบัติเป็นต่าง) ทำให้ลดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) นอกจากนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีขาวกว่าการใช้สารให้ฟองเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณที่ทาเนียมไดออกไซด์ (สารที่ให้สีขาว) ที่ใช้ในยาง นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดจากการใช้ DNPT ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของยูเรียต่อสารให้ฟอง AZ , DNPT และ p,p-Oxybis (benzenesulfonyl hydrazide (OBSh)) แสดงดังรูปที่ 2.4 [7]



รูปที่ 2.4 ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของ Unipaste<sup>®</sup> (ยูเรีย) ต่อสารให้ฟอง AZ, DNPT และ OBSh [7]

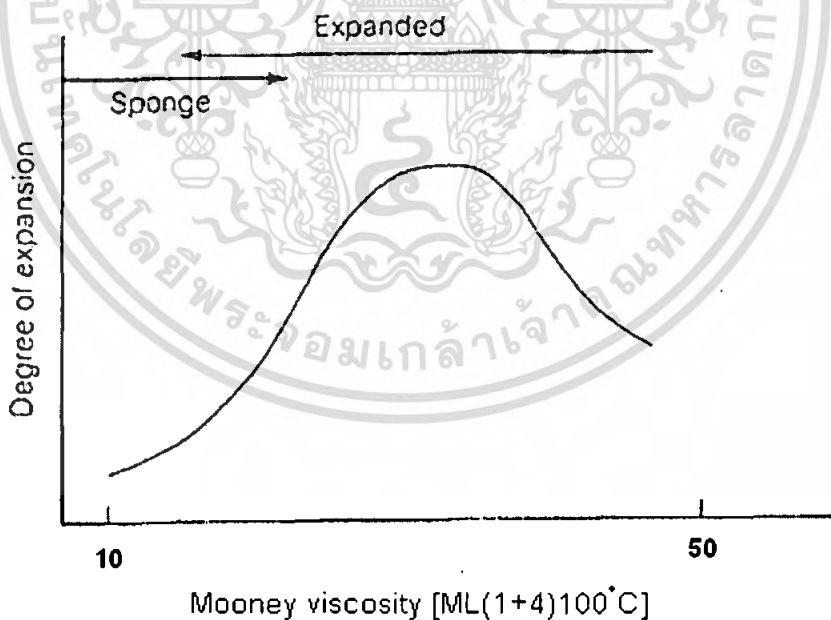
### 2.3 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular Rubber)

ผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1. Foam rubber
2. Sponge rubber
3. Expanded rubber (Micro cellular rubber)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Foam rubber เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตจากน้ำยาง มีโครงสร้างเซลล์ติดต่อกัน (Open cellular structure) เช่น ยางฟองน้ำ (Latex foam) ส่วน Sponge rubber และ Expanded rubber เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางแห้ง แต่ต่างกันว่าโครงสร้างเซลล์ของ Sponge rubber จะติดต่อกัน ส่วน Expanded rubber มีโครงสร้างเซลล์ไม่ติดต่อกัน (Closed cellular structure) ในการทำให้เกิดรูพรุนภายใน Sponge rubber และ Expanded rubber จะทำโดยใส่สารให้ฟองซึ่งแตกตัวให้ก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อน การขยายตัวของ Sponge rubber และ Expanded rubber จะขึ้นอยู่กับความหนืด (Viscosity) ของยาง สูตรยางที่ใช้ในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber จะต้องมีความหนืดต่ำ ความหนืดที่เหมาะสมจะทำให้การขยายตัวของก๊าซสมบูรณ์ และเมื่อเวลาผ่านไปความหนืดของยางจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ความหนืดต่ำ ยางมีความแข็งแรงต่ำทำให้ฟองก๊าซเกิดการรวมตัวกันหลุดออกจากยางและเกิดการสลายตัวในที่สุด ทำให้ยางมีโครงสร้างแบบเปิดและความหนาแน่นสูงขึ้น ที่ความหนืดสูง ยางมีความแข็งแรงพอที่จะรักษาโครงสร้างของฟองก๊าซ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบปิด แต่ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก ฟองก๊าซจะถูกควบคุมให้อยู่ภายในยาง ซึ่งทำให้การขยายตัวของก๊าซลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ แสดงดังรูปที่ 2.5 [9]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ [9]

สิ่งสำคัญในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber คือ ชนิดของสารให้ฟองโดย Sponge rubber จะใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารที่ให้ไนโตรเจน ส่วน Expanded rubber จะใช้สารที่ให้ไนโตรเจนเท่านั้น คุณสมบัติการละลายตัวของสารให้ฟองและคุณสมบัติการเชื่อมโยงจะต้องสมดุลกัน นอกจากนี้สภาวะการผสมก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ความหนืดของพอลิเมอร์ ปริมาณสารทำให้นิ่ม ปริมาณสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยง และชนิดสารให้ฟอง

## 2.4 ผงยางรถยนต์ (Ground Rubber Tire, GRT) [10]

ผงบยางเป็นวัตถุดิบส่วนหนึ่งที่ได้ระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaimed rubber) โดยผงบยางที่ทำการผลิตส่วนใหญ่จะได้จากยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพ และมีบางส่วนที่เป็นของเสียในกระบวนการผลิตนั้น สามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ

### 2.4.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Grinding)

เทคนิคการบดที่อุณหภูมิต่ำนี้สามารถทำได้โดยทำให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) โดยแช่ยางที่เชื่อมโยงแล้วในไนโตรเจนเหลว จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด และลูกกลมโลหะ (Ball mill) จะได้ผงบยางที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 30 – 100 เมช ขนาดอนุภาคผงบยางที่ได้ขึ้นกับเวลาที่แช่ในไนโตรเจนเหลว และขนาดของตะแกรงร่อน (Screen) ที่อยู่ในเครื่องบด โดยทั่วไปราคาของผงบยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง มีรายงานว่ามีการใช้ผงบยางประมาณ 5 – 10 phr ในยางล้อรถโดยสาร และรถบรรทุก

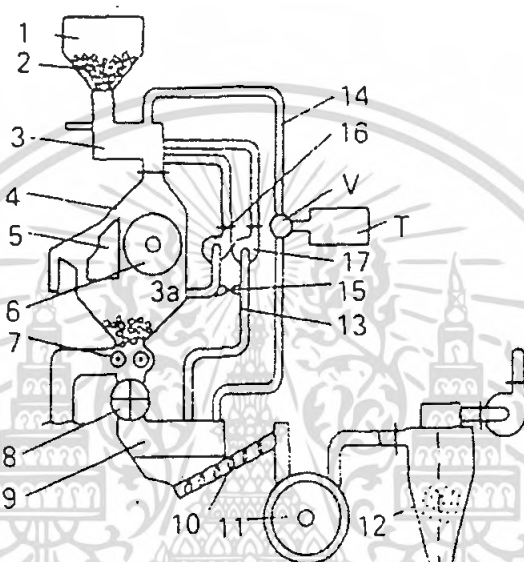
### การแปรรูปและการผสมผงบยาง

ผงบยางชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถแปรรูปได้หลายลักษณะดังนี้

- การอัดรีด (Extrusion) การใช้ผงบยางขนาด 80 – 100 เมช สามารถแก้ปัญหาเรื่องรอยแตกและผิวขรุขระ ส่วนขนาดอนุภาค 50 – 60 เมช ก็สามารถใช้ได้ขึ้นกับความต้องการความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์ ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณ 5%
- การรีดแผ่น (Calendering) การใช้ผงบยางขนาด 80- 100 เมช จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขนาด 0.06 นิ้ว หรือน้อยกว่า มีผิวเรียบสูงสุด ถ้าไม่ต้องการความเรียบของผิวสามารถใช้ขนาด 30 – 60 เมช ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณ 10%
- การอัดขึ้นรูป (Molding) สามารถใช้ผงบยางได้ทุกขนาด เนื่องจากช่วยในการไล่อากาศที่ขังในยางขณะขึ้นรูป
- การไหลขณะขึ้นรูป (Mold flow) โดยทั่วไปผงบยางจะช่วยปรับปรุงการไหลขณะอัดขึ้นรูปเกิดการหดตัว (Shrinkage) น้อย การหดตัวลดลงเมื่อปริมาณผงบยางเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือในการผลิตผงยางชนิดนี้มีราคาถูก ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมกรไหลดีกว่าผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) สันฐานวิทยาพื้นผิวของผงยาง ทำให้สามารถกำจัดอากาศที่ขังอยู่ในยางที่ยังไม่เกิดการเชื่อมโยงออกไปได้ง่าย โดยเฉพาะยางล้อยืด ซึ่งมีแนวโน้มลดลงของการพองหลังจากเกิดการเชื่อมโยง และผงยางจะถูกออกซิเดชันที่ผิวน้อยลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งแตกต่างจากผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้องที่มีพื้นที่ผิวสูง (10 – 30 เมช) [11-13]



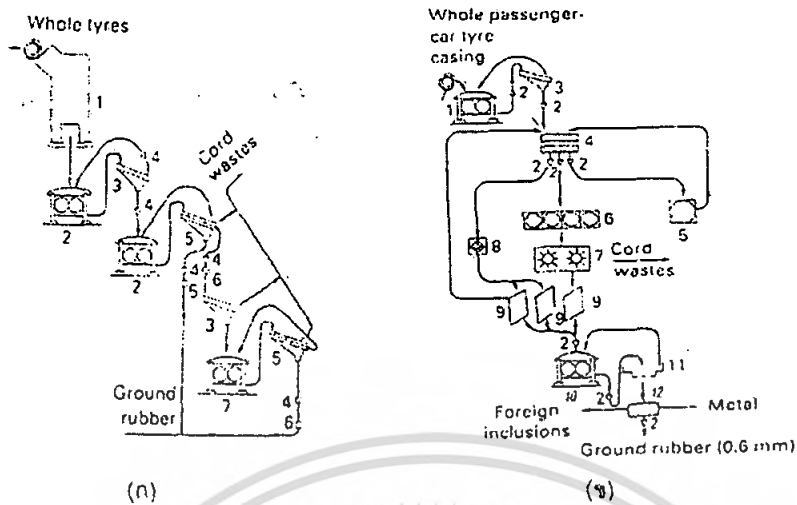
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการบดยางที่อุณหภูมิต่ำ [11-13]

#### 2.4.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding)

การบดที่อุณหภูมิห้อง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

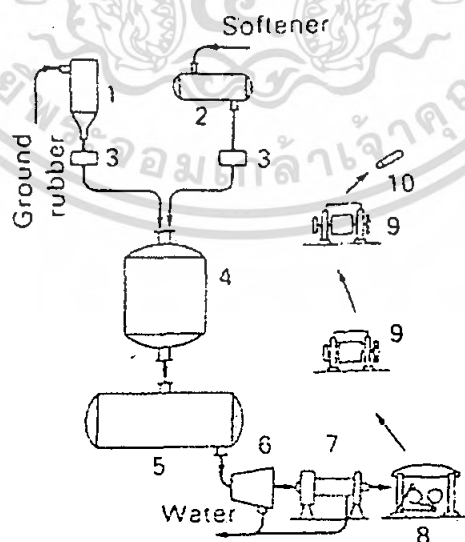
1. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (Dry ambient grinding) การผลิตจะทำโดยนำยางที่เกิดการเชื่อมโยงแล้ว บดด้วยเครื่องบดฟันปลา (Serrated grinder) ได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ประมาณ 10 – 30 เมช และเกิดกึ่ง (Pendant) ขึ้นที่ผิวจำนวนหนึ่งทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับยางดิบได้ดี ส่วนใหญ่ใช้ในยางล้อและผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 5 – 20 phr เมื่อขนาดอนุภาคผงยางเพิ่มขึ้น ความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์จะลดลง ถึงแม้จะมีชื่อตามวิธีการผลิตว่า "การบดที่อุณหภูมิห้อง" แต่ในทางปฏิบัติจะให้ความร้อนในระหว่างการผลิต การให้ความร้อนสูงจะทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการสลายตัว [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง [14]

2. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก (Wet ambient grinding) เป็นวิธีที่ปรับปรุงการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง ซึ่งลดขนาดอนุภาคผงยางโดยการบดในน้ำ ขนาดอนุภาคขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการบด อนุภาคผงยางที่ได้มีขนาด 400 – 500 เมช ข้อดีของขนาดอนุภาคเล็กคือทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการอัดรีดและการรีดแผ่นมีผิวเรียบ [14]

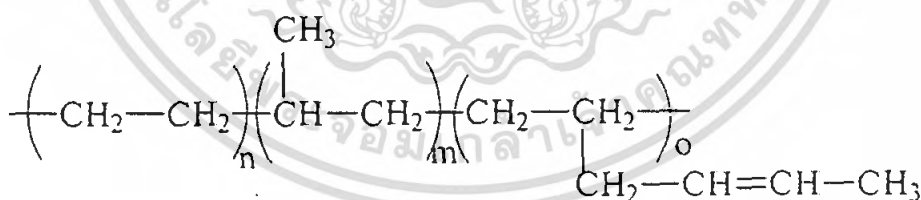


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการบดที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ยางเอทิลีนพรอพิลีน (Ethylene-Propylene Rubber, EPM and EPDM)

ยางเอทิลีนพรอพิลีน มี 2 ชนิดคือ ยางอีพีเอ็ม (EPM) และยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) โดย "EPDM" นั้น อักษร "E" มาจาก เอทิลีน (Ethylene) อักษร "P" มาจาก พรอพิลีน (Propylene) อักษร "M" มาจาก ท้ายชื่อใช้เรียกกลุ่มยางที่มีโครงสร้างหลักเหมือนพอลิเมทิลีน อักษร "D" มาจาก "Diene" ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่สามในโครงสร้างทำให้เกิดความไม่อิมตัวในโครงสร้าง เป็นโครงสร้างที่ใส่ขึ้นเพื่อช่วยให้ง่ายในการเชื่อมโยง เนื่องจากยาง EPM อิมตัว ไม่มีพันธะคู่ ดังนั้นจึงไม่สามารถเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur, S) เหมือนยางทั่ว ๆ ไป จึงต้องเชื่อมโยงด้วยสารประเภท เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งแพง ยุ่งยาก ซ้ำ และไม่สะดวกในการผลิต ดังนั้นจึงมีการใส่มอนอเมอร์ชนิดที่สามประเภทไดอีนชนิดไม่คอนจูเกต (Nonconjugated diene) ที่มีพันธะคู่สองพันธะที่ไม่สลับกัน การที่มีพันธะคู่สองพันธะเมื่อใช้พันธะหนึ่งในการพอลิเมอร์ไรส์เกิดพอลิเมอร์ร่วมกันยังเหลือพันธะคู่ที่ไม่อิมตัวอีกหนึ่งพันธะอยู่ "ภายนอก" สายโซ่หลัก ทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมชนิดที่สาม (Terpolymer) ในปริมาณเล็กน้อยในโครงสร้างเป็นโครงสร้างที่ไม่อิมตัวดังรูปที่ 2.9 ให้เป็นตำแหน่งเชื่อมโยง (Crosslinking sites) ของยาง EPDM สามารถเชื่อมโยงด้วยกำมะถันเหมือนกับยางชนิดอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่อิมตัวนี้ไม่ได้อยู่ภายในสายโซ่หลัก (Polymer backbone) แต่อยู่ที่หมู่ข้าง (Side groups) ดังนั้นยางชนิดนี้จึงยังคงมีความทนทานต่อโอโซน และดินฟ้าอากาศดีเช่นเดียวกับยาง EPM [5]



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ EPDM [5]

## 2.6 เครื่องอัดรีดสำหรับยาง (Rubber Extruder) [11-13]

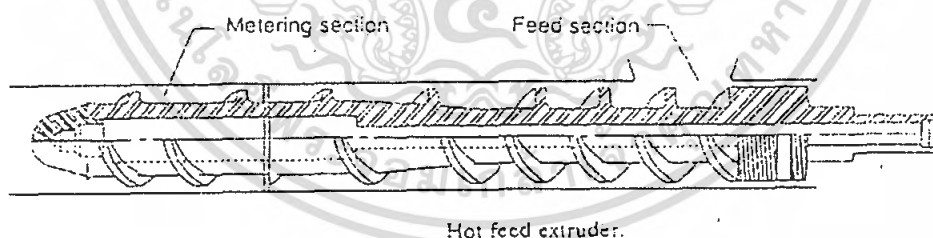
เครื่องอัดรีดสำหรับยางเป็นเครื่องมือที่ผลักยางหรือดันยาง ให้ผ่านช่องแฉกแม่แบบ (Die) เพื่อให้ได้ยางที่มีรูปร่างตาม Die ซึ่งเครื่องอัดรีดสำหรับยางจะเป็นแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเท่านั้น และมักจะออกแบบให้ยาวกว่าเครื่องอัดรีดประเภทอื่น

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดรีด คือ

1. ครอบใส่เกลียวหนอน (Barrel) ทำหน้าที่อุ่นยางให้มีอุณหภูมิตามต้องการโดยมีการหล่อ น้ำ ไขมัน หรือก๊าซของเหลวอื่น เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิตามต้องการได้ การป้อนยาง เข้าไปในครอบจะต้องสม่ำเสมอ เพื่อให้ยางถูกอัดรีดออกมาได้สม่ำเสมอ ขนาดของยางหรือความกว้างของแถบยางเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดการป้อนยาง การเพิ่มขนาดของยางเข้ามากเกินไปเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งเครื่องจะเกิดการอุดตัน (Choke) ตรงส่วนเข้าได้ ทำให้การส่งยางเข้าเกลียวหนอนขาดตอน ทำให้ผลิตได้ไม่สม่ำเสมอ

2. เกลียวหนอน (Screw) ทำหน้าที่ส่งผ่านยางเข้าไปในเครื่องเกลียวหนอนมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L:D) ตามชนิดของเครื่องคือ

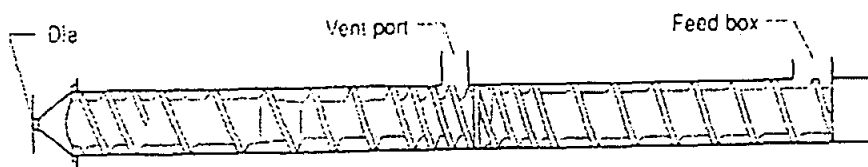
- Hot feed extruder เป็นเครื่องอัดรีดแบบป้อนยางในขณะร้อน (ใช้ยางที่ออกจากเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งในขณะร้อน) มี L:D เท่ากับ 4:1 – 6:1 แสดงดังรูปที่ 2.10 [13]



รูปที่ 2.10 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางร้อน (Hot feed extruder) [13]

- Cold feed extruder เป็นเครื่องอัดรีดแบบป้อนยางในขณะเย็น มี L:D เท่ากับ 10:1-15:1 ใช้สำหรับการป้อนยางเย็น ซึ่งต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องมือถูกกว่า การควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นดีกว่า และค่าแรงงานลดลง เมื่อเทียบกับ Hot feed extruder แสดงดังรูป 2.11 [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางเย็น (Cold feed extruder) [13]

เกลียวหนอนสำหรับยางจะมีร่องลึก (flight depth) ประมาณ  $1:6D - 1:10D$  ร่องยิ่งตื้นยิ่งทำให้ยางสามารถรับความร้อนจากกระบอกได้ง่ายและมีแรงเฉือนเกิดขึ้นสูง ถ้าตื้นเกินไปอาจทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงก่อนกำหนด (Scorch) ในกระบอกได้ง่าย ไม่เหมือนกับเกลียวหนอนของเครื่องอัดรีดพลาสติก ซึ่งมีร่องลึกประมาณ  $1:10D - 1:30D$  เพื่อให้ถ่ายเทความร้อนได้ดีและไม่เกิดการเชื่อมโยงก่อนกำหนด

3. ช่องแคบแม่แบบหรือตาย (Die) เป็นส่วนที่กำหนดรูปร่างของยางที่อัดรีดออกมา โดยยางที่ถูกอัดรีดออกมาอาจมีการขยายตัวมากกว่า Die เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Die swell ซึ่งสามารถควบคุมให้ Die swell ลดลงได้โดย

- ลดอัตราความเร็วในการอัดรีด
- เพิ่มอุณหภูมิของยาง
- เพิ่มความยาวของ Die
- เพิ่มความเร็วในการดึงยางออกจากเครื่องอัดรีด

ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอัดรีด จะต้องมีการเผื่อขนาดของ Die ให้เล็กกว่าผลิตภัณฑ์ รวมทั้งอาจต้องเปลี่ยนรูปทรงของ Die เพื่อชดเชยปรากฏการณ์ Die swell

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Balogh G. และ Samay G. (1996) [16] ศึกษาการนำยางล้อรถที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เป็นส่วนผสมในการทำยางด้านข้าง (Sidewall) และหน้ายาง (Tread) ของล้อรถบรรทุก ชนิดของยางที่ศึกษา คือ IR:SBR และ BR:SBR ส่วนยางล้อรถที่ใช้แล้วที่นำมาศึกษามี 3 ชนิด คือ ผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ยางรีเคลมที่เตรียมโดยวิธีการคัดแยก (Classical method) และผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณที่ใช้พบว่าผงยางทุกชนิดทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าการไม่ใส่ผงยาง โดยที่การใช้ยางรีเคลมปริมาณน้อย จะทำให้ยางมี

สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ ส่วนการใช้ผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยงในปริมาณมากจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ปริมาณน้อย

Kowalska E. และ Wielgosz.Z (1997) [17] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนและผงยาง โดยใส่สารให้ฟองและสารช่วยผสม ผ่านกระบวนการอัดรีดที่มีหัวแม่แบบชนิดพิเศษ (Specially designed head) พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของท่อลดลง ส่วนสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและสมบัติเชิงกลจะลดลง จากการศึกษาการซึมผ่านของน้ำ พบว่าความดันน้ำเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมอัตราการซึมผ่านของน้ำ และอัตราการซึมผ่านของน้ำจะแปรผกผันกับความยาวท่อ เนื่องจากความดันน้ำจะลดลงตามความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 35 เป็นร้อยละ 40 อัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนที่ปริมาณพอลิเอทิลีนร้อยละ 45 อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง แต่สูงกว่าที่ปริมาณพอลิเอทิลีนร้อยละ 35

ชลดา เลวิช และสาโรช ช่างชุม (1998) [18] ศึกษาชนิดและปริมาณสารให้ฟอง และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Kicker) ในยางพบว่าสารให้ฟอง Azodicarbonamide (AZ) มีอุณหภูมิการสลายตัวสูง คือ ประมาณ 190 – 240 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงได้โดยการใช้ AZ ร่วมกับสารให้ฟองชนิดอื่นที่มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า และการใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยา AZ ร่วมกับสารให้ฟอง Dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT) และ p,p' - Oxybis (benzenesulfohydrazide) (OBSH) จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงมาอยู่ที่ 150 – 180 องศาเซลเซียส และ 120 – 135 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่ปริมาณก๊าซลดลงเล็กน้อยส่วนการใช้คิกเกอร์จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเหลือประมาณ 130 – 145 องศาเซลเซียส แต่ปริมาณก๊าซลดลงอย่างชัดเจน เมื่อศึกษาการขยายตัวของยางโดยใช้เครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) การขยายตัวของยาง นอกจากจะขึ้นกับปริมาณก๊าซที่ได้จากสารให้ฟอง ยังขึ้นกับความหนืด และการเชื่อมโยงของยาง

Han M.H. (1998) [19] ศึกษาสมบัติของผงยางรถยนต์กับยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) โดยศึกษาอุณหภูมิของการผสม ลักษณะผิว ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติทางกายภาพ ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยการอัดแบบ พบว่าอุณหภูมิของการผสมยางกับผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการผสมยางกับสารเสริมแรง (Reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ การใส่ผงยางรถยนต์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยงเนื่องจากกำมะถัน (Sulfur) และสารเร่ง (Accelerator) การกระจายไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สม่าเสมอที่วัฏภาคของยางกับผงยางรถยนต์ เมื่อขนาดและปริมาณของผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดิ่งลดลง ขณะที่ผิวของคอมโพสิตจะมีความหยาบเพิ่มขึ้นทั้งก่อนและหลังการเชื่อมโยง เมื่อพิจารณาลักษณะการขาดของชิ้นงานทดสอบโดยวิธีดึง พบว่าจะเริ่มต้นขาดที่วัฏภาคของยางกับผงยางรถยนต์ ขณะที่การขยายรอยแตกของการทดสอบการหักงอจะถูกขัดขวางโดยผงยางรถยนต์

ดาริน นิลทรงกลด (1999) [20] ศึกษาการเตรียมยางไมโครเซลลูลาร์จากยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D 1056, Type 2 ; Class A โดยใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางสไตรีนบิวตะไดอิน สารให้ฟองที่ศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่ Uniform<sup>®</sup> AZ-H40 (AZODICARBONAMIDE) Open cell<sup>®</sup> - 100 และ Supercell<sup>®</sup> -D 80 (Dinitrosopentamethylene tetramine) และ Porofor<sup>®</sup> TSHPLV (Benzenesulfohydrazide) และ สำหรับสภาวะการผลิตที่ศึกษา ได้แก่ สูตรยาง อุณหภูมิ เวลา ปริมาณยางที่ใส่ในแม่แบบ วิธีการเชื่อมโยงและอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และยางสไตรีนบิวตะไดอิน พบว่าสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับการผลิตยางฟองคือ การเชื่อมโยงโดยใช้เครื่องอัดแบบชั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณยาง 3 : 4 ของแม่แบบ ส่วนสูตรที่เหมาะสมในการผลิตคือ สูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตะไดอิน 100:0 โดยใช้สารให้ฟอง Uniform<sup>®</sup> AZ-H40 Open cell<sup>®</sup> - 100 และ Supercell<sup>®</sup> -D 80 และสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และยางสไตรีนบิวตะไดอิน 90 :10 โดยใช้สารให้ฟอง Supercell<sup>®</sup> -D 80

เบญจวรรณ ชนะเจริญวิทย์ และคณะ (1999) [21] ศึกษาสมบัติของท่อน้ำซึมหรือวัสดุที่มีรูพรุนเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางเกษตร ซึ่งทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาค GRT และใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง โดยทำการศึกษาดัชนีที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ อัตราส่วนของ GRT : LDPE และผลของปริมาณ AZ วัสดุถูกผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวแล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ GRT และ AZ ในวัสดุจะให้ผลคล้ายกันคือ มีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง และอัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีค่าลดลง จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุ พบว่าการเพิ่มปริมาณ GRT ไม่มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิการตกผลึกเปลี่ยนแปลง แต่มีผลทำให้ปริมาณองศาความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า GRT และ LDPE สามารถยึดติดกันได้ดีรูพรุนของวัสดุเกิดจากช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อนของผงยาง GRT และฟองก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของ AZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลชิต บัวแก้ว และคณะ (2000) [22] ศึกษาการผลิตท่อน้ำหนักจากยางธรรมชาติ และยางรีเคลม จากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (ยางไนไตรล์/ยางคลอโรพรีน) ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำให้ยางคงรูปโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยศึกษาผลของชนิด และปริมาณสารเพิ่มเนื้อ (Filler) ต่อสมบัติของยาง พบว่าการใช้ซิลิกา (Silica) เป็นสารเพิ่มเนื้อ ทำให้ท่อมีความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ดี ที่ปริมาณซิลิกา 50 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (Phr) ท่อจะทรงตัวดี จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณยางรีเคลม ต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ พบว่าปริมาณยางรีเคลมน้อยกว่า 60 phr น้ำไม่สามารถซึมผ่านท่อได้ เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำจะสูงขึ้น และเมื่อใช้ขนาดอนุภาคยางรีเคลมเล็กลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น

ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลป์ชำนาญ (2000) [23] ศึกษาปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง อัตราส่วนที่ใช้คือ GRT : LDPE : AZ เท่ากับ 60 : 40 : 3 ขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยการอัดแบบขึ้นรูป พบว่าการใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 30 เมช จะทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และค่าพลังงานที่ทำให้แตกหักสูงขึ้น เมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP และสารช่วยผสม (PE-g-MA) จะทำให้ร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง แต่อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง

คนันพร สวัสดิ์ชุมพล และคณะ (2001) [24] ศึกษาการผลิตและสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยใช้สารให้ฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเทคนิคการอัดรีด พบว่า อัตราส่วน GRT : LDPE : AZ เท่ากับ 70 : 30 : 7 จะทำให้สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วงที่ต้องการ เมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP และสารช่วยผสม PE-g-MA จะทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง ส่วนการเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาสารให้ฟอง จะทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง สำหรับอัตราส่วน GRT : LDPE : PE-g-MA : DCP ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมและใช้งานเป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางการเกษตรคือ 70 : 30 : 7 : 4 : 0.5 โดยให้อัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 0.32-0.45 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร ที่ความดัน 6-12 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล (2001) [ 25 ] ศึกษาการผลิตและสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง พบว่าสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ ใช้เวลาในการอัดแบบ 5 นาที ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มปริมาณผงยาง GRT ในวัสดุพบว่า สมบัติเชิงกลของ GRT : HDPE มีแนวโน้มลดลง อัตราส่วน GRT : HDPE ที่เหมาะสมคือ 60 : 40 เมื่อเพิ่มปริมาณ AZ จะทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น แต่จะทำให้สมบัติบางประการเพิ่มขึ้น เช่น ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และอัตราการซึมผ่านของน้ำ เมื่อใช้ขนาดอนุภาคผงยาง GRT เล็กลง พบว่าวัสดุมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่มีการซึมผ่านของน้ำลดลงจากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเพิ่มขึ้น แต่มีร้อยละการยืด ณ จุดขาดและปริมาณการซึมผ่านของน้ำลดลงจากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า GRT และ HDPE สามารถผสมเข้ากันได้ดี มีลักษณะเป็นรูพรุนจากฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง AZ และช่องว่างระหว่างอนุภาค GRT การซึมผ่านของแผ่นน้ำซึม GRT:HDPE:AZ อัตราส่วน 60 : 40 : 80 จะให้อัตราการซึมผ่านของน้ำ 24-25 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นท่อน้ำซึม

บริษัท FARU ( 2001) [26] ได้คิดค้นเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการใช้ล้อยางรถยนต์เก่ามาใช้ให้เป็นประโยชน์ โดยนำผงยางรถยนต์ (GRT) มาผสมกับพอลิพรอพิลีน (PP) เรียกวัสดุใหม่นี้ว่า Elastomeric alloy (EA) มีสมบัติเหมือนยางแต่สามารถถูกแปรรูปได้เหมือนเทอร์โมพลาสติกสามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายเพราะสามารถเติมสารเติมแต่งได้หลายชนิด เป็นที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำกันชน เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้ผงยางรถยนต์ได้หลายขนาด นอกจากนี้ยังมีการทำ Revulcon<sup>®</sup> หรือขยะของยางที่ถูกแปรรูปกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกรรมวิธีการปรับสภาพทางเครื่องกลที่ไม่มีสารเคมีใดๆเพิ่มเติม และยางที่บดจะทำการเชื่อมโยงใหม่ได้ (Revulcanized) และหลอมเหลวในแม่แบบได้ ไม่ว่าจะขยะยางนั้นจะอยู่ในช่วงขนาดอนุภาคเท่าใดและสามารถผสมกับพลาสติกต่าง ๆ ขยะพลาสติกและผสมกับยางพอลิเมออร์ผสมที่เกิดจากยางใหม่ในสัดส่วนที่มากกว่าเม็ดยางที่ไม่ได้ปรับสภาพโดยยังคงคุณภาพไว้

กัญญาณี แสงเกียรติยุทธ (2002) [27] ศึกษาหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ (GRT) กับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง ไดออกทิลพทาเลต (DOP) เป็นพลาสติกไซเซออร์ และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าการเติมซิงค์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการสลายตัวของสารให้ฟอง อัตราส่วนวัตถุดิบและสภาวะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมคือ GRT : PVC : AZ : DOP เท่ากับ 60 : 40 : 14 : 40 ที่อุณหภูมิการอัดรีด 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที โดยท่อน้ำซึมที่ได้มีความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด ความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดัน  $5 \times 10^{-3}$  MPa เท่ากับ 1.13 MPa , 21.85% , 10.41 MPa , 76 (Shore A) , 0.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ 8.95 ลิตรต่อชั่วโมงต่อเมตร ตามลำดับ

Sombatsompop N. และ Kumnuantip C. (2002) [28] ศึกษาผลของการเติมยางรีเคลม จากบริเวณหน้ายางต่อสมบัติของยางธรรมชาติ 2 ชนิด โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณของยางรีเคลม และเวลาบดย่อย โดยสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ สมบัติการไหล ลักษณะเฉพาะของการเชื่อมโยงยาง (Cure Characteristics) สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล พบว่า ความหนืดมูนิ และความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม แต่ลดลงขึ้นอยู่กับเวลาบดย่อย โดยยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารประกอบ เพื่อให้เหมาะสมกับการบดย่อย และปริมาณของยางรีเคลม จากการศึกษ Die swell พบว่าขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลมมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ จากการศึกษ้อัตราการเชื่อมโยง และเวลาเริ่มเชื่อมโยง พบว่าเพิ่มขึ้นและลดลง ขึ้นกับปริมาณของยางรีเคลม สำหรับยางที่เชื่อมโยง (Vulcanized rubbers) พบว่า มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้น ความแข็งกด และความร้อนสะสม ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม แต่ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงต่อการฉีกขาด ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม การศึกษาสมบัติการไหลและลักษณะเฉพาะของการเชื่อมโยง (Unvulcanized rubbers) พบว่าไม่ได้ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ในทางตรงกันข้ามยางที่ผ่านการเชื่อมโยง พบว่าสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density)

ศุภโชค อุ่นทรัพย์เจริญ และสมบุรณ์ แซ่ตั้ง (2003) [29] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านของท่อน้ำซึม (Porous pipe) ที่ผลิตจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิพรอพิลีน (PP) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง และพอลิพรอพิลีนตอกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (PP - g - MA) เป็นสารช่วยผสม โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง GRT : PP ปริมาณสารให้ฟอง ปริมาณสารช่วยผสม ชนิดของเมตริกซ์ ได้แก่ PP เกรด P 401S (MFI 2.4 กรัมต่อ 10 นาที) และ PP เกรด P 840J (MFI 40 กรัมต่อ 10 นาที) ทำการผสม และนำไปอัดรีดรูปท่อ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว พบว่าสมบัติเชิงกลของ GRT : PP ความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกด มีแนวโน้มลดลง แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของ GRT : PP ที่เหมาะสมเท่ากับ 60 : 40 เมื่อเพิ่มปริมาณของสารให้ฟองในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัลด์ พบว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ มีความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกด มีค่าสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของค่าความเป็นผลึก และอัตราการซีมน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ PP-g-MA ในวัลด์พบว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ มีความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกด มีค่าสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง เมื่อดัชนีการไหลของเมตริกซ์เพิ่มขึ้น พบว่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกดมีค่าสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และอัตราการซีมน้ำมีค่าลดลง จากการศึกษาสัณฐานวิทยา โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง ทำให้มีปริมาณรูพรุนมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมและเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่มีดัชนีการไหลต่ำลง ทำให้มีปริมาณของรูพรุนลดลง

สุมนา แจ่มเหมือน (2003) [30] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซีมที่เตรียมจากยางธรรมชาติ (Natural rubber ,NR) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (Dinitrosopentamethylene tetramine, DNPT) เป็นสารให้ฟอง และสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และทำให้เกิดการเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อนด้วยเครื่องอบความร้อน (Hot air oven) โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซีม ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง ปริมาณเคมีดำ ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และผงยางรถยนต์ ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ และความยาวท่อพบว่าอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมคือ การเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณเคมีดำพบว่า ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง คือ ปริมาณเคมีดำ 50 phr ส่วนความหนืดมูนนี่ มอดุลัส ความแข็งแรง และความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเคมีดำ เมื่อปริมาณ GRT เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง พบว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาค GRT เล็กลง สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอัตราการซีมน้ำลดลง เมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการซีมน้ำแต่ละตำแหน่งของท่อมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จากการศึกษาพบว่าการผลิตท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR : GRT : DNPT : CB เท่ากับ 40 : 60 : 3 : 50 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี (ความแข็งแรงดึง 4.8 MPa) อัตราการซีมน้ำเหมาะสมกับการใช้งานในด้านเกษตรกรรม และมีต้นทุนการผลิตประมาณ 79 บาทต่อกิโลกรัม (สามารถผลิตท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ได้ยาวประมาณ 7.3 เมตร)

วศิน จิรไพศาลกุล และคณะ (2004) [31] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซีมที่เตรียมจากยางรีเคลม (Reclaimed rubber) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (Dinitrosopentamethylene tetramine, DNPT) เป็นสารให้ฟองและสารประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง ทำการผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบความร้อน ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสโดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ ปริมาณเขม่าดำ ปริมาณสารให้ฟอง รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำ ความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีจุดสูงสุดที่ปริมาณเขม่าดำรวม 70 phr จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง ความแข็งแรงฉีกขาด และร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ส่วนความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกัน และอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยางรีเคดลอม : ผงยางรถยนต์ : เขม่าดำ เท่ากับ 50 : 50 : 20 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 2 และ 3 ที่เวลาเชื่อมโยง 60 40 และ 20 นาที ตามลำดับ มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกัน มีต้นทุนการผลิตต่ำคือ 18.18 13.40 และ 9.51 บาทต่อหนึ่งเมตร

เจน สุชาภิรมย์ (2002) [32] ได้ศึกษาการขึ้นรูปท่อน้ำซึมจากผงยางที่ใช้แล้วกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยใช้ไดออกทิลพาทาเลต (Diocetyl Phthalate, DOP) เป็นพลาสติกไซเซออร์เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง Normal Lead Stearate เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและสารหล่อลื่นภายนอก Tribasic Lead Sulphate เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน Loxiol G60 เป็นสารหล่อลื่นภายใน ผู้วิจัยออกแบบและสร้างหัวตายอุปกรณ์ปรับขนาดท่อ และระบบหล่อเย็นเพื่อใช้กับเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ขนาดสกรู 50 มิลลิเมตร พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปที่อ่านจากตัวควบคุมอุณหภูมิ คือ 160 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วต่อพีวีซี คือ 40/60 ปริมาณไดออกทิลพาทาเลตขึ้นกับความยืดหยุ่นและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ต้องการ ปริมาณเอโซไดคาร์โบนาไมด์ 5 phr ท่อน้ำซึมจากสูตรที่ 4 มีค่าความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูงสุดที่สุด คือ  $2.14 \pm 0.056$  MPa และ  $20.34 \pm 4.22$  MPa ตามลำดับ ท่อน้ำซึมจากสูตรผสมที่ 5 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงสุดที่สุด คือ  $30.88 \pm 1.508$  % อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดัน 0.05 บาร์ ของท่อน้ำซึมจากสูตรที่ 4, สูตรที่ 5 และสูตรที่ 6 เท่ากับ 35.2, 0.3 และ 10.8 ลิตรต่อชั่วโมง-เมตร ตามลำดับ

M. Teeluck และ B.G. Sutton (1998) [33] ศึกษาลักษณะการชลประทานของท่อน้ำซึม โดยทำการขึ้นรูปท่อน้ำซึมที่เตรียมได้จากยางรถยนต์ (GRT) โดยศึกษาประสิทธิภาพการซึมผ่านของน้ำในการชลประทาน โดยควบคุมรูพรุนในกระบวนการผลิต โดยนำท่อที่มีความยาวต่อเนื่อง 6 เมตรไปวางทดสอบในสนามหญ้า ทดสอบที่ความดัน 10 และ 20 kPa และทดสอบเวลาการปล่อยน้ำ การเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกของท่อเกิดจากกระบวนการผลิตตั้งแต่เริ่มต้นไม่ว่าจะกรองที่รูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด 5 หรือ 50  $\mu\text{m}$ . ในการผลิตไม่ได้มีความแตกต่างกันแต่อย่างใดในการปล่อยน้ำออกมา การทดสอบที่ออกมาแสดงให้เห็นว่าแม้แต่การกรอง ค่าของ coefficient ของการแปรปรวน (CV) สรุปว่าผลิตภัณฑ์ไม่ครอบครองลักษณะการซึมผ่านน้ำไม่ว่าความยาวจะเปลี่ยนไป และไม่มีการปรับปรุงการซึมผ่านน้ำของท่ออย่างกับเวลา

Zhugue YuPing และคณะ (2004) [34] ศึกษาเรื่องความลึกของการวางท่อน้ำซึมในการประพาดการเพาะปลูกมะเขือเทศในอาคารที่เก็บแสงอาทิตย์โดยเพาะปลูกมะเขือเทศไว้ในอาคารที่มีแสงอาทิตย์ส่องผ่าน และศึกษา ผลกระทบของความลึกที่เปลือกของผลไม้ที่เป็นหนาม ความแตกต่างของท่อน้ำซึมใต้ดินที่ใช้สำหรับ subsurface ไหลเป็นหยดการชลประทาน (SDI) บนดิน ให้น้ำแล้วดูการเจริญเติบโตและผลผลิตที่ได้จากต้นมะเขือเทศ ที่ความลึกของท่อน้ำซึม 20 (T20), 30 (T30), และ 40 cm (T40), ความลึกที่ได้ผิวตอนจะประยุกต์ใช้กับการชลประทาน ผลที่ได้ที่ T30 บริเวณที่มีน้ำรากของต้นมะเขือเทศมีการเจริญเติบโตขึ้นปานกลาง ดินอุดมสมบูรณ์กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ T20 และ T40 ที่ T30 รากจะมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ต้นมะเขือเทศมีความสูงมากขึ้น ออกผลิตผลได้มาก สรุปที่ความลึก 30 เซนติเมตรเหมาะสมที่สุดในการชลประทานแบบไหลหยด

Bullnet Hydroponic Supplies Site [35] ท่อน้ำซึมที่ทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพที่ 0.5 บาร์ น้ำจะขยายเข้าไปเต็มท่อที่ 2 ถึง 4 ลิตรต่อชั่วโมง ที่ความยาวท่อประมาณ 50 เมตร ในความลึก 30-45 เซนติเมตร น้ำจะซึมผ่านออกตามรูพรุนของท่อไปสู่พื้นดิน

Porous Pipe Limited [36] นำท่อน้ำซึมที่ถูกผลิตขึ้นจากยางรถยนต์ที่คืนสภาพ มาถูกแปรรูปให้กลายเป็นท่อน้ำซึม ใช้ในการปลูกพืชผัก ใช้น้ำน้อยกว่ารดน้ำกว่าปกติประมาณ 50% ใช้ได้ทั้งบนดินและฝังกลบไว้ใต้ดิน ใช้ได้ง่าย มีความทนทานและอายุการใช้งานสูง

Porous Pipe Plot Irrigation [37] โดยท่อน้ำซึมที่ได้จากการแปรรูปยางรถยนต์ เมื่อนำมาใช้ในสวนหลังบ้านแล้ว น้ำจะไหลออกจากท่อเป็นหยดๆ เป็นการให้น้ำแก่รากโดยตรง ป้องกันการพังทลายของดิน เหมาะแก่การใช้ความดันต่ำในการให้น้ำ ท่อน้ำซึมสามารถวางได้ทั้งบนดินโดยแสงแดดจะไม่ทำลายท่อ เพราะว่ามีร่มเงาของต้นไม้ปิดบังแสงแดดไว้ และสามารถฝังกลบไว้ใต้ดินได้ ซึ่งจะให้น้ำได้ทั่วถึง ราคาถูก ช่วยประหยัดค่าน้ำ ประหยัดเวลา และประหยัดน้ำอีกด้วย

ไพจิตร ตรีภาณุจนวนันท์ และคณะ (2005) [38] ทำโครงการพิเศษนี้เพื่อทำการศึกษสมบัติบางประการของท่อน้ำซีเมนต์ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็มและผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้ Supercell<sup>®</sup> DPT เป็นสารให้ฟองและสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง แล้วทำการขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบความร้อน โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซีเมนต์ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม และผงยางรถยนต์ ปริมาณกำมะถัน ปริมาณเขม่าดำที่เวลาเชื่อมโยงต่างๆกัน รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อยางน้ำซีเมนต์ที่ศึกษาได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยาและอัตราการซึมผ่านของน้ำ จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณ GRT เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันมากขึ้น สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและอัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งที่ปริมาณกำมะถัน 2.5 phr แล้วลดลง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำสมบัติบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วลดลง จากการศึกษาการผลิตท่อน้ำซีเมนต์พบว่าท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:EPDM:GRT:S:CB เท่ากับ 25 : 25 : 50 : 2.5 : 40 ที่เวลาเชื่อมโยงเท่ากับ 30 นาทีมีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีและมีต้นทุนการผลิตประมาณ 151 บาทต่อกิโลกรัม หรือ 33.4 บาทต่อเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพอลิเมอร์ที่นำมาจากยางธรรมชาติ (NR) ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) และผงยางรถยนต์ (GRT) ซึ่งทำการศึกษาถึงผลของความหนาที่มีต่อสมบัติเชิงกล แรงดันน้ำ ผลของการซึมผ่านของน้ำ ความดันลด (Pressure drop) และปริมาณสารให้ฟอง โดยมีการดำเนินงาน ดังนี้

ตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางแผ่นรมควันชั้น 3 ยางอีพดีเอ็ม ผงยางรถยนต์ และสารเติมแต่งต่าง ๆ ตามสูตรที่กำหนด ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิห้อง

ตอนที่ 2 ทำการขึ้นรูปยางผสมสูตรให้มีลักษณะเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ที่อุณหภูมิประมาณ 80 – 90 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 30 รอบต่อนาที

ตอนที่ 3 ทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยเครื่องอบความร้อน ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

ตอนที่ 4 ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

#### การศึกษาสมบัติเชิงกล

- ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการยืด ณ จุดขาด
- ความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์

#### การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่น
- ความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

#### การศึกษาสัณฐานวิทยา

- ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฟองอากาศ

#### การศึกษ้อัตราการซึมผ่านของน้ำ

- ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50

บาร์

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (Ribbed Smoked Sheets, RSS) ศูนย์วิจัยยางฉะเชิงเทรา สถาบันวิจัยยาง

2. ยางอีพดีเอ็ม (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM) เกรดการค้า MITSU EPT® 3045 บริษัท Onix Limited Co., Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติบางประการของ EPDM มีดังนี้

- ความหนืดมูนนี่ [ML 1+4(100 °C)] = 40
- ปริมาณ Ethylene = 56.5
- ปริมาณ Diene (ENE) = 4.5
- Total volatiles = 0.2

3. ผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) ขนาด 30 เมช ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด

4. สารตัวเติมเขม่าดำ (Carbon black) ชนิด FEF (N550) เกรดการค้า
5. สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) กำมะถัน (Sulfur, S) เกรดการค้า
6. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) เกรดการค้า

- N- Cyclohexylbenzothiazole - 2 - Sulfenamide (CBS)
- Tetramethylthiuram disulfide (TMTD)

7. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) เกรดการค้า

- Zinc oxide (ZnO)
- Stearic acid

8. สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aide) น้ำมันแนพทานิก (Naphthanic oil) เกรดการค้า

9. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants หรือ Age - Resistors) เกรดการค้า

- สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidation) N - (1,3 - Dimethylbutyl) - N - phenyl - p - phenylene diamine (6PPD) บริษัท โคซัน (ประเทศไทย) จำกัด
- สารป้องกันโอโซน (Antiozonant) ซีผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax)

10. สารให้ฟอง (Blowing agents) ไดไนโตรโซเพนตะเมทิลินเตตระมีน (Dinitroso pentamethylene tetramine ,DPT)

11. สารกระตุ้นสารให้ฟอง (Zicker) ชนิดยูเรีย (Urea) ชื่อการค้า Unipaste - N3<sup>™</sup>

บริษัท Dongjin Chemical สมบัติบางประการของสารกระตุ้นสารให้ฟอง ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยูเรียที่ใช้ในงานวิจัย

| สมบัติ                      | ค่าที่ได้                         |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| ชื่อทางการค้า               | Unipaste-N3 <sup>®</sup>          |
| สูตรเคมี                    | CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> |
| ลักษณะ                      | ผงสีขาว                           |
| อุณหภูมิที่ละลายตัว (°C)    | 132 - 138                         |
| ปริมาณก๊าซ (ml/g, ที่ 15°C) | 120 - 130                         |
| ปริมาณความชื้น (%)          | ไม่เกิน 0.3                       |

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) รุ่น LRM 200 บริษัท Lab Technology Engineering จำกัด
2. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) บริษัท Exterder Farrel
3. เครื่องอบความร้อน (Hot air oven) รุ่น F 400 บริษัท Binder
4. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) รุ่น LS 5K บริษัท Lloyd Instruments
5. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) บริษัท Intro Enterprise จำกัด
6. เครื่องทดสอบความหนาแน่น รุ่น EW-120SG บริษัท Mirage Trading
7. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone test chamber) รุ่น 703 บริษัท Hampden
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น LEO 1450VP บริษัท LEO จำกัด
9. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ
10. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้ความดันลม รุ่น Torino บริษัท Ceast

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### ตอนที่ 1 การบดผสมยาง

1. ชั่งยางและสารเติมแต่งต่าง ๆ ตามสูตรที่กำหนด ดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. บดยางแผ่นรมควัน และยางอีพีดีเอ็ม ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกิ้งที่อุณหภูมิห้อง จนยางทั้งสองผสมกันและพันรอบลูกกิ้ง โดยปรับระยะห่างระหว่างลูกกิ้งประมาณ 3.0 มิลลิเมตร (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที)
3. เติมน้ำมันเนพทานิกและเซมาดำ โดยปรับระยะห่างระหว่างลูกกิ้งประมาณ 0.5 มิลลิเมตร (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 5 นาที)
4. เติม ZnO และ Stearic acid (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติม 6PPD (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 2 นาที)
5. เติมผงยางรถยนต์ครั้งละประมาณ 1 ใน 4 ของทั้งหมดโดยปรับระยะห่างระหว่างลูกกิ้งประมาณ 1.0 มิลลิเมตร (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 3 นาที)
6. เติม Petroleum wax, TMTD และ CBS (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 1 นาที)
7. เติม ยูเรีย (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติมกำมะถัน (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 3 นาที)
8. เติม DPT (ใช้เวลาในการผสมประมาณ 1 นาที) จากนั้นมีวนพับยางออกมาแล้วใส่มีวนยางเข้าไปผสมใน Two roll mill อีกครั้ง (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) โดยระยะห่างระหว่างลูกกิ้งประมาณ 2.5 มิลลิเมตร
9. รีดยางให้เป็นแผ่น แล้วจึงทำการตัดยางให้เป็นแผ่นยาวโดยมีความกว้างประมาณ 2-4 เซนติเมตร ทิ้งให้เย็นก่อนนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

#### ตอนที่ 2 การขึ้นรูปเป็นท่อ

ทำการขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 3.1

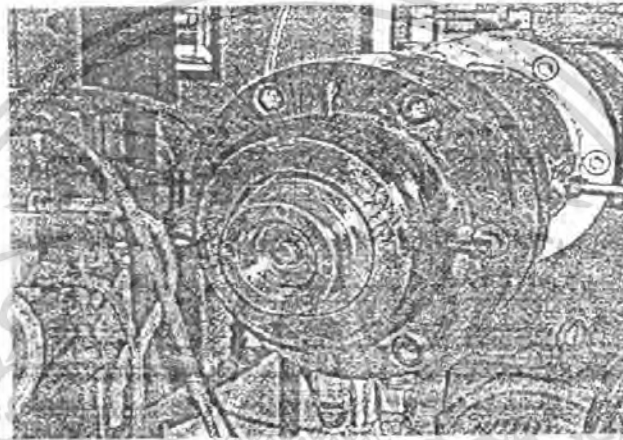


รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดของเครื่องเกลียวหนอนเดี่ยวที่ใช้มีดังนี้

- ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L:D) = 12.1
- เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diameter of screw) = 3.81 มิลลิเมตร
- เส้นศูนย์กลางของร่องลึกสกรู (Diameter screw clearance) = 0.13 – 0.20 มิลลิเมตร
- ความเร็วของสกรู (Screw speed) = 18 - 78 รอบต่อนาที
- ดाय (Die) มีลักษณะเป็นวงกลม 2 อันซ้อนกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 และ 18 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะของตาย (Die)

ปรับสภาวะต่าง ๆ เครื่องเกลียวหนอนเดี่ยว ดังนี้

- อุณหภูมิของสกรู (Screw) ครอบอกใส่สกรู (Barrel) และอุณหภูมิของตาย (Die) ที่ 90 องศาเซลเซียส
- ความเร็วสกรู 30 รอบต่อนาที

การขึ้นรูปท่อจะทำโดยนำยางผสมสูตรที่ตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 2-4 เซนติเมตร ป้อนเข้าในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ยางที่ออกจากหัวตายจะมีลักษณะเป็นท่อ โดยจะต้องนำแกนเหล็กยาวมารองรับ เพื่อสวมท่อที่ได้ออกมาจากหัวตายไม่ให้เกิดการยุบตัวเสียรูปทรง จากนั้นทำการปรับความหนาของท่อโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกจะคงที่มีค่าเท่ากับ 21 mm และปรับขนาดให้เล็กลงโดยทำการปรับหัวตาย(Die)ให้ยื่นออกมาด้านนอกเล็กน้อยเพื่อให้ได้ท่อบางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 17 mm. และท่อหนาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 16 mm, แล้วทำตามขั้นตอนข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตอนที่ 3 การเชื่อมโยงท่ออย่าง

นำท่อที่ได้จากตอนที่ 2 มาทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วจึงถอดแกนเหล็กออกจะได้ท่อที่มีรูปทรงเป็นท่อที่ไม่เกิดการยุบตัว

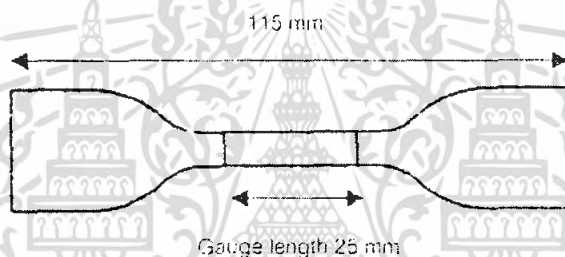
### ตอนที่ 4 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ

#### 1. การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [33]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- ทำการตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อ
- นำท่อที่ตัดตามยาวมาตัดเป็นชิ้นงานที่จะนำไปทดสอบเป็นรูปตาย C (Die C) คือเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ตายซี (Die C) ตามมาตรฐาน ASTM D 412 [33]

วิธีการทดสอบ

- ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ (Load cell) ขนาด 5000 นิวตัน และใช้อัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่ออนาที เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) , มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์ (M100) , มอดุลัสที่ 200 เปอร์เซนต์ (M200) และร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)

- นำค่าที่ได้ไปหาเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่าง 6 ชิ้น

#### 2. การทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์

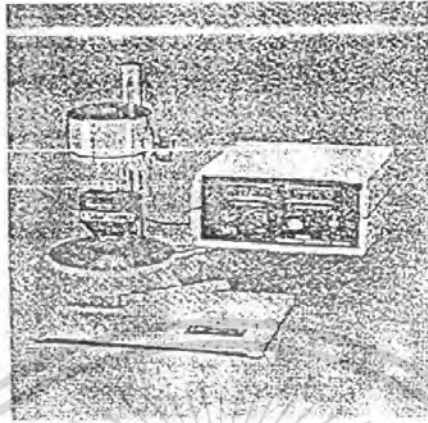
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [36]

วิธีการทดสอบ

- ทำการทดสอบด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิด ชอร์ เอ (Shore A durometer) โดยนำชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงจำนวน 3 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) วางซ้อนทับกันบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนทดสอบ จากนั้นโยกคานด้านล่างให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indentor) เป็นเวลา 1 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์ชนิด ชอร์ เอ [30]

### 3. การทดสอบความหนาแน่น

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- ทำการตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่น (Electronic densimeter) แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบความหนาแน่น

### วิธีการทดสอบ

- ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบทั้งในอากาศ และในน้ำ เครื่องจะคำนวณค่าความหนาแน่นให้อัตโนมัติ โดยใช้หลักของการแทนที่น้ำ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของโรงเรียนเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความถ่วงจำเพาะ

$$(\text{Specific gravity}) = W/(W-W_1)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

$W_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการหาค่าโดยประมาณ จะได้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับความหนาแน่น

### 4. การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

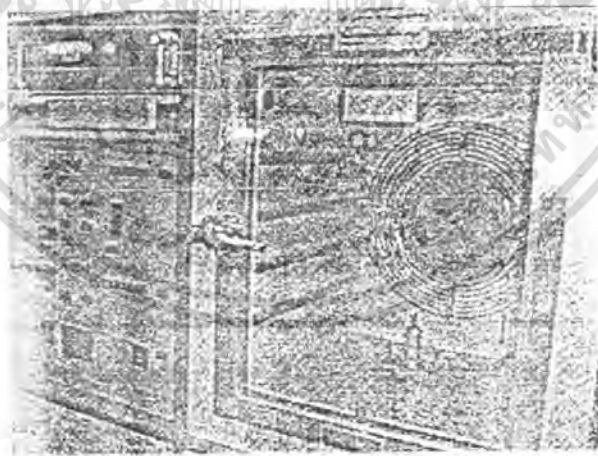
มาตรฐานการทดสอบ ISO 1431/1-1980(E) [37]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- ตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ

- ยึดปลายทั้ง 2 ข้างของชิ้นงานทดสอบด้วยที่จับ
- ทำการยืดชิ้นงานทดสอบ 20% แล้วนำไปไว้ในที่มืดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- เมื่อครบกำหนดจึงนำเข้าตู้อบโอโซนที่มีความเข้มข้นของโอโซน 25 pphm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance) [31]

จากนั้นทำการตรวจวัดรอยแตกของชิ้นงาน ทดสอบด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 7 เท่า การรายงานผล แสดงดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.2 การรายงานผลของลักษณะรอยแตก [38]

| จำนวนรอยแตก              | ขนาดและความลึกของรอยแตก   |
|--------------------------|---|
| A. รอยแตกจำนวนน้อย       | 1. ไม่สามารถเห็นรอยแตกด้วยตาเปล่า แต่สามารถเห็นรอยแตกด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 10 เท่า |
| B. รอยแตกจำนวนมาก        | 2. สามารถเห็นรอยแตกด้วยตาเปล่า  |
| C. รอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน | 3. ความยาวและความลึกของรอยแตกต่ำกว่า 1-3 มิลลิเมตร                                      |
|                          | 4. ความยาว และความลึกของรอยแตก 1-3 มิลลิเมตร  |
|                          | 5. ความยาวและความลึกของรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร หรือขึ้นทดสอบขาด                       |

#### 5. การศึกษาสัณฐานวิทยา

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

- ทำการตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก
- นำชิ้นงานทดสอบแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 30 นาที จากนั้นทำการหักชิ้นงาน

ทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) เพื่อให้ชิ้นงานเรียบขึ้น ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ทดสอบได้ชัดเจน

วิธีการทดสอบ

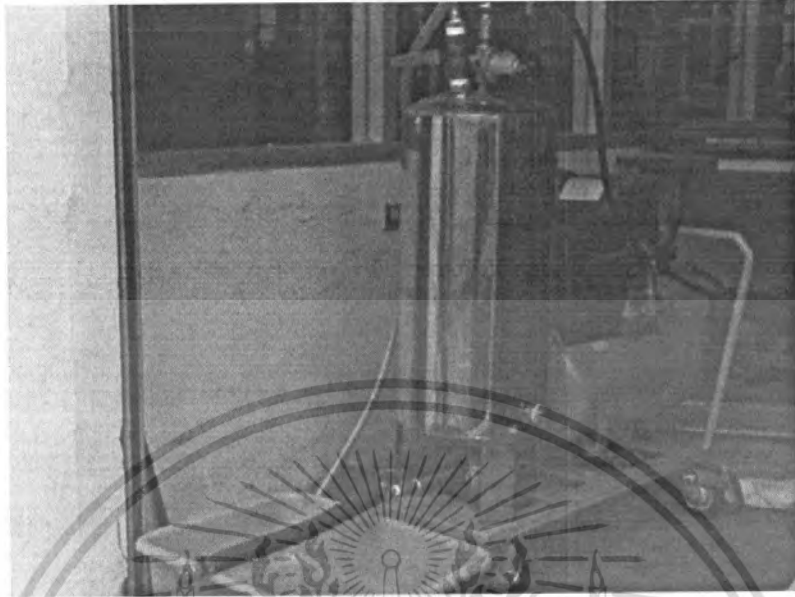
- ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่บริเวณผิวที่ทำการหัก เพื่อศึกษาขนาด, รูปร่าง และความหนาแน่นของฟองอากาศ

#### 6. การทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ

วิธีการทดสอบ

- นำท่ออย่างที่มีความยาว 30 เซนติเมตร มาทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeation rate) ที่ความดันต่างๆ คือ 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 บาร์ โดยใช้เวลาทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที รายงานผลในรูปของปริมาตรการซึมผ่านของน้ำต่อเวลาต่อความยาวท่อ (l/h/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการผลิตของท่อน้ำซึม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ในการศึกษา

| องค์ประกอบ                        | ศึกษาอัตราส่วน RSS 3 : EPDM            |               |                                    |               |
|-----------------------------------|--|---------------|------------------------------------|---------------|
|                                   | สูตร 1                                 |               | สูตร 2                             |               |
|                                   | ปริมาณ<br>(ส่วนในร้อยละ<br>ส่วนของยาง) | ปริมาณ (กรัม) | ปริมาณ<br>(ส่วนในร้อยละ<br>ของยาง) | ปริมาณ (กรัม) |
| RSS 3                             | 80                                     | 560.2         | 70                                 | 491.6         |
| EPDM (Nordel IP<br>4570)          | 20                                     | 140.8         | 30                                 | 210.6         |
| GRT (30 mesh)                     | 150                                    | 1050.3        | 150                                | 1050.1        |
| Carbon black<br>(N550)            | 50                                     | 350.8         | 50                                 | 350.5         |
| DPT(Supercel <sup>®</sup><br>DPT) | 10                                     | 70.0          | 10                                 | 70.3          |
| Urea                              | 10                                     | 70.2          | 10                                 | 70.0          |
| ZnO                               | 5                                      | 35.0          | 5                                  | 35.3          |
| Stearic acid                      | 2                                      | 14.3          | 2                                  | 14.0          |
| Wax                               | 2                                      | 14.0          | 2                                  | 14.0          |
| Napthanic oil                     | 5                                      | 37.2          | 5                                  | 35.2          |
| 6PPD                              | 1                                      | 7.5           | 1                                  | 7.3           |
| CBS                               | 1                                      | 7.2           | 1                                  | 7.0           |
| TMTD                              | 0.5                                    | 3.5           | 0.5                                | 3.6           |
| S                                 | 2.5                                    | 17.6          | 2.5                                | 17.7          |

หมายเหตุ : อัตราส่วนของยางต่อผงยางรถยนต์เป็น 40:60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และอภิปรายผล

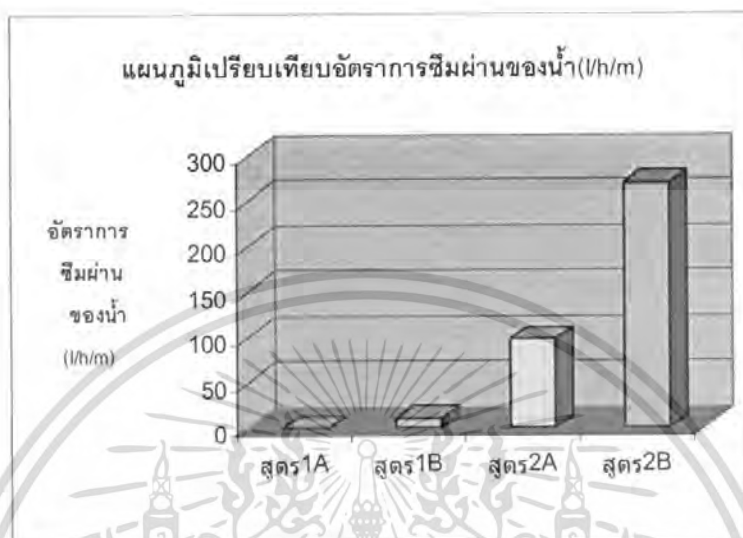
โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติ ผสมกับยางอีพีดีเอ็ม (NR/EPDM) และผงยางรถยนต์ (GRT) โดยเน้นศึกษาผลของความหนาของท่อและศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพีดีเอ็ม (NR/EPDM) โดยในการศึกษาจะทำการขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และทำการทดสอบสมบัติต่างๆของท่อน้ำซึม ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ล้วนฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

#### 4.1 การศึกษาความหนาที่มีผลต่อท่อน้ำซึม

ในกระบวนการขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึม ด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ความหนาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งการนำไปใช้งานจะมีประสิทธิภาพที่ดีนั้น จะต้องมีความหนาที่เหมาะสม ในการเลือกความหนาดังกล่าวนี้ถึงจะนำไปใช้งาน ในกรณีท่อใต้ดิน ท่อน้ำซึมที่เหมาะสมจะมีความหนามาก เนื่องจากการใช้งานของท่อใต้ดินจะนำท่อน้ำซึมไปฝังไว้ใต้ดิน ดังนั้นท่อน้ำซึมที่จะนำไปใช้งานต้องมีความหนามากพอที่จะรับน้ำหนักของดิน สำหรับท่อบนดินท่อน้ำซึมที่จะนำไปใช้งาน ไม่จำเป็นต้องมีความหนามาก เนื่องจากการใช้งานบนดินไม่จำเป็นต้องรับน้ำหนักของดิน แต่ท่อน้ำซึมบนดินจะต้องทนต่อแสงแดด เพราะท่อน้ำซึมบนดินนั้นจะได้รับแสงโดยตรง เมื่อท่อได้รับแสงเป็นเวลานานๆอาจทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานลดน้อยลง อย่างไรก็ตาม ในการผลิตเชิงพาณิชย์ต้องการให้ท่อน้ำซึมหนาน้อยที่สุด เพื่อให้ใช้วัตถุดิบน้อยหรือผลิตได้ท่อที่มีความยาวมากขึ้น หรือต้นทุนการผลิตโดยเฉพาะวัตถุดิบน้อยที่สุด

จากการศึกษาโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาความหนาของท่อน้ำซึมชนิดใช้งานบนดิน โดยทำการขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) ด้วยความหนาที่แตกต่างกันคือ 3.3 และ 2.9 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยทำการศึกษาสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่าง NR/EPDM แตกต่างกันคือ 70:30 และ 80:20 ตามลำดับ นำท่อน้ำซึมที่ได้มาวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันเกจ (Gauge pressure) 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 บาร์ ตามลำดับ ผลของอัตราการซึมผ่านน้ำพบว่าเมื่อแรงดันมากขึ้น อัตราการซึมผ่านน้ำก็มากขึ้นตามลำดับ ท่อน้ำซึมที่มีความหนามากกว่าจะมีปริมาณการซึมผ่านของน้ำน้อยกว่าท่อน้ำซึมที่มีขนาดของท่อบาง เนื่องจากท่อน้ำซึมที่บางนั้นจะมีระยะขจัดน้อย ฟองก๊าซจึงสามารถหนีหลุดออกไปได้อย่างรวดเร็ว ท่อน้ำซึมที่ได้จึงเป็นรูปทรงที่มีลักษณะต่อเนื่องกัน (Opened cell) ท่อน้ำซึมที่ได้จึงมีความหนาแน่นมาก น้ำจึงสามารถซึมผ่านออกมาได้มาก ส่วนท่อน้ำซึมที่หนาจะมีระยะขจัดมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟองก๊าซบางส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปจะถูกกักอยู่ในเนื้อยางบริเวณผิวยาง รูปฟองที่ได้อาจมีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง มีลักษณะเป็นเซลล์ปิด (Closed cell) บางส่วน น้ำจึงไม่สามารถซึมออกไปได้ ท่อน้ำซึมจึงมีอัตราการซึมผ่านของน้ำในปริมาณที่น้อย



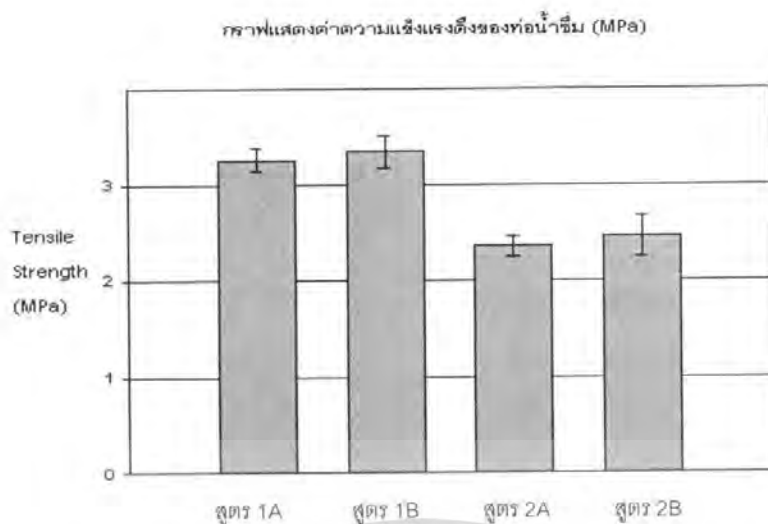
รูปที่ 4.1 แสดงอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึมสูตร 1 และสูตร 2 ที่มีความหนาแตกต่างกัน (สัญลักษณ์ A=ท่อน้ำ 3.3 มิลลิเมตร และ B=ท่อน้ำ 2.9 มิลลิเมตร)

#### 4.2 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม

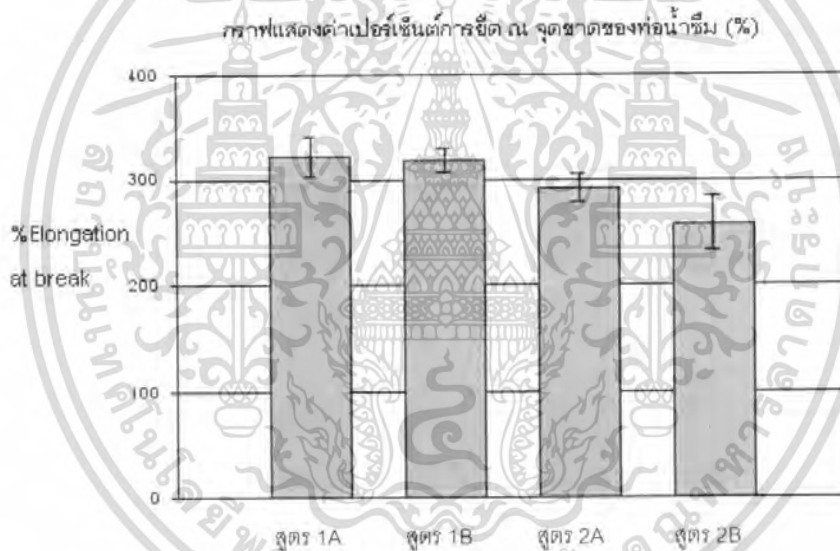
ในงานวิจัยนี้จะใช้ผงยางรถยนต์เป็นองค์ประกอบหลักและมียางธรรมชาติเป็นตัวเชื่อม (Binder) และใช้สารให้ฟอง DPT โดยอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการผลิต สมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านของน้ำ ดังนั้นจึงทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม เพื่อให้ได้ท่อน้ำซึมที่มีสมบัติที่ดี และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งาน

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติ : ยางอีพิตีเอ็ม (NR:EPDM) ที่ปริมาณ 80:20 และ 70:30 (สูตร 1 และ สูตร 2 ตามลำดับ) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 20 นาที ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม และผงยางรถยนต์ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ อัตราซึมผ่านของน้ำ และสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.2 – 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน (A=ท่อนหนา และ B=ท่อนบาง)

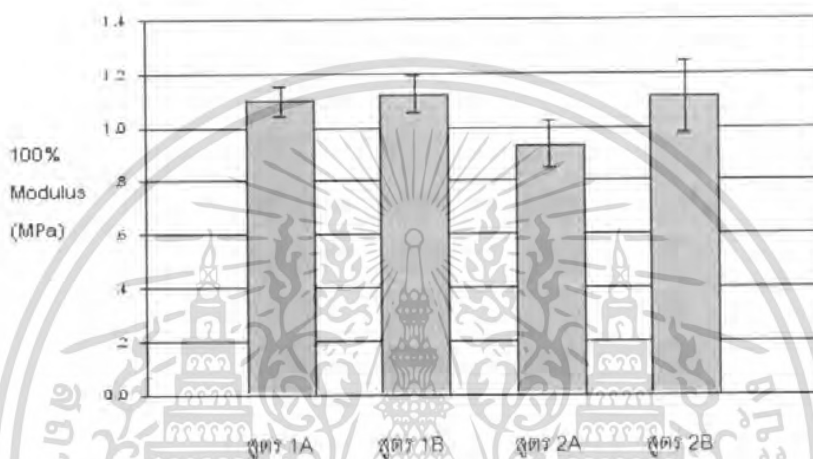


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน (A=ท่อนหนา และ B=ท่อนบาง)

จากรูปที่ 4.2-4.3 จะเห็นว่าอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติผสมยางอีพดีเอ็มและผงยางรถยนต์นั้น เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางอีพดีเอ็ม (NR/EPDM) ลดลงจาก 80 : 20 เป็น 70 : 30 ทำให้สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติและยางอีพดีเอ็มเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) และทำหน้าที่เป็นตัวยึด (Binder) เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความไม่อิมิตัว (มีโครงสร้างพันธะคู่) มากกว่าโครงสร้างโมเลกุลของยางอีพดีเอ็ม เป็นผลให้ความสามารถในการเกิดการเชื่อมโยงเอกซา (Crosslinking) ของยางธรรมชาติเกิดได้ง่ายกว่า และมีความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

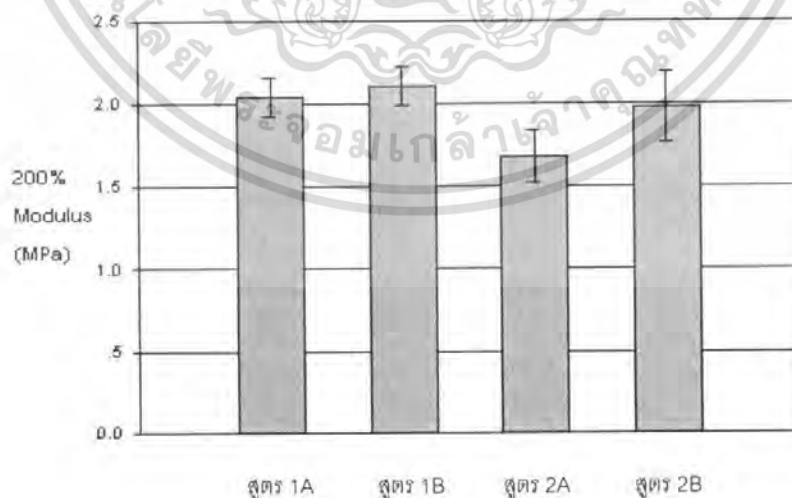
มากกว่ายางอีพีดีเอ็ม การลดปริมาณยางธรรมชาติและเพิ่มยางอีพีดีเอ็ม (จากสูตร 80:20 เป็น 70:30) คาดว่าทำให้เกิดการเชื่อมโยงของยางผสมน้อยลง ดังนั้นสูตร 80:20 ที่มีปริมาณยางธรรมชาติมากกว่าจึงมีค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงกว่า จึงทำให้สูตร 80:20 มีความแข็งแรงมากกว่า น้ำจึงมีโอกาสซึมผ่านได้น้อยลง ส่วนสูตร 70:30 ที่มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดน้อยนั้น เมื่อให้แรงดันเพิ่มมากขึ้นแรงดันจึงสามารถไปขยายรูพรุนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำจึงมีปริมาณมาก

ภาพแสดงค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของท่อน้ำซึม



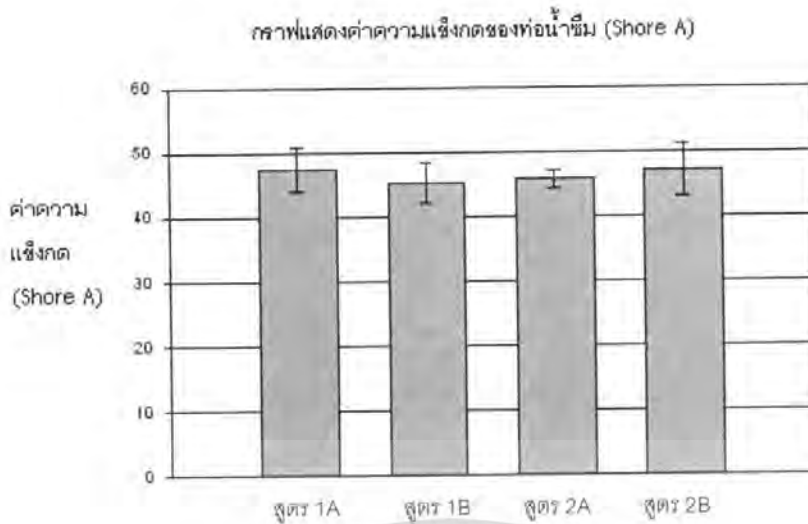
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (M100) ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน (A=ท่อนหนา และ B=ท่อนบาง)

ภาพแสดงค่ามอดูลัสที่ 200 เปอร์เซ็นต์ของท่อน้ำซึม



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 200 เปอร์เซ็นต์ (M200) ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน (A=ท่อนหนา และ B=ท่อนบาง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



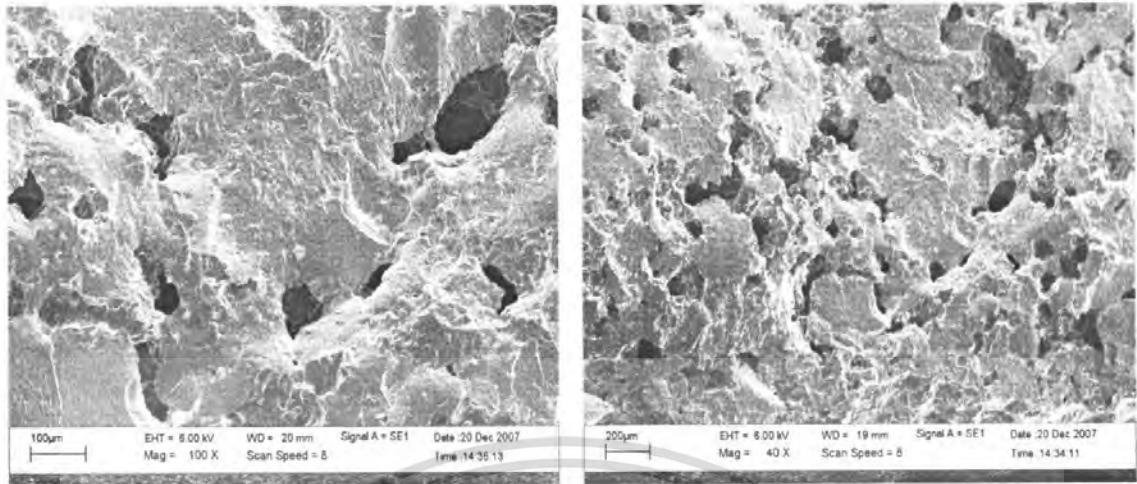
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน (A=ท่อน้ำ และ B=ท่อบาง)

จากรูปที่ 4.4 -4.6 เมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางอีพีดีเริ่มลดลงจาก 80 : 20 เป็น 70 : 30 ส่งผลให้ค่ามอดุลัสและความแข็งแรงกดลดลง เนื่องจากท่อที่มีความบางจะมีระยะทางการแพร่ของฟองอากาศน้อย ทำให้ฟองอากาศสามารถหายหลุดออกจากชิ้นงานได้มากจึงทำให้มีฟองอากาศหรือเกิดช่องว่างภายในชิ้นงานน้อย ส่งผลให้ความเป็นโพมน้อยลง จากงานวิจัยพบว่าค่ามอดุลัสที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความแข็งแรงกดที่ได้ก็อ้อมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลการทดสอบอาจเกิดจากบางจุดของท่อน้ำซึมมีการกระจายตัวของสารให้ฟองไม่สม่ำเสมอ โดยการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของสารให้ฟองอาจเป็นผลเนื่องมาจาก

- เครื่องผสมที่ใช้เป็นเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเครื่องผสมแบบเปิด ที่มีอัตราการให้แรงเฉือน (Shear rate) ต่ำซึ่งประสิทธิภาพในการผสมขึ้นอยู่กับผู้ผสมอย่างมาก และขึ้นกับเวลาที่ใช้ผสม

- มีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณมากอาจทำให้บางบริเวณมีการกระจายตัวของสารให้ฟอง DPT ไม่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 4.7

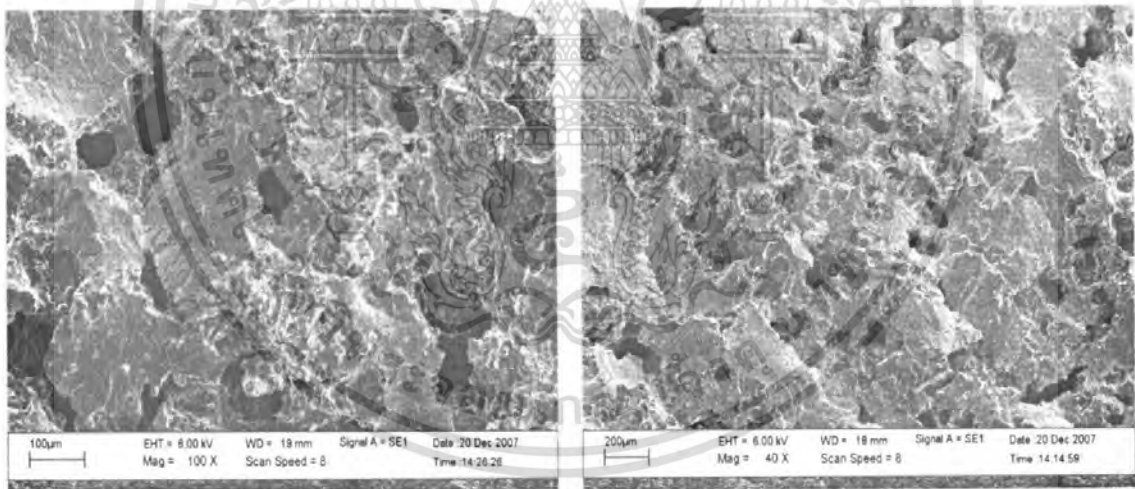
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.7 SEM Micrographs แสดงลักษณะวิทยาของฟองน้ำซีเมนต์แตกหักที่อุณหภูมิต่ำกำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 1A ประกอบด้วย NR:EPDM (80:20)

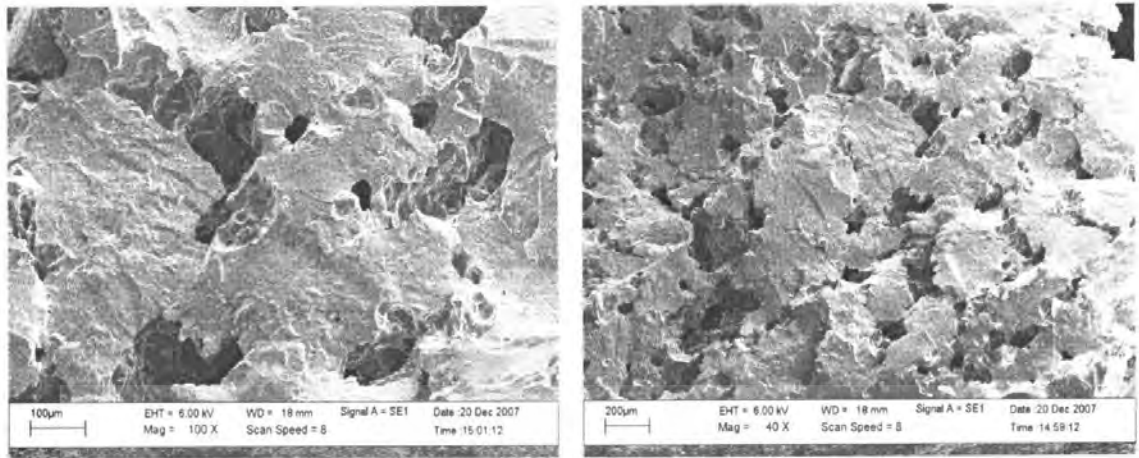


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 SEM Micrographs แสดงลักษณะวิทยาของฟองน้ำซีเมนต์แตกหักที่อุณหภูมิต่ำกำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 1B ประกอบด้วย NR:EPDM (80:20)

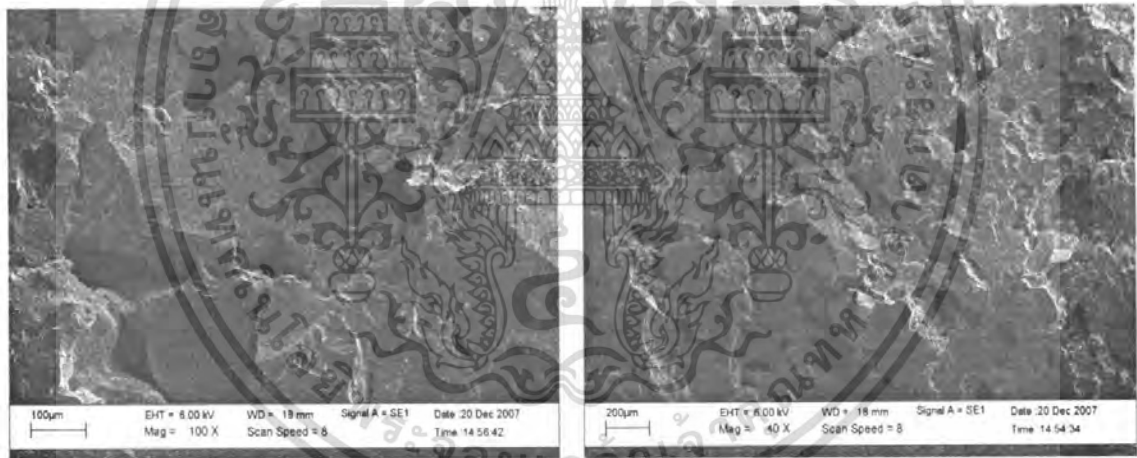
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 2A ประกอบด้วย NR:EPDM (70:30)



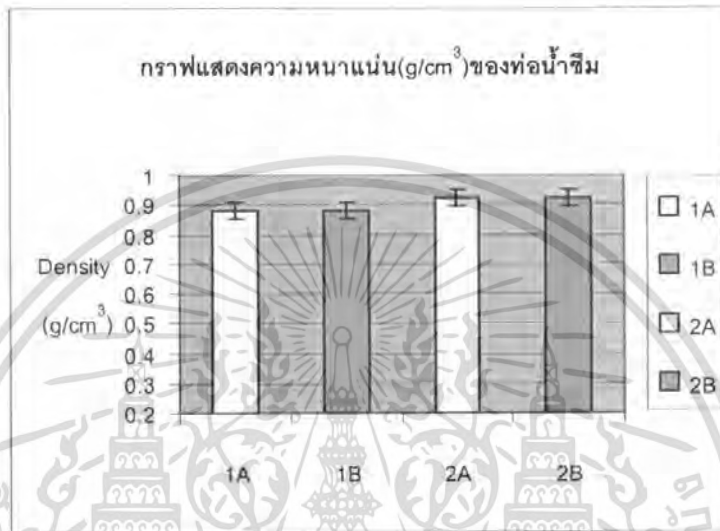
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.10 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิที่กำลังขยาย 100 เท่า (ก) และกำลังขยาย 40 เท่า (ข) ของสูตร 2B ประกอบด้วย NR:EPDM (70:30)

จากรูปที่ 4.7 – 4.10 แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติผสมยางอีพดีเอ็ม (80:20 และ 70:30) ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาทีพบว่า ช่องว่างของรูพรุนมีขนาดประมาณ 100-150 ไมโครเมตร การกระจายตัวของรูพรุนไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณที่ไม่มีสสารให้ฟอง DPT จะรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางธรรมชาติผสมยางอีพดีเอ็ม ผงยางรถยนต์ ซึ่งเกิดขึ้นจากขั้นตอนการบดผสม หรืออาจเป็นเพราะว่าบริเวณนั้นมีสสารให้ฟองกระจายตัวอยู่น้อย ซึ่งรูพรุนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

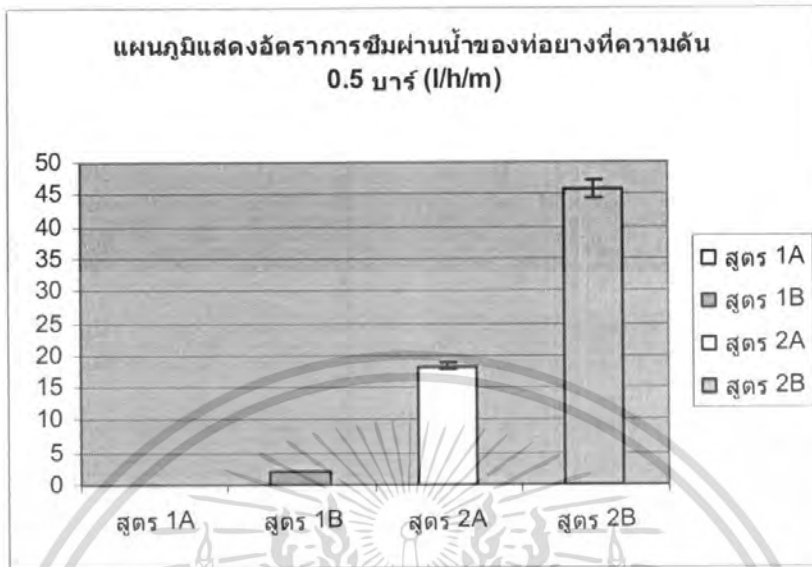
เกิดขึ้นมีน้อยมาก และยังเป็นรูพรุนไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากท่อที่มีความหนามากกว่าจะมีระยะขจัดมาก ส่งผลให้ฟองก๊าซบางส่วนของส่วนที่อยู่ลึกเข้าไปจะถูกกักอยู่ในเนื้ออย่างบริเวณผิวยาง รูพรุนที่ได้มีลักษณะที่ไม่ต่อเนื่อง มีลักษณะเป็นเซลล์ปิด น้ำจึงไม่สามารถซึมออกไปได้ ท่อน้ำซึมจึงมีอัตราการซึมผ่านของน้ำในปริมาณที่น้อยกว่าท่อน้ำซึมที่มีความหนาน้อยกว่า ท่อน้ำซึมที่บางนั้นจะมีระยะขจัดน้อย ฟองก๊าซจึงสามารถหนีหลุดออกไปได้อย่างรวดเร็ว ท่อน้ำซึมที่ได้จึงเป็นรูพรุนที่มีลักษณะต่อเนื่องกัน



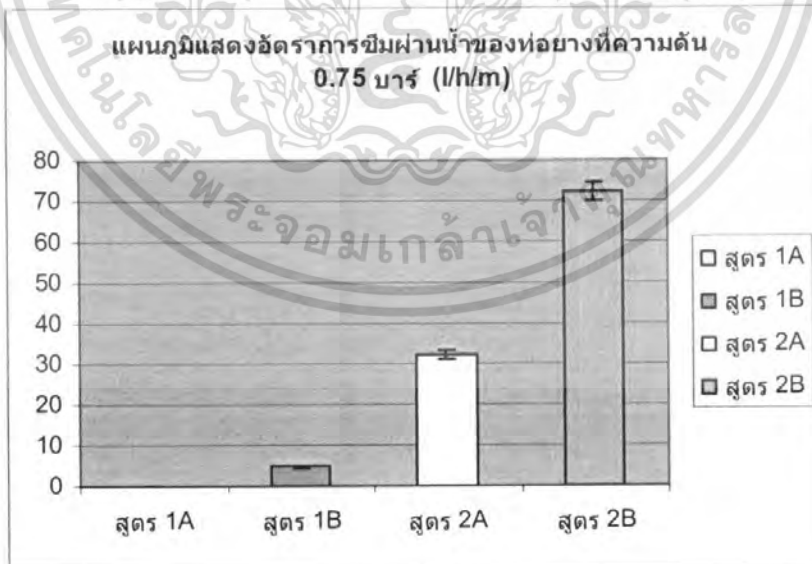
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน (A=ท่อนหนา และ B=ท่อนบาง)

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของท่อน้ำซึมสูตร 1 และสูตร 2 พบว่า ความหนาแน่นของท่อน้ำซึมมีค่าใกล้เคียงกันโดยความหนาแน่นมีค่าประมาณ 0.88 และ 0.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีรูพรุน คาดว่าสารให้ฟอง DPT เมื่อสลายตัวเป็นก๊าซจะทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นถูกดันเป็นช่องเปิด (Opened cell) ออกจากท่อโดยไม่เป็นฟองหรือช่องปิด (Closed cell) ภายในชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากสูตรยางที่ใช้มีปริมาณของเนื้อยางน้อย ผงยาง GRT มาก และปริมาณเคมีดำที่มาก จึงทำให้ท่ออย่างมีความแข็งที่มากขึ้นด้วย ฟองก๊าซจึงไม่สามารถขยายตัวออกเกิดเป็นรูพรุนหรือช่องว่างได้ แต่จะดันออกจากชิ้นงานตามช่องว่างระหว่างก้อนผงยาง GRT เกิดเป็นช่องเปิดให้น้ำไหลซึมออกได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

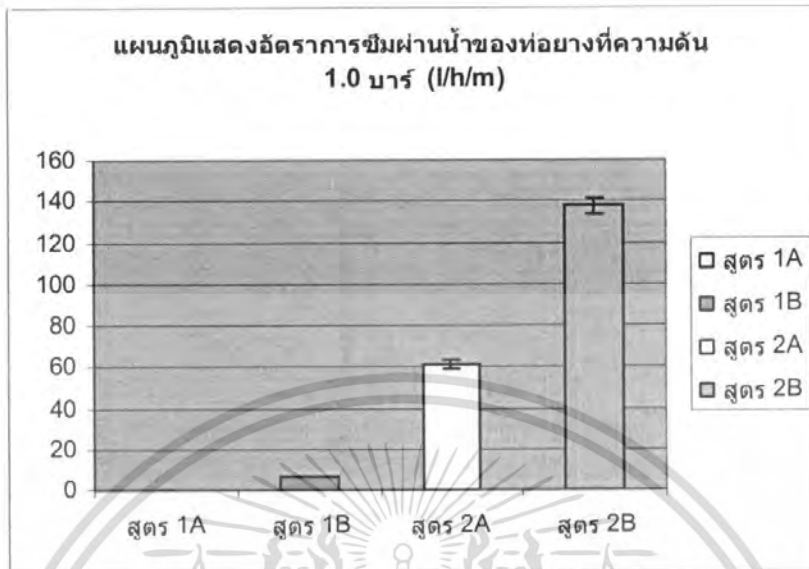


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5 บาร์ ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน

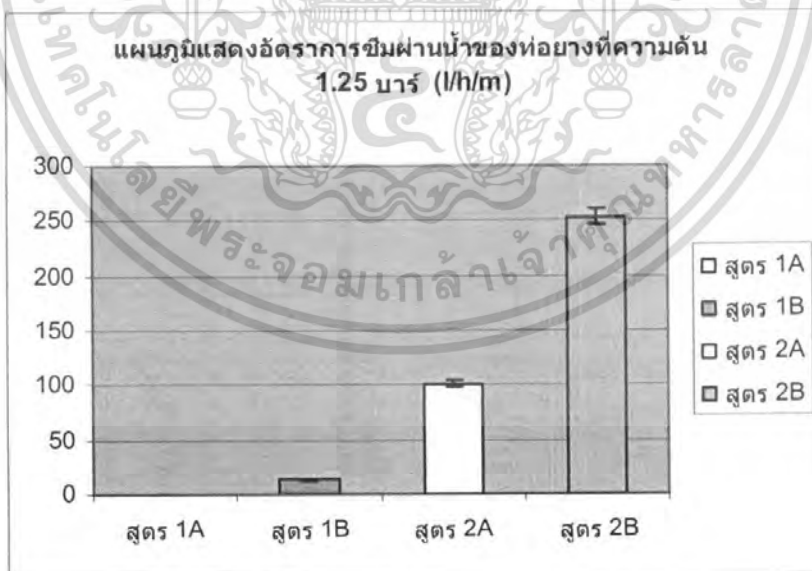


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.75 บาร์ ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

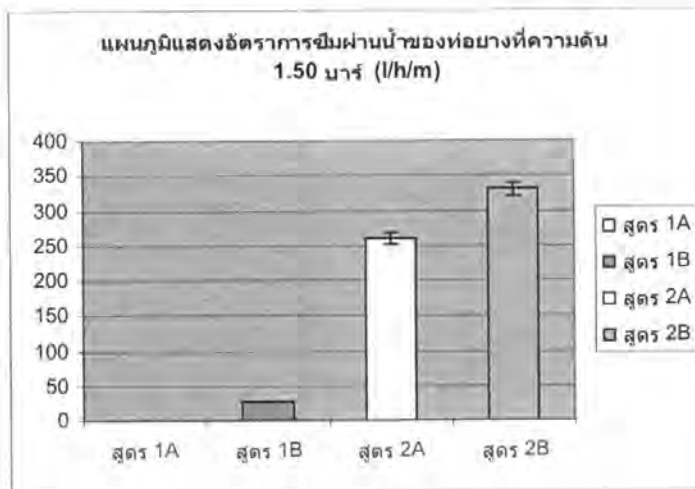


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 1.0 บาร์ ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 1.25 บาร์ ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.16** กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5 บาร์ ที่ประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM ที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.12-4.16 เมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติผสมยางอีพีดีเอ็ม (NR:EPDM) ลดลงจาก 80 : 20 เป็น 70 : 30 โดยสูตร 2 ซึ่งมีปริมาณยางอีพีดีเอ็มมากขึ้นทำให้โครงสร้างของยาง มีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างที่แข็งแรง สามารถเกิดผลึกได้ขณะดึงยืด มี น้ำหนักโมเลกุลสูง มีสายโซ่โมเลกุลยาว มีความแข็งแรง (Strength) มาก มีพันธะคู่ปริมาณมากบน สายโซ่หลักจึงเกิด Crosslink ได้มาก ส่วนยาง EPDM นั้นมีพันธะคู่อยู่น้อยกว่าจึงเกิดการเชื่อมโยงสู่ ยางธรรมชาติไม่ได้ จึงทำให้น้ำสามารถที่จะดันรูพรุนให้ขยายออกได้กว้างขึ้นที่ความดันเดียวกัน จึง ทำให้ได้อัตราการซึมผ่านที่สูงขึ้น ยิ่งความดันที่สูงขึ้นทำให้มีแรงที่จะดันให้รูพรุนขยายได้มากขึ้น ซึ่ง สามารถอธิบายได้จากผลของยางที่แตกต่างกันดังที่ได้อธิบายในก่อนหน้า

จากการทดสอบการซึมผ่านของน้ำโดยนำท่อน้ำซึมไปวัดการซึมผ่านของน้ำที่ความดัน 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 บาร์ตามลำดับพบว่า เมื่อให้แรงดันที่ 0.50 บาร์ สูตร 1A นั้นมีน้ำซึม ออกมาน้อยมากหรือไม่มีน้ำซึมออกมาเลย ในขณะที่สูตร 1B มีปริมาณน้ำออกมาเล็กน้อย และสูตรที่ 2A และ 2B นั้นมีปริมาณน้ำซึมออกมามาก และเมื่อให้แรงดันเพิ่มมากขึ้นเป็น 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 บาร์ตามลำดับพบว่า การซึมผ่านของน้ำมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแรงดันที่มากขึ้นส่งผล ให้รูพรุนขยายมากขึ้น จึงทำให้น้ำซึมออกมามาก จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าแรงดันที่เหมาะสมแก่ การใช้งานจริง คือ 0.50-0.75 บาร์ และการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมคือ 1-6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง ซึ่ง จากการทดลองการซึมผ่านของน้ำจากท่อที่ได้จากกระบวนการผลิตนั้นพบว่า ที่ความดัน 0.50-0.75 บาร์ สูตร 1B มีการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสม สำหรับสูตร 2 นั้นมีปริมาณน้ำออกมาเกินไป แรงดัน ที่เหมาะสมกับอัตราการซึมผ่านน้ำคือ 0.50-0.75 บาร์ โดยทางการค้าจะกำหนดให้อัตราการซึมผ่าน ของน้ำมีค่าประมาณ 0.50-1.00 บาร์ แต่ท่อน้ำซึมสามารถทนแรงดันได้สูงสุดดังแสดงในตารางที่ 4.1 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นแรงดันที่มากที่สุดที่ท่อน้ำซึมสามารถทนได้ หากเกินค่านี้ไปแล้วจะทำให้ท่อน้ำซึมเกิดการแตกหักเสียหายได้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงดันสูงสุดที่ท่อน้ำซึมสามารถรับได้

| สูตร                   | 1A   | 1B   | 2A   | 2B   |
|------------------------|------|------|------|------|
| ค่าแรงดันสูงสุด (บาร์) | 2.58 | 2.25 | 2.25 | 2.25 |

### 4.3 การศึกษาความต้านทานต่อโอโซน

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงสมบัติการนำท่อน้ำซึมไปใช้งานบนดิน ดังนั้นท่อน้ำซึมจึงต้องมีความต้านทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ และโอโซนได้ดี โดยท่อน้ำซึมที่ผลิตได้นั้นสามารถนำไปใช้งานกลางแจ้งได้เป็นอย่างดี เนื่องจาก EPDM ที่นำมาผสมเป็นพอลิเมอร์รวมซึ่งมีโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวไม่ได้อยู่ภายในสายโซ่หลัก แต่อยู่ที่โครงสร้างกิ่ง

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของความต้านทานต่อโอโซนของท่อน้ำซึมสูตร 1 (อัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM เป็น 80:20)

| NR:EPDM:GRT เป็น 80:20:150 phr | ความต้านทานต่อโอโซนที่ 50 pphm, 40 °C, ระยะเวลา 20 %, 72 h. |
|--------------------------------|---|
| สูตร 1A                        | เกิดรอยแตกจำนวนมากนับไม่ถ้วน<br>ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 mm   |
| สูตร 1B                        | เกิดรอยแตกจำนวนน้อย<br>ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 mm            |

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของความต้านทานต่อโอโซนของท่อน้ำซึมสูตร 2 (อัตราส่วนระหว่าง NR:EPDM เป็น 70:30)

| NR:EPDM:GRT เป็น 70:30:150 phr | ความต้านทานต่อโอโซนที่ 50 pphm, 40 °C, ระยะเวลา 20 %, 72 h. |
|--------------------------------|---|
| สูตร 2A                        | เกิดรอยแตกจำนวนมากนับไม่ถ้วน<br>ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 mm   |
| สูตร 2B                        | เกิดรอยแตกจำนวนน้อย<br>ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 mm            |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 – 4.3 แสดงผลการเปรียบเทียบความต้านทานต่อไอโซนของท่อน้ำซีมีที่มีปริมาณ EPDM ที่ต่างกัน ที่สภาวะ 50 pphm, 40 °C, ระยะยืด 20%, 72 hr พบว่า ท่อน้ำซีมีเกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 mm เนื่องจากการทดสอบนี้ทำการทดสอบที่สภาวะ 50 pphm ซึ่งเป็นสภาวะที่เข้มข้นเพื่อเป็นการเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของท่อน้ำซีมี เนื่องจากท่อน้ำซีมีที่เตรียมได้นั้นเป็นท่อน้ำซีมีชนิดบนดิน เมื่อนำไปใช้งานแล้วท่อน้ำซีมีนั้นอาจถูกแสงแดดทำให้ท่อน้ำซีมีเกิดการเสื่อมสภาพ โดยทั่วไปการใช้งานกลางแจ้งจะวัดความต้านทานต่อไอโซนที่สภาวะ 25 pphm และ 50 pphm ซึ่งถ้าทำการดัดยืดที่สภาวะต่ำกว่าที่ 25 pphm อาจเกิดรอยแตกบนชิ้นงานน้อยหรือไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น

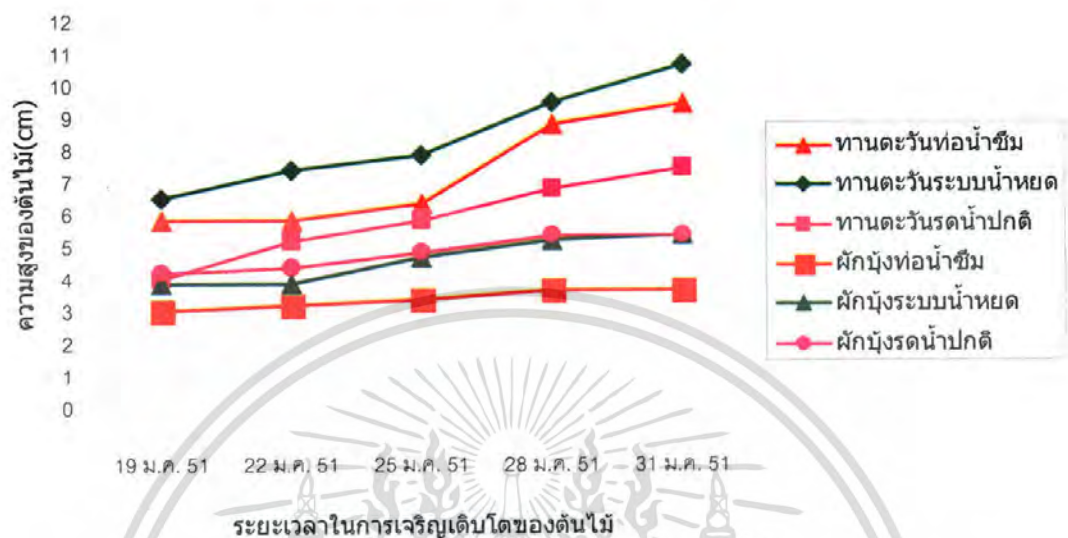
#### 4.4 การศึกษาผลจากการนำท่อน้ำซีมีไปใช้งานจริง

ในการนำท่อน้ำซีมีที่ได้จากงานวิจัยไปใช้งานจริงด้านเกษตรกรรม โดยทำการทดสอบท่อน้ำซีมีสูตร 1B ซึ่งมีอัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 1 - 10 l/h/m ที่ความดันในช่วง 0.5 - 0.75 bar กับแปลงเกษตร 3 แปลง ที่ทำการปลูกต้นทานตะวัน ต้นผักบุ้ง ต้นสามกษัตริย์ และต้นเงาะแก้ว ซึ่งจะทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยแปลงที่ 1 ทดสอบด้วยระบบน้ำหยด โดยทำการติดหัวน้ำหยดกับท่อพีวีซี ระยะห่างระหว่างหัวน้ำหยด 50 เซนติเมตร แปลงที่ 2 ทดสอบด้วยท่อน้ำซีมี โดยนำท่อน้ำซีมีวางตามความยาวตลอดแปลง และแปลงที่ 3 ทดสอบด้วยการรดน้ำปกติโดยใช้บัวรดน้ำ ซึ่งปรับปริมาณน้ำให้มีปริมาณใกล้เคียงกัน ในแต่ละแปลงจะใช้ปริมาณน้ำดังตารางที่ 4.4 โดยปรับปริมาณน้ำให้ใกล้เคียงกับระบบน้ำหยดและทำการติดตามผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่รดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ท่อน้ำซีมี และรดน้ำปกติ ซึ่งให้ผลการเจริญเติบโตดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณน้ำที่แต่ละแปลงได้รับ

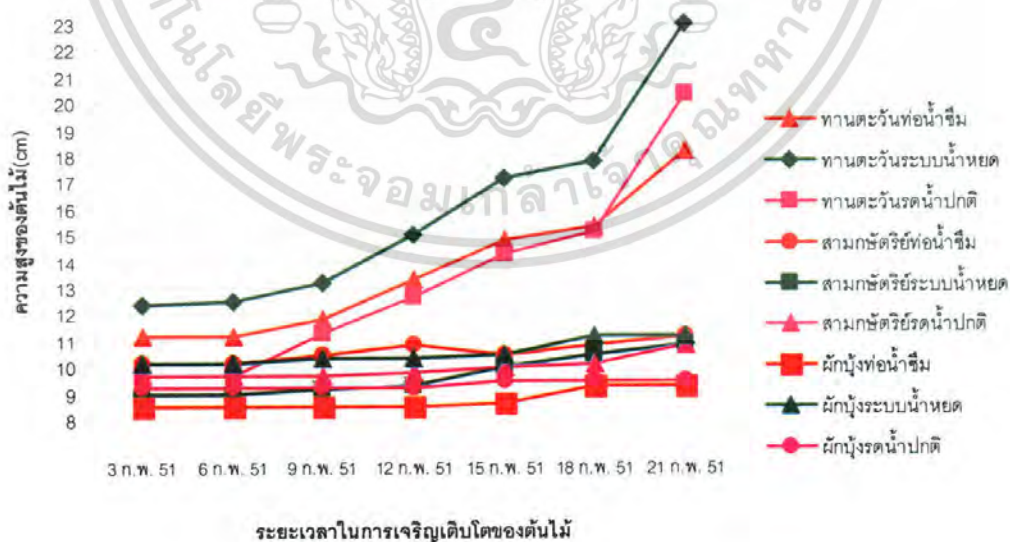
| การให้น้ำ  | ความยาวท่อ(m) | ปริมาณน้ำ(ml) | อัตราการซึมผ่านน้ำ(l/h/m) |
|------------|---------------|---------------|---------------------------|
| ระบบน้ำหยด | 6.15          | 2750          | 2.68                      |
| ท่อน้ำซีมี | 5.40          | 2400          | 2.66                      |
| รดน้ำปกติ  | -             | 2575          | -                         |

กราฟแสดงผลการเจริญเติบโตของต้นพืชเฉลี่ย 3 ต้นที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ,  
 ท่อน้ำซึมและรดน้ำปกติ ของเดือนมกราคม พ.ศ. 2551



รูปที่ 4.17 ผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ท่อน้ำซึม และรดน้ำ  
 ปกติ ของเดือนมกราคม พ.ศ. 2551

กราฟแสดงผลการเจริญเติบโตของต้นพืชเฉลี่ย 3 ต้นที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด , ท่อน้ำซึม  
 และรดน้ำปกติ ของเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551



รูปที่ 4.18 ผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ท่อน้ำซึม และรดน้ำ  
 ปกติ ของเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเกตโดยการนำท่อน้ำซึมนำไปใช้งานจริง และทำการวัดขนาดความสูงของต้นไม้แต่ละชนิดจำนวน 3 ต้นของทุกแปลงพบว่า ต้นพืชชนิดเดียวกันที่รดน้ำด้วยท่อน้ำซึมน้ำมีอัตราการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีน้ำซึมออกมาตลอดทั้งท่อ ส่วนระบบน้ำหยดนั้นต้นพืชที่ขึ้นบริเวณที่ใกล้หัวน้ำหยดจะมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าต้นไม้ที่อยู่ไกลบริเวณหัวน้ำหยด ส่วนการรดน้ำปกติมีการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ใกล้เคียงกันแต่อาจมีการรดน้ำได้ไม่เท่ากันทั่วแปลง บางบริเวณอาจรดน้ำในปริมาณมากและบางบริเวณอาจรดน้ำได้ในปริมาณน้อย อย่างไรก็ตามการทดลองนี้อาจเกิดข้อผิดพลาด เนื่องจากทำการทดลองกลางแจ้งและไม่สามารถควบคุมปริมาณน้ำฝนได้ (ขณะทำการทดลองในวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2551 มีฝนตกหนักในช่วงเช้าทำให้ผลที่ได้อาจผิดพลาดได้ และบางแปลงอาจมีน้ำขังภายใต้มากกว่าแปลงอื่น ส่งผลให้แปลงมีความชุ่มน้ำต้นไม้จึงมีการเจริญเติบโตดี)

#### 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะทำการเปรียบเทียบท่อน้ำซึมสูตร 1 ที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติผสมยางอีพีดีเอ็ม เท่ากับ 80:20 ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที โดยวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ซึ่งสามารถผลิตท่อน้ำซึมเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 21 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 17 มิลลิเมตร ได้ความยาว 9.52 เมตร โดยการหาความยาวท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (แสดงดังภาคผนวก ข) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ 1 ที่ประกอบด้วย NR/EPDM (80:20) ที่เวลาเชื่อมโยง 20 นาที

| รายการ   | ปริมาณที่ใช้ | ราคาต่อหน่วย <sup>1)</sup>  | จำนวนเงิน(บาท) |
|--|--------------|-----------------------------|----------------|
| 1. ยางแผ่นรมควันชั้น 3   | 560.0 กรัม   | 86.99 บาท/กก. <sup>2)</sup> | 48.71          |
| 2. ยางอีพีดีเอ็ม   | 140.0 กรัม   | 130 บาท/กก.                 | 18.20          |
| 3. ผงยางรถยนต์ (ขนาด 30 เมช)                                     | 1050.0 กรัม  | 13 บาท/กก.                  | 13.65          |
| 4. Zinc oxide (ZnO)  | 35.0 กรัม    | 100 บาท/กก.                 | 3.50           |
| 5. Stearic acid  | 14.0 กรัม    | 41 บาท/กก.                  | 0.57           |
| 6. CBS   | 7.0 กรัม     | 158 บาท/กก.                 | 1.11           |
| 7. TMTD  | 3.5 กรัม     | 110 บาท/กก.                 | 0.39           |
| 8. สารตัวเติมเขม่าดำ (N550)                                      | 350.0 กรัม   | 45.40 บาท/กก.               | 15.89          |
| 9. น้ำมันเนพททานิก   | 35.0 กรัม    | 20.25 บาท/กก.               | 0.71           |
| 10. (6PPD)   | 7.0 กรัม     | 175 บาท/กก.                 | 1.23           |
| 11. ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์  | 14.0 กรัม    | 55 บาท/กก.                  | 0.77           |
| 12. DPT  | 70.0 กรัม    | 184 บาท/กก.                 | 12.88          |
| 13. ยูเรีย   | 70.0 กรัม    | 136 บาท/กก.                 | 9.52           |
| 14. กำมะถัน  | 17.5 กรัม    | 22 บาท/กก.                  | 0.39           |
| 15. ค่าแรง   | 10 นาที      | 181 บาท/วัน <sup>3)</sup>   | 1.28           |
| 16. ค่าไฟฟ้า   | 1 หน่วย      | 3 บาท/หน่วย                 | 3.00           |
| รวมต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (9.52 เมตร) |              |                             | 131.80         |
| ราคาต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีความยาว 1 เมตร <sup>4)</sup>  |              |                             | 13.84          |

หมายเหตุ : <sup>1)</sup>เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือนกุมภาพันธ์ 2551

<sup>2)</sup>เป็นราคาประมูล ณ ตลาดกลางยางพารา อ.หาดใหญ่ 14 กุมภาพันธ์ 2551

<sup>3)</sup>คิดค่าแรงตามค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน

<sup>4)</sup>ราคานี้ไม่รวมต้นทุนการผลิต และค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร

#### 4.6 สรุปสมบัติของท่อน้ำซึม และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางอีพดีเอ็มที่ใช้ในงานวิจัย

จากการทดลองพบว่า องค์ประกอบของวัตถุดิบ และสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับการผลิตท่อน้ำซึม เพื่อให้ได้ท่อน้ำซึมที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ ท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย

- อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติ (NR) : ยางอีพดีเอ็ม (EPDM) คือ 80 : 20
- ความหนาของท่อน้ำซึมคือ 3.3 มิลลิเมตร และ 2.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ทำการบดผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิห้อง และทำการขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดี่ยวที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วรอบ 35-40 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเชื่อมยางท่อด้วยเครื่องอบความร้อนอุณหภูมิ 165 °C เป็นเวลา 20 นาที โดยท่อที่ผลิตได้จะเป็นท่อที่มีรูพรุน สีดำ สามารถโค้งงอได้ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 21 มิลลิเมตร ความหนาของท่อประมาณ 2.9 มิลลิเมตร สมบัติบางประการของท่อน้ำซึมที่ผลิตได้แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติบางประการของท่อน้ำซึมที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้

| สมบัติของท่อน้ำซึมสูตร 1B                 | ผลที่ได้                                 |
|---|--|
| ความแข็งแรงดึง (MPa)                      | 3.3                                      |
| เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)            | 318.4                                    |
| มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (MPa)          | 1.1                                      |
| มอดุลัสที่ 200 เปอร์เซ็นต์ (MPa)          | 2.1                                      |
| ความแข็งกด (Shore A)                      | 45.1                                     |
| ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )          | 0.8                                      |
| ความต้านทานต่อไอโซน                       | เกิดรอยแตกจำนวนน้อย ความยาวมากกว่า 3 มม. |
| อัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดันต่างๆ (l/h/m) |  |
| - 0.50 บาร์                               | 2.0                                      |
| - 0.75 บาร์                               | 4.8                                      |
| - 1.00 บาร์                               | 6.6                                      |
| - 1.25 บาร์                               | 13.3                                     |
| - 1.50 บาร์                               | 27.8                                     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของท่อน้ำซึม โดยศึกษาความหนาของท่อน้ำซึมและอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็มที่อัตราส่วน 80 : 20 และ 70 : 30 จากการศึกษาสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- การเปลี่ยนความหนา มีผลต่อสมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านน้ำ กล่าวคือ การลดความหนาของท่อจาก 3.3 มิลลิเมตร เป็น 2.9 มิลลิเมตร ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมากขึ้น และสมบัติเชิงกลบางประการดีขึ้น เช่น โมดูลัสเพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น

- เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางอีพิตีเอ็ม จากอัตราส่วน 80:20 (สูตร 1) เป็น 70:30 (สูตร 2) พบว่าสมบัติเชิงกลด้อยลง เนื่องจากอัตราส่วนของยางธรรมชาติน้อยลงและยางอีพิตีเอ็มเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างของชิ้นงานมีความหนาแน่นของพันธะคู่ต่ำลง ทำให้เกิดการเชื่อมโยงน้อย ส่งผลให้ยางที่ได้มีความแข็งแรงน้อย อัตราการซึมผ่านของน้ำจึงมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสูตร 2 มีอัตราส่วนของยางอีพิตีเอ็มมากจึงมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง เมื่อให้แรงดันน้ำแล้วน้ำสามารถทำลายโครงสร้างได้ง่ายจึงทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมีมาก

- ท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยางธรรมชาติ:ยางอีพิตีเอ็ม:ผงยางรถยนต์ เท่ากับ 80:20:150 ที่เวลาเชื่อมโยง 20 นาที มีต้นทุนการผลิตคือ 19.48 บาท

- ท่อน้ำซึมที่ผลิตได้เหมาะกับลักษณะการใช้งานด้านเกษตรกรรม ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้งในที่ร่ม และกลางแจ้งเนื่องจากมีสมบัติที่ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ และการใช้งานแบบวางบนดิน สำหรับการให้น้ำทางการแก้วนกล้า สวนหย่อม สวนชา กาแฟ เป็นต้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาท่อน้ำซึมที่ได้จากยางธรรมชาติผสมยางอีพิตีเอ็ม และผงยางรถยนต์สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่างๆที่น่าสนใจที่อาจเป็นแนวทางในการทำการศึกษาวิจัยต่อไปดังนี้

1. เนื่องจากโครงการพิเศษนี้ใช้เครื่องมือขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ทำให้ประสิทธิภาพการผสมยางผสมสูตรอาจได้ผลดีไม่เท่าที่ควร เช่น การกระจายตัวของสารให้ฟอง ดังนั้นจึงสมควรเลือกบางสูตรไปใช้ทดลองในการผลิตเชิงพาณิชย์ และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสมบัติเชิงกลสมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อที่ได้

2. นำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ปรับปรุงสูตรท่อน้ำซึม เช่น เพิ่มความแข็งแรงของท่อน้ำซึม เพื่อใช้เป็นท่อน้ำซึมชนิดใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการเสริมแรงท่อโดยใช้เส้นใย เช่น เส้นใยพลาจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว (Ply pulp fibers) เพื่อปรับปรุงความทนทานต่อความดันสูง
4. ทำการทดลองความทนทานต่อไอโซนใหม่ ที่ปริมาณไอโซนต่ำลง ( 25 pphm)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## นิยามศัพท์

1. ยางผสมสูตรหรือยางคอมปาวด์ (Rubber compound) หมายถึงยางดิบที่มีการผสมสารเติมแต่ง(Additive) ต่างๆ เช่น สารเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ฯลฯ
2. การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization) หมายถึง กระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ บางครั้งอาจเรียกว่าการทำใหยางสุก (Curing) หรือทำใหยางคงรูป
3. สารตัวเติม (Filler) หมายถึง สารที่ทำหน้าที่ลดต้นทุน เช่น เขม่าดำ (Carbon black, CB) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ บางชนิดยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์ด้วย
4. สารให้ฟอง (Blowing agent) หมายถึง สารที่สลายตัวให้ก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อนขณะทำการเชื่อมโยงยาง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน เช่น ฟองน้ำยาง โฟม
5. ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet, RSS) หมายถึง ยางแผ่นที่ทำจากน้ำยางที่ทำให้เกิดการจับตัวด้วยกรด จากนั้นนำไปรีดให้เป็นแผ่น ล้างน้ำ และทำให้แห้งโดยใช้ควันไฟรม
6. การบ่มเร่ง (Aging) หมายถึง การทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสลายของยางในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาหรือคาดการณ์เกี่ยวกับอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์
7. phr (part per hundred of rubber) หมายถึง ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน
8. pphm (part per hundred million) หมายถึง ส่วนในยางหนึ่งร้อยล้านส่วน
9. CBS หมายถึง N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide
10. TMTD หมายถึง Tetramethylthiuram disulfide
11. DPT หมายถึง N,N'-Dinitroso pentamethylene tetramine
12. 6PPD หมายถึง N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การหาความยาวท่อน้ำซึมที่ผลิตจากยางผสมสูตรหนัก 1 กิโลกรัม

$$\text{ความหนาแน่นของท่อน้ำซึม} = 0.88 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรของท่อน้ำซึม 1 กิโลกรัม} = 1000/0.88$$

$$= 1136.3636 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อน้ำซึมเท่ากับ 2.1 และ 1.7 เซนติเมตร ตามลำดับ

$$\text{ปริมาตรของท่อน้ำซึมยาว 1 เมตร} = \pi(r_1^2 - r_2^2)h$$

$$= \pi(1.05^2 - 0.85^2) \times 100$$

$$= 119.32 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

ท่อน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัม สามารถผลิตท่อน้ำซึมได้ความยาว

$$= 1136.3636/119.32$$

$$= 9.5237 \text{ เมตร}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

ตาราง และรูปภาพแสดงผลการเจริญเติบโต ของต้นพืชที่ได้  
จากการรดน้ำ ด้วยระบบน้ำหยด, ท่อน้ำซึม และรดน้ำปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด , ท่อน้ำซึม และรดน้ำปกติ ประจำเดือนมกราคม พ.ศ. 2551

| วันที่<br>ทำการวัด | ระบบน้ำหยด (cm) |         | ท่อน้ำซึม (cm) |         | รดน้ำปกติ (cm) |         |
|--------------------|-----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
|                    | ทานตะวัน        | ผักนึ่ง | ทานตะวัน       | ผักนึ่ง | ทานตะวัน       | ผักนึ่ง |
| 19                 | 5.0             | 4.0     | 6.0            | 3.5     | 5.0            | 3.0     |
| ม.ค.               | 6.5             | 4.5     | 5.5            | 2.5     | 3.0            | 5.0     |
| 2551               | 8.0             | 3.0     | 6.0            | 3.0     | 4.0            | 4.5     |
| เฉลี่ย             | 6.5             | 3.83    | 5.83           | 3.0     | 4.0            | 4.167   |
| 22                 | 7.0             | 4.0     | 6.0            | 3.5     | 5.0            | 3.0     |
| ม.ค.               | 7.0             | 4.5     | 5.5            | 2.5     | 5.5            | 5.0     |
| 2551               | 8.0             | 3.0     | 6.0            | 3.5     | 5.0            | 5.0     |
| เฉลี่ย             | 7.33            | 3.83    | 5.83           | 3.167   | 5.167          | 4.33    |
| 25                 | 8.0             | 5.0     | 6.5            | 3.5     | 5.5            | 3.5     |
| ม.ค.               | 7.0             | 4.5     | 6.5            | 3.0     | 6.5            | 5.5     |
| 2551               | 8.5             | 4.5     | 6.0            | 3.5     | 5.5            | 5.5     |
| เฉลี่ย             | 7.83            | 4.67    | 6.33           | 3.33    | 5.83           | 4.83    |
| 28                 | 10.5            | 5.5     | 10.0           | 4.0     | 6.0            | 3.5     |
| ม.ค.               | 9.5             | 5.0     | 9.0            | 3.0     | 9.0            | 6.0     |
| 2551               | 8.5             | 5.0     | 7.5            | 4.0     | 5.5            | 6.5     |
| เฉลี่ย             | 9.5             | 5.167   | 8.83           | 3.67    | 6.83           | 5.33    |
| 31                 | 13.5            | 5.5     | 10.0           | 4.0     | 6.5            | 3.5     |
| ม.ค.               | 10.5            | 5.5     | 10.0           | 3.0     | 10.0           | 6.0     |
| 2551               | 8.5             | 5.0     | 8.5            | 4.0     | 6.0            | 6.5     |
| เฉลี่ย             | 10.67           | 5.33    | 9.5            | 3.67    | 7.5            | 5.33    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการเจริญเติบโตของต้นพืชที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด , ท่อน้ำซึม และรดน้ำปกติ ประจำเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

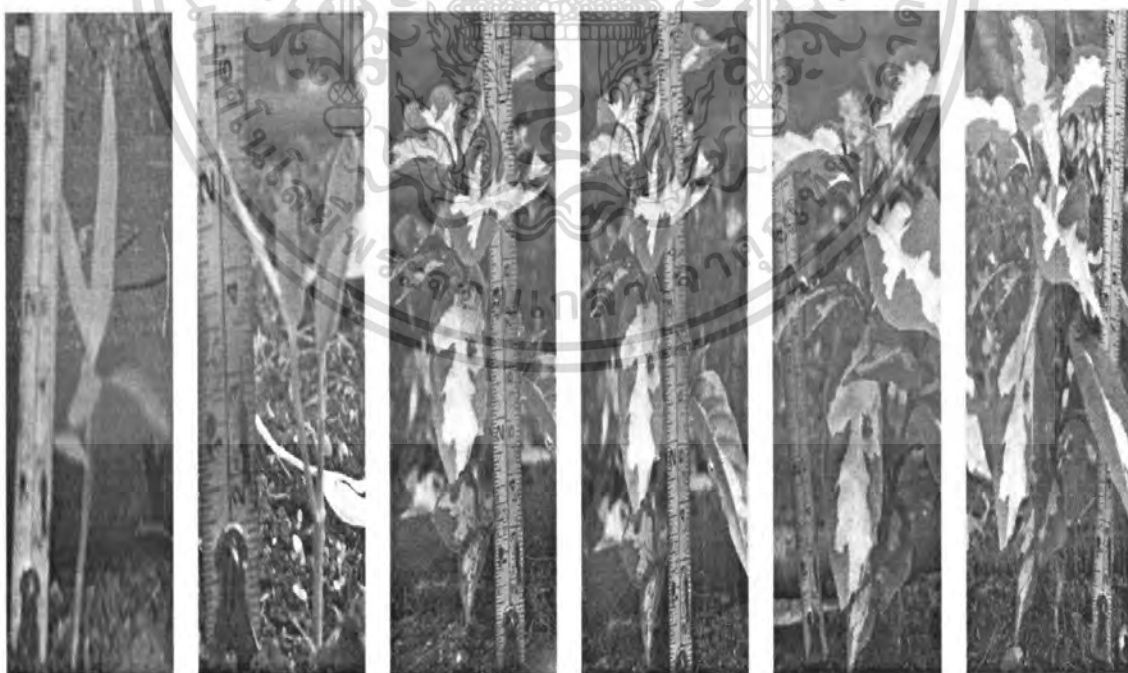
| วันที่ทำ<br>การวัด | ระบบน้ำหยด (cm) |             |         | ท่อน้ำซึม (cm) |             |         | รดน้ำปกติ (cm) |             |         |
|--------------------|-----------------|-------------|---------|----------------|-------------|---------|----------------|-------------|---------|
|                    | ทวนตะวัน        | สามกษัตริย์ | เงาแก้ว | ทวนตะวัน       | สามกษัตริย์ | เงาแก้ว | ทวนตะวัน       | สามกษัตริย์ | เงาแก้ว |
| 3                  | 14.5            | 9.5         | 8.5     | 12.5           | 9.5         | 7.0     | 7.0            | 7.5         | 10.0    |
| ก.พ.               | 12.0            | 11.0        | 9.0     | 11.5           | 11.0        | 9.5     | 10.0           | 11.0        | 8.5     |
| 2551               | 10.5            | 6.5         | 13.0    | 9.5            | 10.0        | 9.0     | 12.0           | 10.5        | -       |
| เฉลี่ย             | 12.33           | 9.0         | 10.167  | 11.167         | 10.167      | 8.5     | 9.67           | 9.67        | 9.25    |
| 6                  | 14.5            | 9.5         | 8.5     | 12.5           | 9.5         | 7.0     | 7.0            | 7.5         | 10.0    |
| ก.พ.               | 12.5            | 11.0        | 9.0     | 11.5           | 11.0        | 9.5     | 10.0           | 11.0        | 8.5     |
| 2551               | 10.5            | 6.5         | 13.0    | 9.5            | 10.0        | 9.0     | 12.0           | 10.5        | -       |
| เฉลี่ย             | 12.5            | 9.0         | 10.167  | 11.167         | 10.167      | 8.5     | 9.67           | 9.67        | 9.25    |
| 9                  | 15.0            | 9.5         | 9.0     | 14.0           | 10.5        | 7.0     | 8.0            | 7.5         | 10.0    |
| ก.พ.               | 13.5            | 11.0        | 9.0     | 11.5           | 11.0        | 9.5     | 11.5           | 11.0        | 8.5     |
| 2551               | 11.0            | 7.0         | 13.0    | 10.0           | 10.0        | 9.0     | 14.5           | 10.5        | -       |
| เฉลี่ย             | 13.167          | 9.167       | 10.33   | 11.83          | 10.5        | 8.5     | 11.33          | 9.67        | 9.25    |
| 12                 | 16.5            | 9.5         | 9.0     | 16.5           | 10.5        | 7.0     | 9.5            | 8.0         | 10.0    |
| ก.พ.               | 15.0            | 11.5        | 9.0     | 12.5           | 11.5        | 9.5     | 13.5           | 11.0        | 8.5     |
| 2551               | 13.5            | 7.0         | 13.0    | 11.0           | 10.5        | 9.0     | 15.0           | 10.5        | -       |
| เฉลี่ย             | 15.0            | 9.33        | 10.33   | 13.33          | 10.83       | 8.5     | 12.67          | 9.83        | 9.25    |
| 15                 | 19.0            | 9.0         | 9.0     | 18.5           | 10.5        | 8.0     | 12.0           | 9.0         | 10.0    |
| ก.พ.               | 17.0            | 13.0        | 9.5     | 13.0           | 11.0        | 9.0     | 15.0           | 11.0        | 9.0     |
| 2551               | 15.5            | 8.0         | 13.0    | 13.0           | 10.0        | 9.0     | 16.0           | 10.0        | -       |
| เฉลี่ย             | 17.167          | 10.0        | 10.5    | 14.83          | 10.5        | 8.67    | 14.33          | 10.0        | 9.5     |
| 18                 | 20.0            | 9.5         | 10.0    | 19.5           | 10.5        | 8.5     | 14.0           | 9.0         | 10.0    |
| ก.พ.               | 17.5            | 14.0        | 10.5    | 13.5           | 11.5        | 10.5    | 15.5           | 11.0        | 9.0     |
| 2551               | 16.0            | 8.0         | 13.0    | 13.0           | 10.5        | 9.0     | 16.0           | 10.5        | -       |
| เฉลี่ย             | 17.83           | 10.5        | 11.167  | 15.33          | 10.83       | 9.33    | 15.167         | 10.167      | 9.5     |
| 21                 | 25.0            | 9.5         | 10.0    | 24.0           | 11.0        | 8.5     | 18.0           | 10.5        | 10.0    |
| ก.พ.               | 22.5            | 14.5        | 10.5    | 16.0           | 12.0        | 10.5    | 21.5           | 11.0        | 9.0     |
| 2551               | 21.5            | 8.5         | 13.0    | 14.5           | 10.5        | 9.0     | 21.5           | 11.0        | -       |
| เฉลี่ย             | 23.0            | 10.83       | 11.167  | 18.167         | 11.167      | 9.33    | 20.33          | 10.83       | 9.5     |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้ผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพที่ ค.1 แสดงการเจริญเติบโตของต้นทานตะวันที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำซึม ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

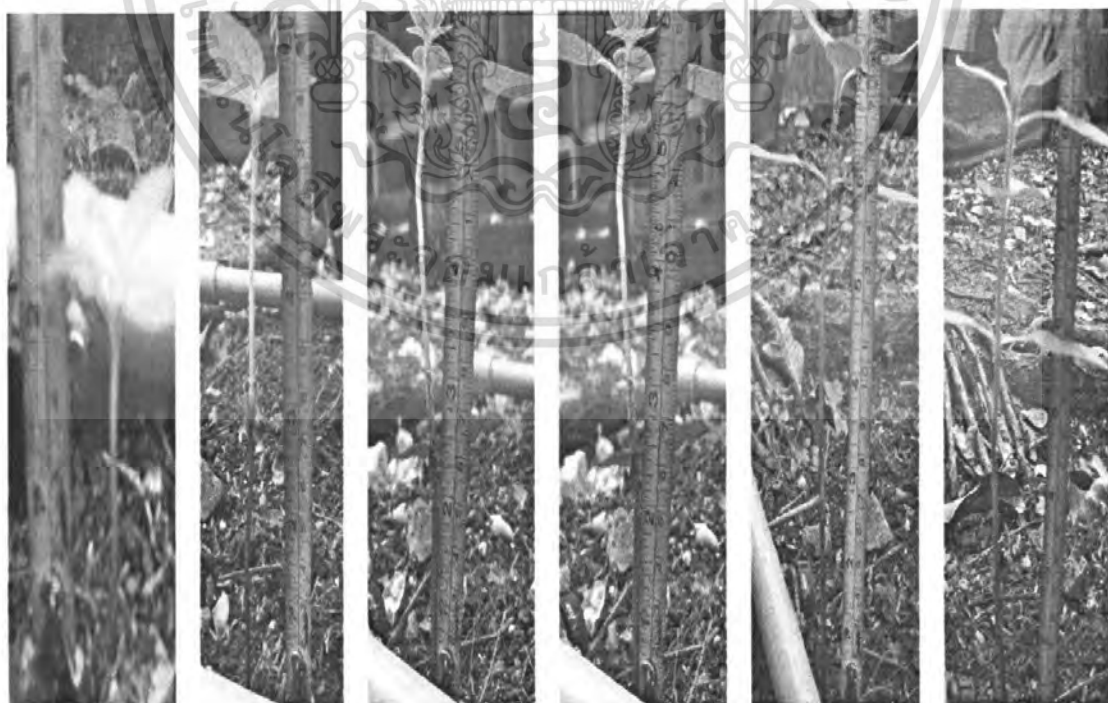


รูปภาพที่ ค.2 แสดงการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งและสามกษัตริย์ที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำซึม ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

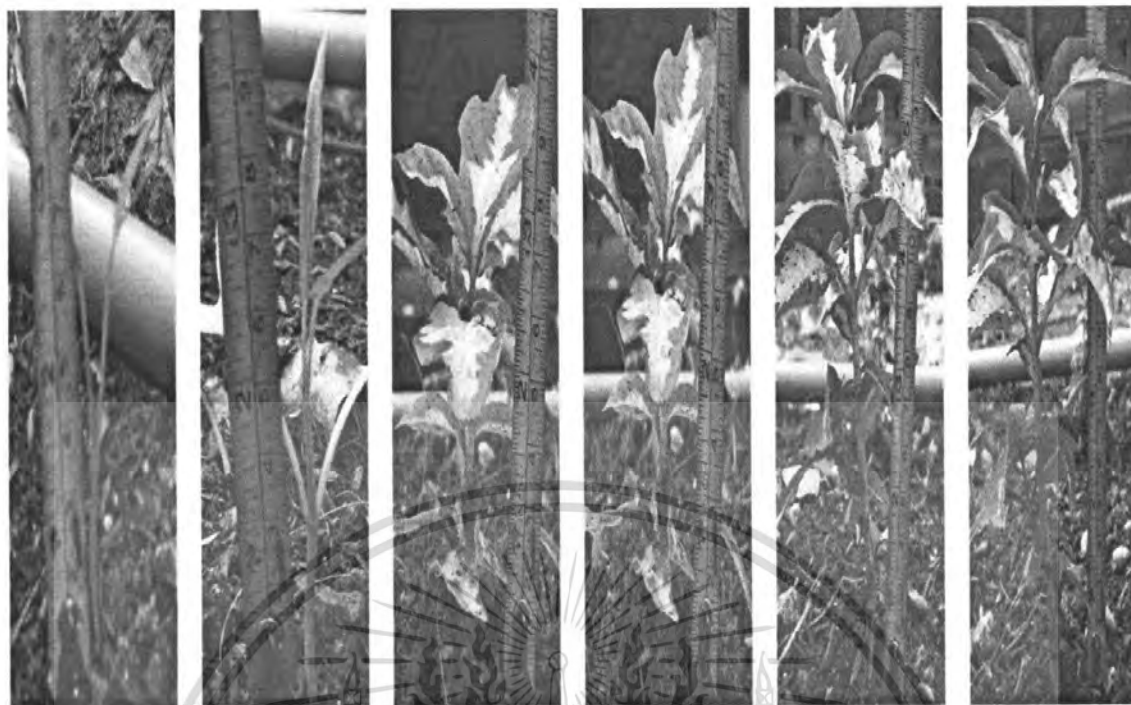
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพที่ ค.3 แสดงการเจริญเติบโตของต้นเงี้ยวที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำซึม ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551



รูปภาพที่ ค.4 แสดงการเจริญเติบโตของต้นทานตะวันที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ตั้งแต่เอกสารนี้เป็นเอกสารเดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551 นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

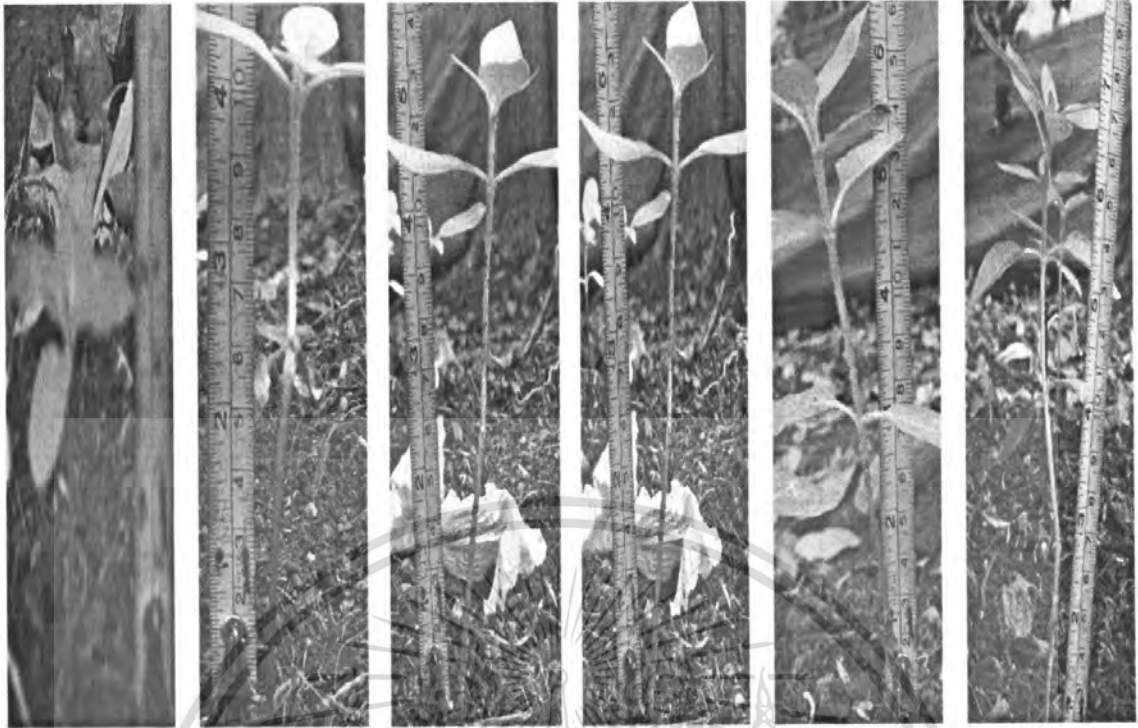


รูปภาพที่ ค.5 แสดงการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งและสามกษัตริย์ที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

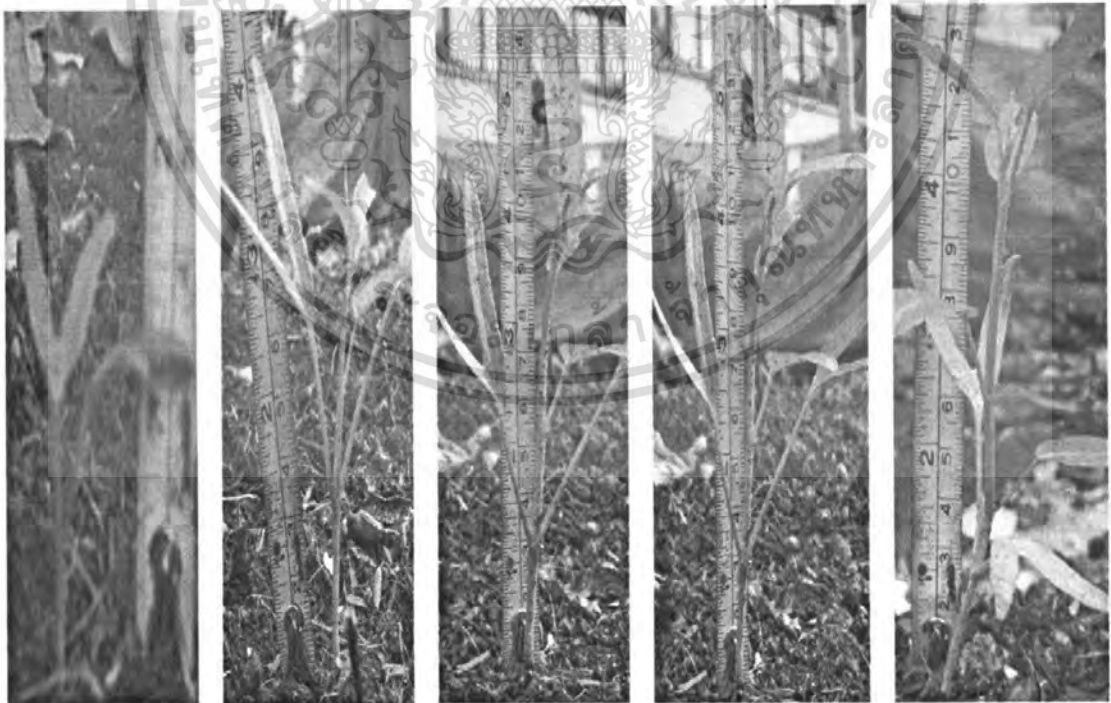


รูปภาพที่ ค.6 แสดงการเจริญเติบโตของต้นเก๊กแก้วที่ได้จากการรดน้ำด้วยระบบน้ำหยด ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

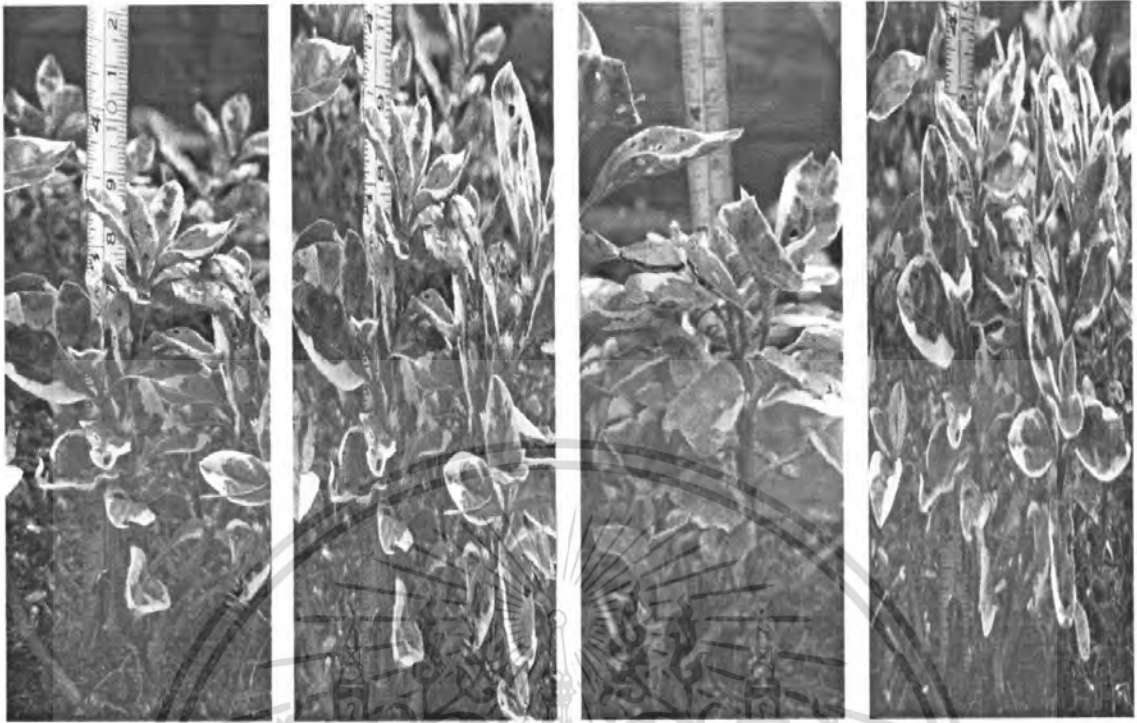


รูปภาพที่ ค.7 แสดงการเจริญเติบโตของต้นทานตะวันที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551



รูปภาพที่ ค.8 แสดงการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้งที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพที่ ค.9 แสดงการเจริญเติบโตของต้นเงี้ยวแก้วที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่เดือนมกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551



รูปภาพที่ ค.10 แสดงการเจริญเติบโตของต้นสมกษัตริย์ที่ได้จากการรดน้ำปกติ ตั้งแต่เดือน

มกราคม-เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 แสดงผลความหนาของท่อน้ำซีม (mm)

| สูตร 1 A      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| ตำแหน่งที่วัด | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | ค่าเฉลี่ย |
| ชั้นที่1      | 3.57 | 3.56 | 3.50 | 3.34 | 3.45 | 3.41 | 3.47 | 3.41 | 3.51 | 3.49      |
| ชั้นที่2      | 3.04 | 3.05 | 3.15 | 3.27 | 3.12 | 3.26 | 3.27 | 3.18 | 3.25 | 3.18      |
| ชั้นที่3      | 3.60 | 3.44 | 3.68 | 3.62 | 3.54 | 3.47 | 3.59 | 3.44 | 3.39 | 3.53      |
| ชั้นที่4      | 3.21 | 3.16 | 3.33 | 3.29 | 3.32 | 3.21 | 3.14 | 3.41 | 3.25 | 3.25      |
| ชั้นที่5      | 3.32 | 3.28 | 3.35 | 3.45 | 3.48 | 3.48 | 3.36 | 3.32 | 3.37 | 3.48      |
| ชั้นที่6      | 3.46 | 3.03 | 3.22 | 3.27 | 3.07 | 3.32 | 3.25 | 3.22 | 3.27 | 3.23      |
| 3.36          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
| สูตร 1 B      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
| ชั้นที่1      | 2.85 | 2.81 | 2.89 | 2.91 | 3.14 | 2.87 | 2.94 | 2.81 | 3.00 | 2.91      |
| ชั้นที่2      | 3.02 | 3.08 | 3.09 | 3.10 | 2.92 | 2.95 | 3.00 | 3.00 | 3.04 | 3.02      |
| ชั้นที่3      | 3.07 | 2.97 | 2.90 | 3.09 | 2.89 | 2.96 | 3.07 | 3.01 | 3.06 | 3.01      |
| ชั้นที่4      | 2.87 | 2.83 | 2.85 | 2.89 | 2.90 | 2.93 | 2.91 | 2.91 | 2.81 | 2.87      |
| ชั้นที่5      | 2.83 | 2.92 | 2.93 | 3.10 | 3.16 | 2.90 | 3.03 | 3.05 | 2.80 | 2.97      |
| ชั้นที่6      | 2.81 | 3.14 | 2.81 | 2.83 | 2.94 | 2.98 | 2.95 | 2.96 | 2.80 | 2.92      |
| 2.95          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
| สูตร 2 A      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
| ชั้นที่1      | 3.31 | 3.10 | 3.28 | 3.32 | 3.23 | 3.23 | 3.20 | 3.12 | 3.24 | 3.24      |
| ชั้นที่2      | 3.25 | 3.10 | 3.21 | 3.06 | 2.98 | 3.40 | 3.18 | 3.15 | 3.06 | 3.15      |
| ชั้นที่3      | 3.35 | 3.21 | 3.16 | 3.22 | 3.24 | 3.37 | 3.39 | 2.36 | 3.08 | 3.26      |
| ชั้นที่4      | 3.62 | 3.13 | 3.31 | 3.15 | 3.31 | 3.51 | 3.31 | 3.21 | 3.20 | 3.31      |
| ชั้นที่5      | 3.51 | 3.39 | 3.83 | 3.2  | 3.19 | 3.11 | 3.33 | 3.07 | 3.1  | 3.24      |
| ชั้นที่6      | 3.20 | 3.26 | 3.12 | 3.28 | 3.22 | 3.24 | 3.18 | 3.33 | 3.28 | 3.25      |
| 3.24          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
| สูตร 2 B      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |
| ชั้นที่1      | 2.87 | 2.78 | 2.74 | 2.78 | 2.70 | 2.75 | 2.80 | 2.77 | 2.85 | 2.78      |
| ชั้นที่2      | 2.95 | 2.73 | 2.83 | 2.73 | 2.82 | 2.83 | 2.86 | 2.82 | 2.68 | 2.82      |
| ชั้นที่3      | 2.91 | 2.93 | 2.97 | 2.93 | 2.90 | 2.87 | 2.82 | 2.95 | 2.92 | 2.92      |
| ชั้นที่4      | 2.95 | 2.94 | 2.82 | 2.82 | 2.87 | 2.83 | 2.95 | 3.08 | 3.05 | 2.93      |
| ชั้นที่5      | 2.87 | 2.90 | 2.83 | 2.74 | 2.73 | 2.73 | 2.90 | 2.91 | 2.82 | 2.82      |
| ชั้นที่6      | 2.94 | 2.86 | 2.83 | 2.86 | 2.90 | 2.84 | 2.87 | 2.85 | 2.95 | 2.86      |
| 2.86          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 แสดงผลค่าความแข็งกดของท่อน้ำดื่ม (Shore A)

| ตำแหน่งที่          | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10           | ค่าเฉลี่ย |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------|-----------|
| <b>สูตร 1 A</b>     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |              |           |
| ชั้นที่1            | 44 | 44 | 43 | 46 | 46 | 45 | 43 | 42 | 42 | 48           | 44.3      |
| ชั้นที่2            | 48 | 48 | 52 | 54 | 49 | 51 | 53 | 51 | 50 | 51           | 50.7      |
| ชั้นที่3            | 43 | 47 | 43 | 47 | 45 | 48 | 48 | 44 | 48 | 46           | 45.9      |
| ชั้นที่4            | 51 | 55 | 52 | 50 | 52 | 41 | 50 | 54 | 53 | 55           | 51.3      |
| ชั้นที่5            | 44 | 46 | 49 | 44 | 41 | 39 | 44 | 43 | 42 | 43           | 43.5      |
| ชั้นที่6            | 45 | 50 | 52 | 51 | 53 | 48 | 47 | 54 | 41 | 47           | 49.6      |
| <b>ค่าเฉลี่ยรวม</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    | <b>47.55</b> |           |
| <b>สูตร 1 B</b>     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |              |           |
| ชั้นที่1            | 40 | 45 | 52 | 40 | 46 | 28 | 39 | 39 | 43 | 47           | 41.9      |
| ชั้นที่2            | 48 | 50 | 47 | 49 | 50 | 49 | 49 | 46 | 43 | 35           | 46.6      |
| ชั้นที่3            | 51 | 47 | 46 | 51 | 47 | 51 | 53 | 51 | 50 | 47           | 49.4      |
| ชั้นที่4            | 42 | 38 | 46 | 37 | 46 | 46 | 44 | 40 | 45 | 46           | 43.0      |
| ชั้นที่5            | 46 | 47 | 47 | 46 | 45 | 50 | 52 | 45 | 48 | 48           | 47.4      |
| ชั้นที่6            | 33 | 42 | 42 | 40 | 43 | 49 | 43 | 40 | 51 | 45           | 42.8      |
| <b>ค่าเฉลี่ยรวม</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    | <b>45.18</b> |           |
| <b>สูตร 2 A</b>     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |              |           |
| ชั้นที่1            | 47 | 43 | 44 | 44 | 49 | 44 | 42 | 47 | 46 | 42           | 44.8      |
| ชั้นที่2            | 51 | 52 | 50 | 50 | 34 | 44 | 53 | 43 | 50 | 42           | 46.9      |
| ชั้นที่3            | 48 | 46 | 46 | 51 | 45 | 42 | 50 | 48 | 51 | 52           | 47.9      |
| ชั้นที่4            | 47 | 44 | 46 | 47 | 44 | 48 | 49 | 45 | 42 | 42           | 45.4      |
| ชั้นที่5            | 42 | 48 | 38 | 49 | 42 | 49 | 46 | 39 | 40 | 50           | 44.3      |
| ชั้นที่6            | 49 | 41 | 41 | 44 | 40 | 52 | 47 | 56 | 43 | 40           | 45.3      |
| <b>ค่าเฉลี่ยรวม</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    | <b>45.77</b> |           |
| <b>สูตร 2 B</b>     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |              |           |
| ชั้นที่1            | 50 | 50 | 54 | 52 | 49 | 55 | 52 | 48 | 50 | 50           | 51.0      |
| ชั้นที่2            | 49 | 51 | 54 | 52 | 55 | 52 | 53 | 49 | 51 | 51           | 51.8      |
| ชั้นที่3            | 49 | 45 | 47 | 55 | 46 | 47 | 48 | 52 | 46 | 50           | 49.5      |
| ชั้นที่4            | 41 | 43 | 45 | 44 | 37 | 48 | 42 | 46 | 48 | 44           | 43.8      |
| ชั้นที่5            | 49 | 45 | 43 | 41 | 40 | 47 | 40 | 39 | 39 | 42           | 42.5      |
| ชั้นที่6            | 45 | 45 | 41 | 45 | 44 | 44 | 51 | 37 | 45 | 45           | 44.2      |
| <b>ค่าเฉลี่ยรวม</b> |    |    |    |    |    |    |    |    |    | <b>47.13</b> |           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 แสดงผลอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม

| อัตราการซึมผ่านน้ำ<br>(l/h/m)<br>ความดัน (bar) | สูตร 1A | สูตร 1B | สูตร 2A | สูตร 2B |
|--|---------|---------|---------|---------|
| 0.50   | 0.00    | 2.06    | 18.21   | 45.80   |
| 0.75   | 0.04    | 4.83    | 32.17   | 72.28   |
| 1.00   | 0.27    | 6.67    | 61.47   | 137.70  |
| 1.25   | 0.50    | 13.39   | 101.49  | 253.51  |
| 1.50   | 0.88    | 27.89   | 260.39  | 330.63  |

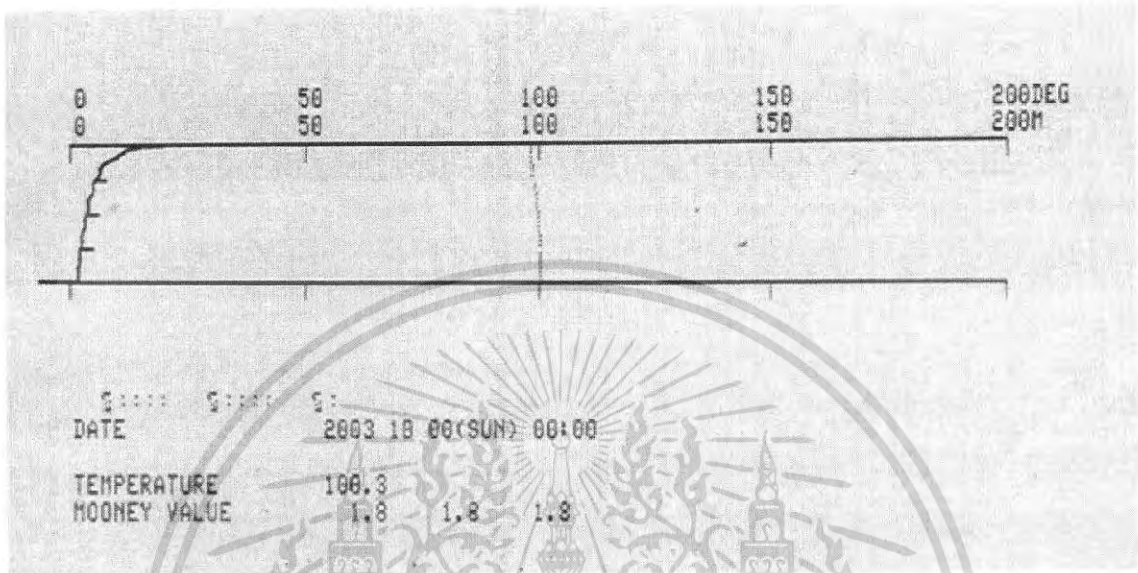


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

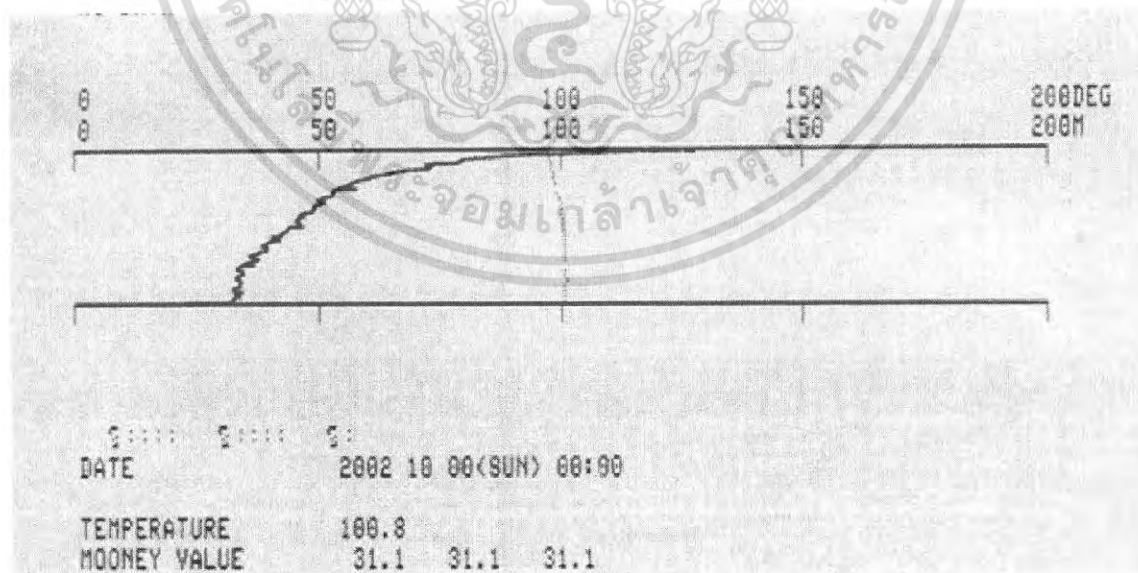


ภาคผนวก ช  
แสดงผลค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)  
ML 1+4(100 °C) ของท่อน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพที่ ข.1 แสดงผลค่าความหนืดมูนนี่(Mooney) (ML 1+4(100 °C)) ของท่อน้ำซีเมนต์ 1

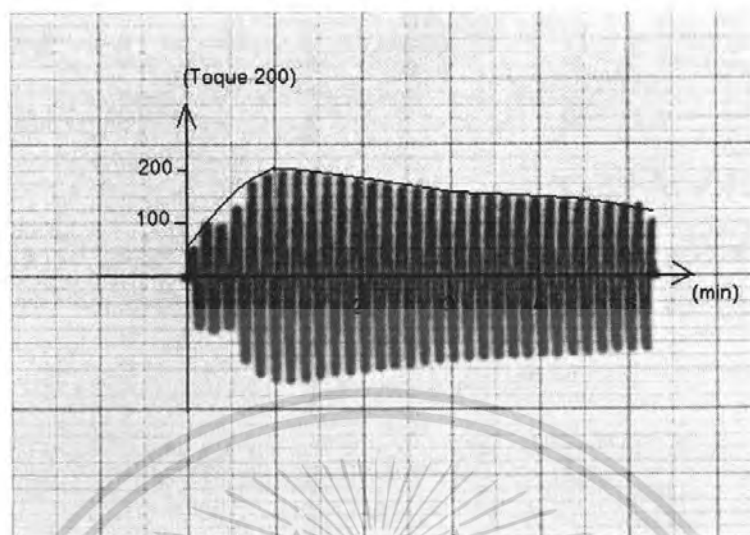


รูปภาพที่ ข.2 แสดงผลค่าความหนืดมูนนี่(Mooney) (ML 1+4(100 °C)) ของท่อน้ำซีเมนต์ 2

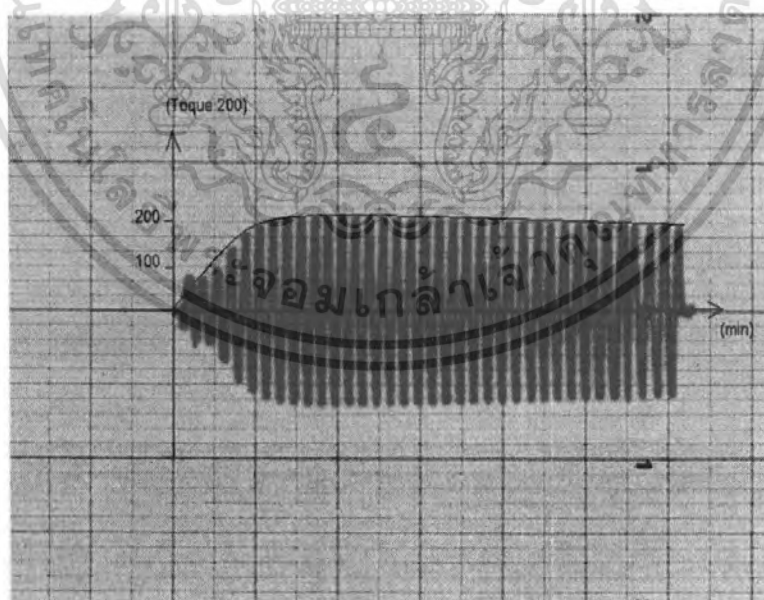
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปภาพที่ ข.1 แสดงผลค่า Cure Time ของท่อน้ำซีเมนต์ 1



รูปภาพที่ ข.2 แสดงผลค่า Cure Time ของท่อน้ำซีเมนต์ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] [Online] : <http://www.nn.nstda.or.th/2005/index>.
- [2] [Online] : <http://www.scb.co.th/LIB/th/article.html>.
- [3] [Online] : [http://www.nia.or.th/html/activities/activity\\_040907\\_hm\\_27k](http://www.nia.or.th/html/activities/activity_040907_hm_27k).
- [4] [Online] : <http://www.tyrerecyclingsuccess.com/info/products.html>.
- [5] อธิพิล แจ้งชัด. เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาเทคโนโลยียาง.ภาควิชาเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [6] International Rubber Quality and Packing Conferences. International Standards of  
Quality and Packing for Natural Rubber Grades (The Green Book). New York: The  
Rubber Manufactures Association, Inc. 1969.
- [7] Dongjin Semichem. Dongjin Chemical. Dongjin Semichem Co. Ltd. 2001.
- [8] Hofmann W. Rubber Technology Handbook. Munich : Hanser Publishers.1989
- [9] Blow C.M. Rubber Technology and Manufacture. London : Butterworth & Co.  
Publication Ltd. 1971.
- [10] Adhikari B., De D. and Maiti S. "Reclamation and Recycling of Waste Rubber."  
Progress in Polymer.,vol.25, no.7, 2000. pp. 909-948.
- [11] บุญธรรม นิธิอุทัย และ ปรีชา บัองภัย. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์  
และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
- [12] อธิพิล แจ้งชัด. เอกสารการเรียนการสอนประกอบวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [13] Mark J.E., Erman B. and Eirich F.R. Science and Tachnology of Rubber. 2<sup>nd</sup> Ed.  
New York : Academic Press, Inc. 1994.
- [14] Makarov V.M. and Drozdovski V.F. Reprocessing of tyres and Rubber Wastes  
Recycling from the Rubber Product Industry. Ellis Horwood. 1991.
- [15] Pramanik P.K. and Baker W.E. Plastic, Rubber and Composites Processing and  
Application., vol.24, no. 4, 1995. pp. 229-237
- [16] Balogh G. and Samay G. "Possibilities of Recycling Tyre Waste". International  
Polymer Science and Technology ., vol.23, no. 11, 1996. pp. 86-91.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [17] Kowalska E. and Wielgosz Z. "Scrap Rubber Reused-A New Process Produces Porous Pipe from Worn-out Tyres". Polymer Recycling., vol. 2, no. 3, 1996. pp. 213-219.
- [18] ชลดา เลวิซ และสาโรช ช่างชุม. "การศึกษาชนิดและปริมาณของสารฟูลและสารกระตุ้นในยาง". ยางและพอลิเมอร์., ฉบับที่ 2, 2541.
- [19] Han M.H. "Ground Rubber Criteria-for the Use in Tire Stock Compounds". International Seminar on Elastomer, Bangkok, Thailand, December 1998.
- [20] ดาริน นิลทรงกรด. "การเตรียมยางไมโครเซลลูลาร์จากยางธรรมชาติ". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [21] เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์, พรวิ สุมิตร และอมรวดี ยูวโกศล. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ". โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [22] พลชิต บัวแก้ว, วิภา เศรษฐกนิษฐ์, นุชนาฏ ณ ระนอง, วราภรณ์ ขจรไชยกูล, ธวัช จาละ และทักษิณี เสนาะดี. "การผลิตท่อน้ำหยดใช้ในสวน". รายงานผลการวิจัยเรื่องเต็ม ประจำปี 2543. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.
- [23] ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ. "การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ". โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [24] คณัมพร สวัสดิ์ชุมพร, จงจิตร ลาภนิกรชัย และฉัตรมณี ชันทอง. "การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น". โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [25] สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [26] Robert W. The Rubber International Magazine., June. vol. 14, 2001. pp. 59-99.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] กัญญาณี แสงเกียรติยุทธ. "การศึกษาเพื่อหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์กับพอลิไวนิลคลอไรด์". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [28] Sombatsompop N. and Kumnuantip C. "Rheology, Cure Characteristics, Physical and Mechanical Properties of Tire Tread Reclaimed Rubber/Natural Rubber Compound". Journal of Applied Polymer Science., vol. 87, 2003. pp. 1723-1731.
- [29] ศุภโชค อุ๋นทรัพย์เจริญ และสมบุรณ์ แซ่ตั้ง. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิพรอพิลีน". โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [30] สุธมนา แจ่มเหมือน. "การผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [31] วศิน จิรไพศาลกุล, วัฒนนา ทรัพย์สภาพ และอ้ออำไพ ใจบุญ. "การผลิตท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์". โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [32] เจน สุขารมย์ และปริญญา ปองคำ. "การขึ้นรูปท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้วกับพอลิไวนิลคลอไรด์". โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [33] Teeluck M. and Sutton B.G. "Discharge characteristics of porous pipe microirrigation lateral." Department of Crop Sciences. The University of Sydney. 1998.
- [34] Zhuge Y.P., Zhang X.D., Zhang Y.L., Li J., Yang L.J., Huang Y. and Liu M.D. "Tomato root response to subsurface drip irrigation". Institute of Applied Ecology. Chinese Academy of Science., vol. 14, no. 2, 2004. pp. 205-212.
- [35] [Online] : <http://www.bullnet.co.uk/shops/hydro/pipeand1.htm>
- [36] [Online] : <http://www.porouspipe.co.uk/en/main.php?pg=porouspipe>
- [37] [Online] : <http://www.self-sufficient.co.uk/Porous-Pipe-Plot-Irrigation.htm>
- [38] ไพจิตร ตรีภาณุจนวนันท์, สุจิตรา ชัยสุนทรานนท์ และสุพรรณษา เหลืองจรัสหัตถ์  
โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] ASTM D 5289 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Property -Vulcanization Using Roterless Cure Meter"., Philadelphia : American Society for Testing and Material., 2001.
- [40] 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 Material., 1992.
- [41] อธิพิล แจ้งชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาการวัดพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [42] ASTM D 624 Committee on standard "Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer"., Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1991.
- [43] ASTM D 2240 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Property -Durometer Hardness"., Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1991.
- [44] ASTM D 1056 Committee on standard "Standard Test Method for Flexible Cellular Materials-Sponge or Expanded Rubber"., Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1991.
- [45] Morton M. The Rubber Technology. 2<sup>nd</sup> ED. New York : Nostrond Company. 1985.
- [46] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. คู่มือเทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ. 2545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้