

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์



นายวศิน จิรไพศาลกุล  
นางสาววิณณา ทรัพย์สภาพ  
นางสาวอ้ออำไพ ใจบุญ

มท.  
๑๖๕๗๗  
๒๕๔๗

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 62137  
วัน,เดือน,ปี 31 ก.ค. 2549

b. 11610098  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of Porous Pipes Made from  
Reclaimed Rubber and Ground Rubber Tire (GRT)



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement  
for the Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษเรื่อง** การศึกษาท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์  
**นักศึกษา** นายวศิน จิรไพศาลกุล  
 นางสาววิณณา ทรัพย์สภาพ  
 นางสาวอ้ออำไพ ใจบุญ  
**ภาควิชา** เคมี  
**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด  
**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** นางสาวสุนา แจ่มเหมือน

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี	
กรรมการ	ผศ.ดร.ปยุตธมา ศิริพันธ์โนน	
กรรมการ	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	

  
 .....  
 (ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี)  
 หัวหน้าภาควิชาเคมี

**ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์	
นักศึกษา	นายวศิน	จิรไพศาลกุล
	นางสาววัฒนนา	ทรัพย์สภาพ
	นางสาวอ้ออำไพ	ใจบุญ
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2547	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นางสาวสุมนา แจ่มเหมือน	

#### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาท่อน้ำซึม (Porous pipes) ที่เตรียมจากยางรีเคลม (Reclaimed rubber) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารไดโนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) เป็นสารให้ฟองและสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำการเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบความร้อน ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ ปริมาณเขม่าดำ และปริมาณสารให้ฟอง รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต สมบัติของท่อน้ำซึมที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งกดของวัสดุ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีจุดสูงสุดที่ปริมาณเขม่าดำรวม 70 phr จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง ความแข็งแรงฉีกขาด และร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง ส่วนความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกัน และอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการศึกษา พบว่าท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:เขม่าดำ เท่ากับ 50:50:20 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 2 และ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 40 และ 20 นาที ตามลำดับ มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกัน เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานทางด้านการเกษตรกรรม และมีต้นทุนการผลิตต่ำคือ 18.18 13.40 และ 9.51 บาทต่อหนึ่งเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Study of Porous Pipes Made from Reclaimed Rubber and Ground Rubber Tire (GRT)
Students	Mr. Wasin Jirapaisankul Miss Wannana Sapsapap Miss Or-ampai Jaiboon
Department	Chemistry
Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2004
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr.Ittipol Jangchud
Special Project Co-advisor	Miss Sumana Jammuan

#### ABSTRACT

This special project studied of porous pipes made from reclaimed rubber and ground rubber tire (GRT) using dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT) as a blowing agent and urea compound as a kicker. The mixtures were compounded by a two-roll mill, extruded into porous pipes by a single screw extruder and vulcanized at 160 °C by a hot air oven. Factors affecting porous pipe properties were studied, such as %carbon black loading, blowing agent loading and cost analysis. Porous pipe properties were then characterized, such as mechanical, physical, morphological and water permeation rate properties. When carbon black loading was increased, it was found that tensile strength, modulus at 100% and hardness were increased up to an optimum point at 70 phr after which these properties deteriorated. %Elongation and tear strength were increased with increasing carbon black loading. Other properties such as density was stable and water permeation rate was increased with increasing carbon black loading. Porous pipe made from reclaimed rubber:GRT:C-black ratio of 50:50:20 then %blowing agent loading were 1, 2 and 3, vulcanized for 60,40 and 20 minutes, respectively. These had similarly mechanical, physical and water permeation rate properties and suitable for agricultural applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The cost of the porous pipes were about 18.18, 13.40 and 9.51 baht per one meter, respectively.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้ จะสำเร็จลุล่วงมิได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่คณะผู้จัดทำจากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และคุณสุมนา แจ่มเหมือน จากสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภาวรัตน์ รักชลธี และ ผศ.ดร.ปณณมา ศิริพันธ์โนน ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.นุชนาฏ ญ ระนอง จากสำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร และภาควิชาเคมี สจล. ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางรีเคลม และผงยางรถยนต์

ขอขอบคุณ เพื่อนทุกคนที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้จัดทำ จนประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

วศิน จิรไพศาลกุล

วิณณนา ทรัพย์สภาพ

อ้ออำไพ ใจบุญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators).....	17
2.3.3.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO).....	17
2.3.3.2 กรดไขมัน (Fatty acid).....	17
2.3.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant).....	17
2.3.4.1 สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant).....	17
2.3.4.2 สารป้องกันโอโซน (Antiozonant).....	18
2.3.5 สารตัวเติม (Fillers).....	18
2.3.5.1 เขม่าดำ (Carbon black).....	18
2.3.5.2 ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง.....	19
2.3.6 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids).....	19
2.3.6.1 เปปไทเซอร์ (Peptizers).....	19
2.3.6.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	20
2.3.7 สารให้ฟอง (Blowing agent).....	20
2.3.7.1 Dinitrosopentamethylene Tetramine (DNPT หรือ DPT)..	23
2.3.8 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator).....	23
2.4 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular rubber).....	25
2.5 เครื่องอัดรีดสำหรับยาง (Rubber extruder).....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
2.7 ท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า.....	35
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>39</b>
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	39
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.4 วิธีการทดลอง.....	44
3.4.1 การบดผสมยาง.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การศึกษาอุณหภูมิเชื่อมโยงตัวอย่าง.....	44
3.4.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	44
3.4.4 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซีม.....	52
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....</b>	<b>55</b>
4.1 การศึกษาหาอุณหภูมิเชื่อมโยงตัวอย่าง.....	55
4.2 ผลของปริมาณเขม่าดำ.....	56
4.2.1 หาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสม.....	56
4.2.2 หาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสม.....	65
4.3 ผลของปริมาณสารให้ฟอง.....	72
4.3.1 หาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสม.....	72
4.3.1.1 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1.....	73
4.3.1.2 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2.....	77
4.3.1.3 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3.....	81
4.3.2 หาปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่เหมาะสม.....	87
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	90
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>95</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	101
ภาคผนวก ข การหาปริมาณเขม่าดำรวม.....	103
ภาคผนวก ค การหาความยาวท่อน้ำซีมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณการนำเศษยางที่ใช้แล้วกลับมาใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ของประเทศอังกฤษ....	2
2.1 ตัวอย่างชนิดของสารให้ฟองที่เหมาะสมกับการใช้งานต่าง ๆ.....	22
2.2 รายละเอียดท่อฟอกอากาศของบริษัท Leaky Pipe Systems.....	36
2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky Pipe Systems.....	37
2.4 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Micro-flo Industries.....	38
3.1 สมบัติบางประการของยางรีเคลมเกรด UCD-103 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	41
3.2 สมบัติบางประการของ DNPT ที่ใช้ในงานวิจัย.....	42
3.3 สมบัติบางประการของ Urea ที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.4 การรายงานผลของลักษณะรอยแตก.....	51
3.5 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ.....	54
4.1 ความต้านทานต่อโอโซนของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:C-black (50:50:20) เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ต่างกัน.....	87
4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: DNPT:C-black (50:50:1:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที.....	91
4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: DNPT:C-black (50:50:2:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที.....	92
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: DNPT:C-black (50:50:3:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที.....	93
4.5 ตัวอย่างสมบัติบางประการของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	1
1.2	3
1.3	4
1.4	4
(ก) ลักษณะการซีมน้ำของท่อน้ำซีม	4
(ข) การนำไปใช้ในงานด้านเกษตรกรรม	4
2.1	6
2.2	8
2.3	10
2.4	11
2.5	12
2.6	14
2.7	14
2.8	15
2.9	23
2.10	24
2.11	26
2.12	27
2.13	28
3.1	40
3.2	45
3.3	46
3.4	47
3.5	48
3.6	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 หัวทดสอบการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด.....	50
3.8 เครื่องทดสอบความต้านทานไอโซน.....	51
3.9 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม.....	52
4.1 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	56
4.2 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	57
4.3 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	57
4.4 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	58
4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	58
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการ.....	60
4.7 SEM Micrographs แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:C-black (50:50:20) (ก) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที (ข) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที (ค) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที.....	62
4.8 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	63
4.9 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	64
4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน.....	66
4.12 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน.....	67
4.13 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน.....	67
4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน.....	68
4.15 ผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติของยาง.....	69
4.16 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน.....	70
4.17 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน.....	71
4.18 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	73
4.19 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	74
4.20 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	74
4.21 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	75
4.22 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	75
4.23 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	77
4.25 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	78
4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	78
4.27 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	79
4.28 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	79
4.29 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	80
4.30 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	81
4.31 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	82
4.32 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	82
4.33 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	83
4.34 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์ ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	83
4.35 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	84
4.36 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.37 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	86
4.38 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:C-black (50:50:20) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ต่างกัน.....	88
4.39 SEM Micrographs แสดงลักษณะวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:C-black (50:50:20) (ก) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที (ข) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที (ค) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที.....	89
ก.1 เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT.....	102
ก.2 เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ที่มี Urea เป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง.....	102

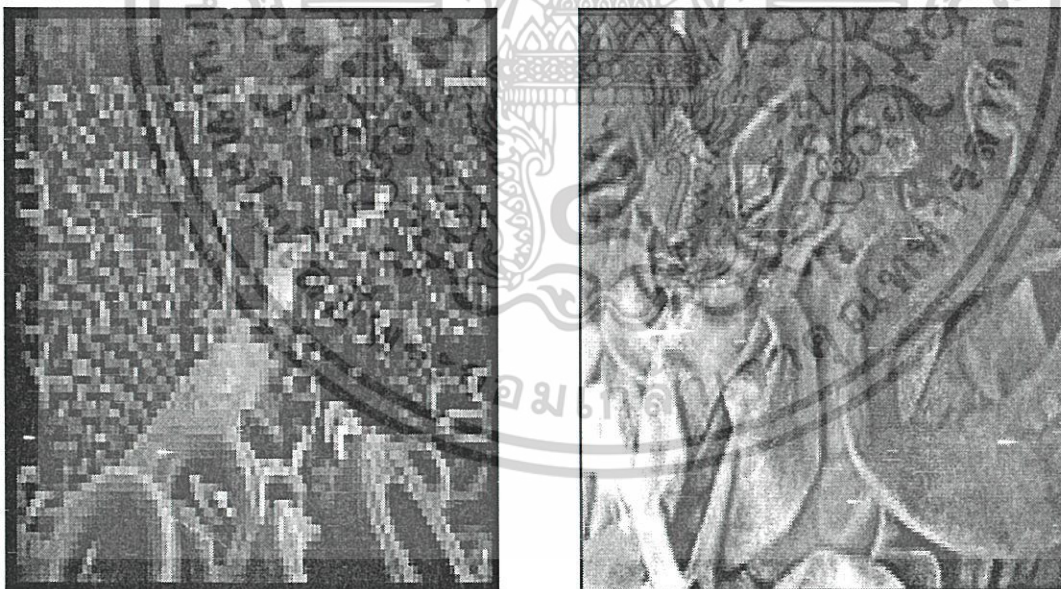
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติ และส่งออกในรูปของยางดิบมากที่สุดในโลก รวมถึงมีการส่งออกในรูปของผลิตภัณฑ์ยางมากขึ้น โดยในช่วง 6 เดือนแรกของปี พ.ศ.2547 มีปริมาณการผลิตประมาณ 243,485 ตัน มีพื้นที่ปลูกยางมากกว่า 12 ล้านไร่ [1] ทั่วโลกมีปริมาณการบริโภคทรัพยากรยางสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งมากกว่าร้อยละ 60 ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ที่ผลิตได้ในโลกใช้ในกรณีผลิตยางรถยนต์ (Tires) [2] ยางรถยนต์ที่มีอายุการใช้งานมากขึ้น ย่อมจะเสื่อมสภาพไม่สามารถใช้งานได้อีก กลายเป็นยางเหลือทิ้งไม่มีประโยชน์จำนวนมาก (รูปที่ 1.1) เช่น ในประเทศอังกฤษมียางที่เหลือทิ้งมากกว่า 100,000 เส้นต่อวัน หรือ 40 ล้านเส้นต่อปี [3]



รูปที่ 1.1 เศษยางล้อยที่ใช้แล้ว [4, 5]

จากเศษยางที่เหลือทิ้งปริมาณมาก จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการจัดการด้วยวิธีการที่ถูกต้อง เพื่อป้องกันการทำลายสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเศษยางประกอบด้วยยางที่เชื่อมโยงเป็นพอลิเมอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำพวกเทอร์โมเซต (Thermosets) เกิดการย่อยสลายได้ยากตามกระบวนการทางธรรมชาติ จึงมีการจัดการกับเศษยางด้วยวิธีการต่าง ๆ (รูปที่ 1.2) คือ การหล่อตอก (Retreading) นำไปเป็นเชื้อเพลิง การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) การนำวัสดุมาใช้ใหม่ (Material recycling) และการนำไปถมพื้นที่ ดังตารางที่ 1.1

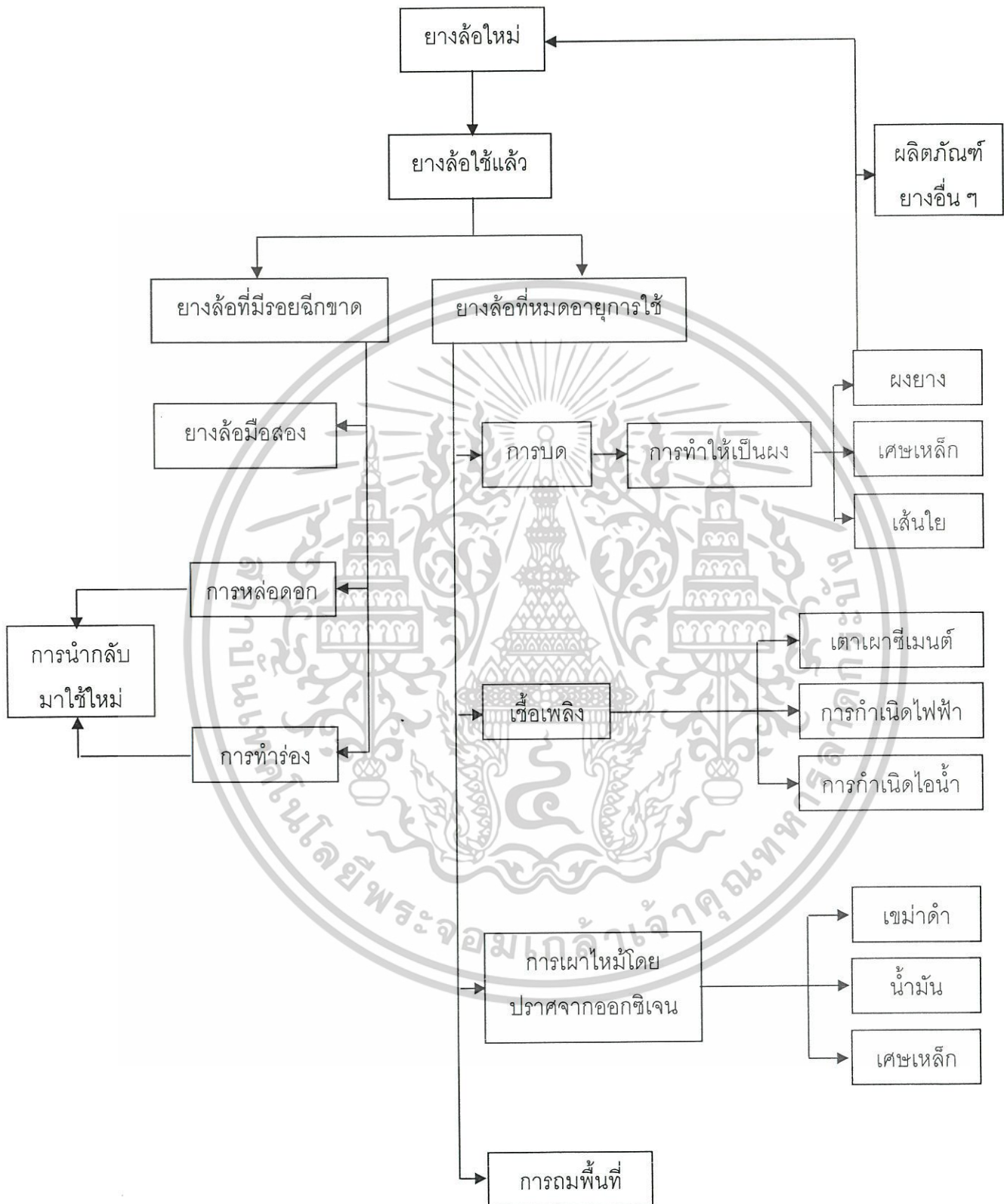
ตารางที่ 1.1 ปริมาณการนำเศษยางที่ใช้แล้วกลับมาใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ของประเทศอังกฤษ [3]

วิธีการจัดการ	ปริมาณ (ร้อยละ)
การหล่อตอก	26
การนำกลับมาใช้ใหม่ การนำวัสดุมาใช้ใหม่ และนำไปเป็นเชื้อเพลิง	46
การถมพื้นที่	28

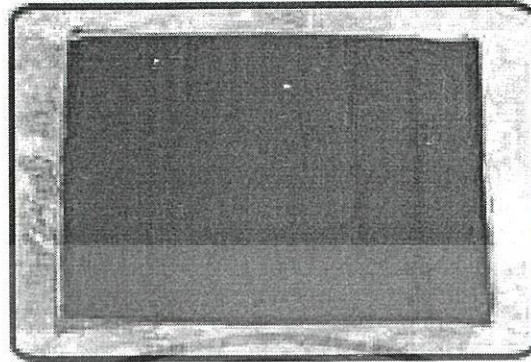
ในบางประเทศวิธีการจัดการโดยการนำไปถมพื้นที่นั้นถือว่าเป็นเรื่องผิดกฎหมาย เนื่องจากทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพอนามัย เช่น การแพร่ของยุงและเชื้อโรค ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น สารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในสูตรยางเกิดการแพร่สู่สภาวะแวดล้อม จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าปริมาณการถมพื้นที่มีมาก และก่อให้เกิดปัญหาดังที่กล่าวมาแล้ว น่าจะมีความเป็นไปได้ในการจัดการกับเศษยางด้วยวิธีการถมพื้นที่ให้น้อยลง แต่วิธีการนำวัสดุมาใช้ใหม่เพิ่มขึ้น ด้วยการทำให้เศษยางที่นำกลับมาใช้ใหม่สามารถที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ เช่น นำเศษยางมาผสมกับพอลิสไตรีน (Polystyrene) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่าพอลิสไตรีนชนิดทนการกระแทกได้สูง (High impact polystyrene, HIPS) เพื่อปรับปรุงด้านทนแรงกระแทกเพิ่มความยืดหยุ่น เพื่อนำมาผลิตเป็นถ้วยผนังบางและกล่องบรรจุหุรี [6] หรือการนำเศษยางมาทำยางรีเคลม (Reclaimed rubber) (รูปที่ 1.3) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในรูปแบบต่าง ๆ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีความจำเป็นในการใช้น้ำเป็นอย่างมาก แต่ปัจจุบันมักมีการตัดไม้ทำลายป่า ล่าสัตว์ และจิตสำนึกในการใช้น้ำของคนไทยน้อยลง จึงส่งผลให้เกิดการขาดแคลนน้ำตามมาอย่างรุนแรง ซึ่งระบบการให้น้ำของเกษตรกรไทยในปัจจุบันจะใช้น้ำในปริมาณมาก และเป็นการให้น้ำเฉพาะบริเวณ จึงเป็นการใช้น้ำที่สิ้นเปลืองและไม่คุ้มค่า ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ระบบการซึมผ่านวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเชื่อมต่อกันจำนวนมาก หรือที่เรียกว่า “ท่อน้ำซึม” (รูปที่ 1.4)

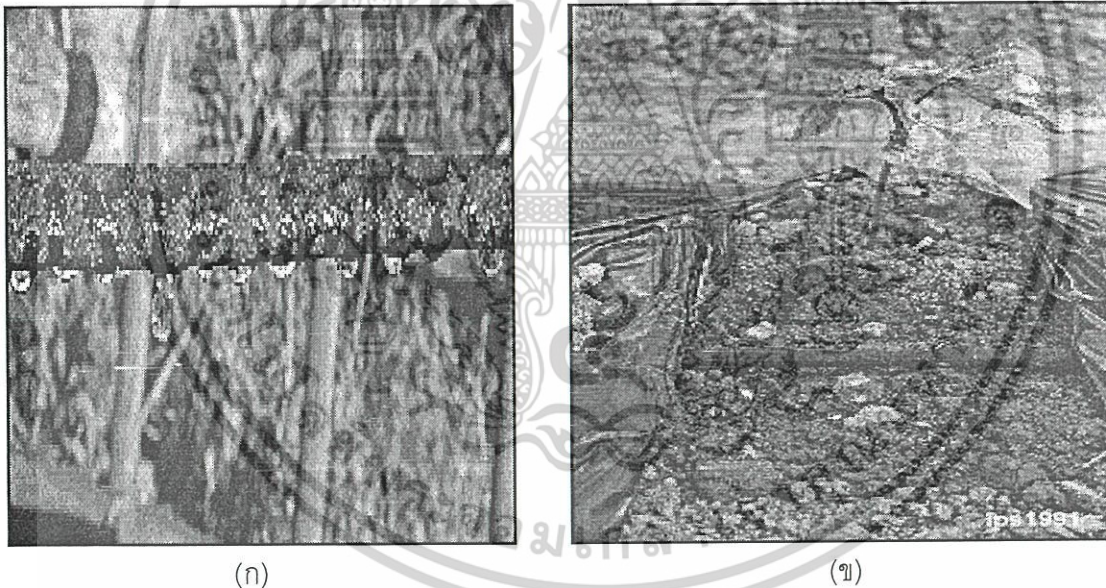
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 1.2** การจัดการกับเศษยางล้อยู่แล้ว [7]  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 ยางรีเคลม [8]



รูปที่ 1.4 (ก) ลักษณะการซึมน้ำของท่อน้ำซึม (ข) การนำไปใช้ในงานด้านเกษตรกรรม [9]

งานวิจัยนี้เสนอที่จะแก้ไขปัญหาข้างต้น โดยการพัฒนาท่อน้ำซึม (Porous pipe) ที่เตรียมจากยางรีเคลม (Reclaimed rubber) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางเกษตรกรรม ทดแทนระบบน้ำหยดซึ่งให้น้ำเฉพาะบริเวณและระบบน้ำต้น (Sprinkler) ซึ่งต้องใช้ความดันสูงและน้ำปริมาณมาก เป็นผลให้เกิดการกัดเซาะของดิน ท่อน้ำซึมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นท่อสายยางที่ประกอบด้วยยางรถยนต์เป็นองค์ประกอบหลัก และมียางรีเคลมทำหน้าที่เป็นสารเชื่อม (Binder) โดยใช้สารไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (N,N'-Dinitrosopentamethylene tetramine, DNPT) ทำหน้าที่เป็นสารให้ฟอง (Blowing agent) ท่อมีความยืดหยุ่น และสามารถโค้งงอได้ มีโครงสร้างเป็นช่องเล็ก ๆ เชื่อมต่อกันจำนวนมากซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านออกมาได้ในอัตราคงที่ที่ความดันต่ำและปริมาณน้ำน้อย ทำให้สามารถให้น้ำแก่รากได้โดยตรงโดยไม่รบกวนรากและไม่เกิดการกัดเซาะของดิน นอกจากนี้สามารถให้น้ำได้โดยไม่จำกัดขนาดพื้นที่ เป็นการประหยัดพลังงาน

## 1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์
2. เพื่อศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ ปริมาณเขม่าดำ และปริมาณสารให้ฟอง
2. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมที่เตรียมได้ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ
3. ศึกษาต้นทุนในการผลิต

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตท่อน้ำซึมให้มีประสิทธิภาพดี ต้นทุนการผลิตต่ำ
2. สามารถใช้น้ำในทางการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพโดยนำไปทดแทนระบบน้ำหยดและระบบน้ำดิน
3. สามารถลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยนำผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้แล้วมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์สูงสุด
4. สามารถนำความรู้ที่ได้มาพัฒนาอุตสาหกรรมยาง เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้แล้ว

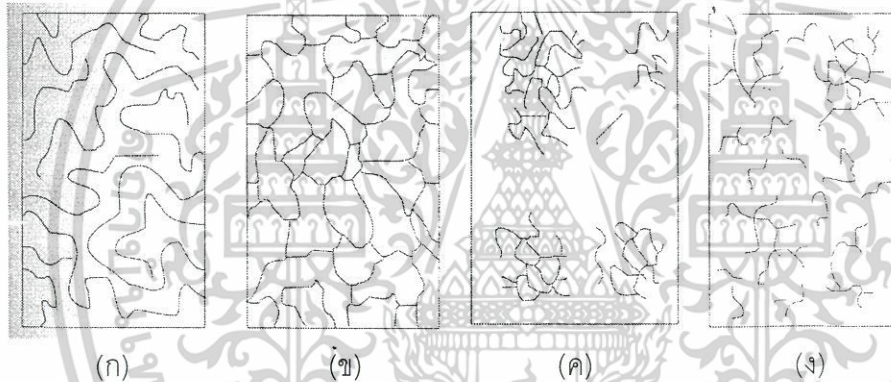
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) [10-12]

ยางรีเคลมเป็นยางที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ใช้แล้ว เช่น ยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพและผลิตภัณฑ์ยางที่เสียระหว่างกระบวนการผลิต ยางเหล่านี้เป็นยางที่คงรูปแล้ว (Vulcanized rubber) มีการเชื่อมโยงแบบ 3 มิติ การทำยางรีเคลมเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของยางให้เป็นโครงสร้างสายโซ่ 2 มิติ หรือดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) แสดงโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง (ก) ยางที่ไม่ได้เชื่อมโยง (ข) ยางที่เชื่อมโยงแล้ว (ค) เศษยาง (ง) ยางรีเคลม [11]

ยางรีเคลมสามารถทำได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ โดยในขั้นตอนแรกจะทำการกำจัดวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางออกให้หมด เช่น โลหะและเส้นใยต่าง ๆ หลังจากนั้นทำการบดให้เป็นเศษ (Crumb) ขนาด 20-30 เมช (Mesh) แล้วผ่านสู่กระบวนการโดยใช้ความร้อน สารเคมี ร่วมด้วยวิธีเชิงกล โดยในแต่ละกระบวนการจะมีการเติมสารเคมีที่ใช้ในการช่วยบดยางรีเคลม ได้แก่ กลุ่มเปปไทซ์ (Peptizing agent) และกลุ่มฟีนอลิกไดซัลไฟด์ (Phenolic-disulfides) เช่น เพนตะคลอโรโรโอฟีนิล (Pentachlorothiophenol:PCTP) ไดเบนซามิเดไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (Dibenzamidediphenyl disulfide) นอกจากนี้ยังอาจใช้น้ำมัน (Reclaiming oils) เช่น น้ำมันสน น้ำมันดิน เพื่อเป็นสารทำให้นิ่ม สามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น 3 กระบวนการหลักที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ดังนี้

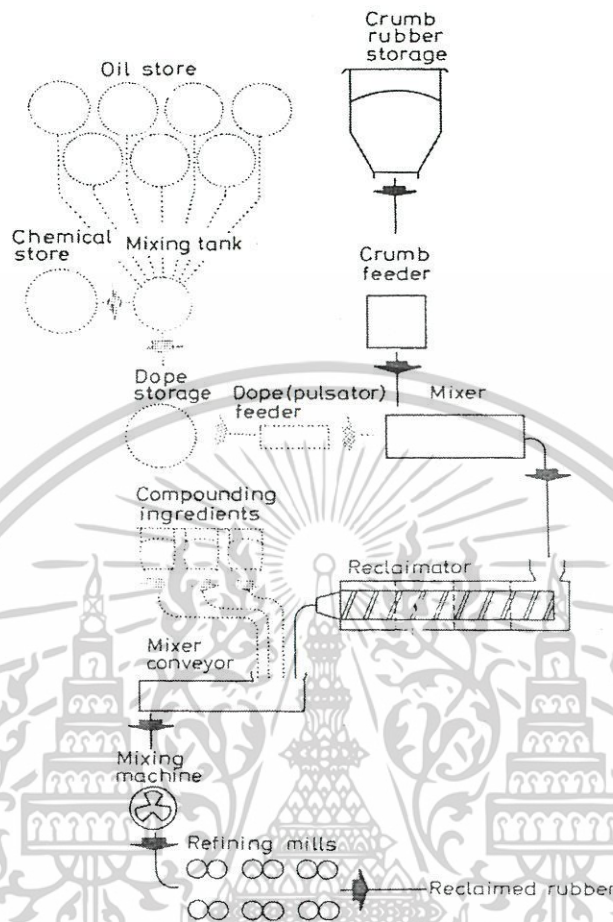
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Pan process หรือ heater process เป็นกระบวนการไม่ต่อเนื่อง โดยผสมเศษยางกับน้ำมัน แล้วนำไปเติมลงในเครื่องอบความร้อนสูงด้วยไอน้ำ ความดันประมาณ 100-250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลานาน 5-12 ชั่วโมง แล้วเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพต่อไป

2. Digester process เป็นกระบวนการไม่ต่อเนื่อง โดยผสมเศษยางกับน้ำ น้ำมัน และสารเติมแต่งอื่น ๆ แล้วนำไปเติมลงในหม้ออัดความดันที่มีการปั่นกวน และให้ความร้อนด้วย ไอน้ำ (Digester) ซึ่งจะทำให้อนุหภูมิมีความสม่ำเสมอ และรักษามวล โดยจะให้ความร้อนที่อนุหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4-10 ชั่วโมง ด้วยการปั่นกวนอย่างต่อเนื่อง แล้วเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพต่อไป

3. Reclaimator process เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง โดยผสมเศษยางกับน้ำมัน แล้วนำไปเติมลงในเครื่องรีเคลม (Reclaimator) ที่มีลักษณะคล้ายเครื่องอัดรีด แบ่งเป็นส่วน ๆ ที่มีอนุหภูมิแตกต่างกัน และส่วนปลายสุดจะมีอนุหภูมิที่เย็น สกรูจะมีการออกแบบเป็นพิเศษ และมีช่องว่างระหว่างสกรูกับกระบอกใส่สกรูน้อย อนุหภูมิที่ใช้ประมาณ 200-260 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ยางรีเคลมที่ออกมาจากกระบวนการนี้จะเย็น แล้วเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพต่อไป แผนภาพการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.2 กระบวนการนี้จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมออัตราการผลิตสูง และไม่เป็นที่ต้องถึงเวดล้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภาพการทำงานของกระบวนการ Reclaimator process [12]

### 2.1.1 ประเภทของยางรีเคลม

สามารถแบ่งออกเป็นหลัก ๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. Whole tyre reclaim ผลิตจากส่วนที่เป็นยางของล้อทั้งหมด ได้แก่ เนื้อยางร้อยละ 45 โดยน้ำหนัก และอีกร้อยละ 55 โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย เขม่าดำ สารเติมแต่งประเภทแร่และสารทำให้เหนียว โดยกระบวนการทางอุตสาหกรรมไม่ทำให้ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงมากนักแต่จะต้องพิจารณาถึงยางที่นำมาผลิต ยางรีเคลมชนิดนี้มีปริมาณมากที่สุด

2. Minimum staining reclaim เป็นยางรีเคลมที่มีความปนเปื้อนน้อยกว่า Whole tyre reclaim ความปนเปื้อนที่น้อยนี้เนื่องจากการเติมถ่านกัมมันต์ น้ำมันที่ปราศจากการปนเปื้อน และการเลือกยางที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ที่สูง

3. Drab and coloured reclaims เป็นยางรีเคลมที่มีสีน้ำตาลอมเหลือง ผลิตจากเศษยางที่

ผสมสารตัวเติมสีไม่ดำ โดยใช้กระบวนการ Digester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการนำยางรีไซเคิลไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพไม่สูงมากนัก โดยอาจใช้ร่วมกับยางใหม่หรือยางรีไซเคิลเพียงอย่างเดียว และยังมีให้ข้อได้เปรียบในด้านต้นทุนการผลิต การลดวัตถุประสงค์ เช่น การนำมาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์ (Asphalt) ที่ใช้ลาดถนนและทำเป็นสารตัวเติม (Fillers) ในพื้นรองเท้า (Shoe soles) หรือขอบกันซึม (Sealing profiles) เป็นต้น

## 2.2 ผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) [13-14]

ผงยางเป็นวัตถุดิบส่วนหนึ่งที่ได้ระหว่างกระบวนการผลิตยางรีไซเคิล (Reclaimed rubber) โดยผงยางที่ทำการผลิตส่วนใหญ่จะได้จากยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพแล้ว และมีบางส่วนที่เป็นของเสียในกระบวนการผลิตนั้น สามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ

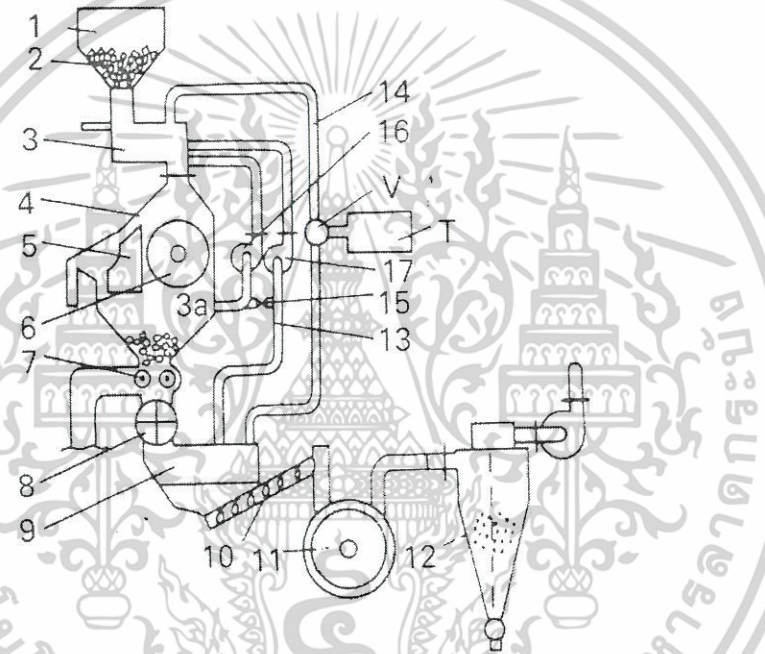
### 2.2.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

เทคนิคนี้ทำโดยทำให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) โดยแช่ยางที่เชื่อมโยงแล้วในไนโตรเจนเหลว จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบลูกโลหะกลม (Ball mill) จะได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 30-100 เมช (Mesh) ขนาดอนุภาคผงยางที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่แช่ในไนโตรเจนเหลวและขนาดของตะแกรงร่อน (Screen) ที่อยู่ในเครื่องบด แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปราคาของผงยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง มีรายงานว่าการใช้ผงยางประมาณ 5-10 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (phr) ในยางล้อรถโดยสารและรถบรรทุก โดยผงยางชนิดนี้เหมาะสมกับการใช้งานชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถแปรรูปได้หลายลักษณะดังนี้

- การอัดรีด (Extrusion) การใช้ผงยางขนาด 80-100 เมช สามารถแก้ปัญหาเรื่องรอยแตกและผิวขรุขระได้ ส่วนขนาดอนุภาค 50-60 เมช ก็สามารถใช้ได้ขึ้นอยู่กับความต้องการความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์ ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณร้อยละ 5
- การรีดแผ่น (Calendering) การใช้ผงยางขนาด 80-100 เมช จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขนาด 0.06 นิ้วหรือน้อยกว่า มีผิวเรียบสูงสุด ถ้าไม่ต้องการความเรียบของผิวสามารถใช้ขนาด 30-60 เมช ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณร้อยละ 10
- การอัดขึ้นรูป (Molding) สามารถใช้ผงยางได้ทุกขนาด เนื่องจากช่วยในการไล่อากาศที่ขังในยางขณะขึ้นรูป
- การไหลขณะขึ้นรูป (Mold flow) โดยทั่วไปผงยางจะช่วยปรับปรุงการไหลขณะอัดขึ้นรูปเกิดการหดตัว (Shrinkage) น้อย การหดตัวลดลงเมื่อปริมาณผงยางมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือในการผลิตผงยางชนิดนี้มีราคาถูก ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมการไหลดีกว่าผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) สถาบันวิทยาของพื้นผิวผงยาง ทำให้สามารถกำจัดอากาศที่ขังอยู่ในยางที่ยังไม่เกิดการเชื่อมโยงออกไปได้ง่าย โดยเฉพาะยางล้อรถ ซึ่งมีแนวโน้มของการพองลดลงหลังเกิดการเชื่อมโยง และผงยางจะถูกออกซิเดชันที่ผิวน้อยลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งแตกต่างจากผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้องที่มีพื้นที่ผิวสูง (10-30 เมช)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการบดยางที่อุณหภูมิต่ำ [14]

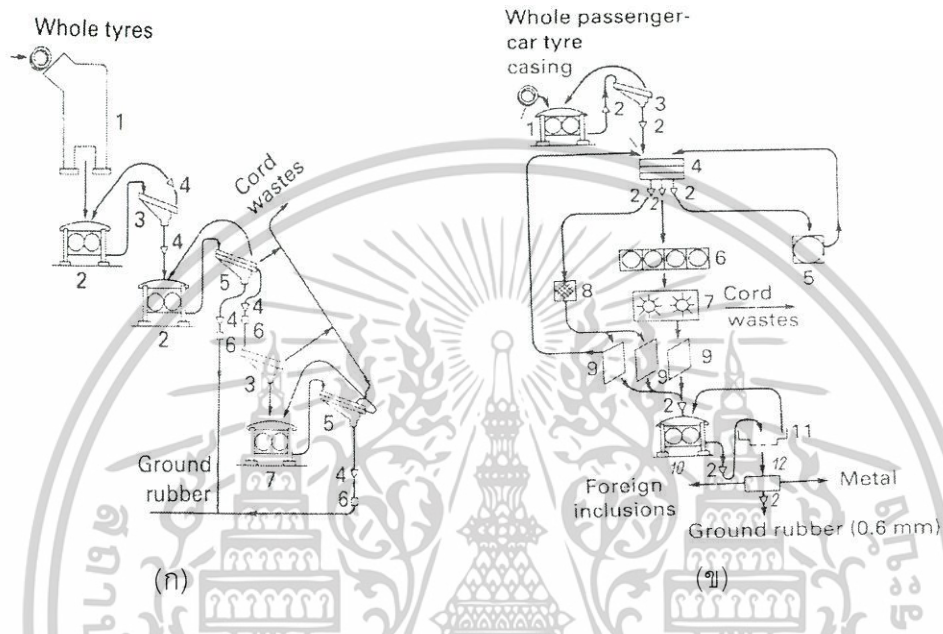
### 2.2.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding)

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (Dry ambient grinding) การผลิตจะทำโดยนำยางที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วบดด้วยเครื่องบดฟันปลา (Serrated grinder) ได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ประมาณ 10-30 เมช และเกิดกึ่ง (Pendant) ขึ้นที่ผิวจำนวนหนึ่ง ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับยางดิบได้ดี แสดงดังรูปที่ 2.4 ส่วนใหญ่ใช้ในยางล้อและผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 5-20 ส่วนในร้อยส่วนของยาง เมื่อขนาดอนุภาคผงยางเพิ่มขึ้น ความเรียบของผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

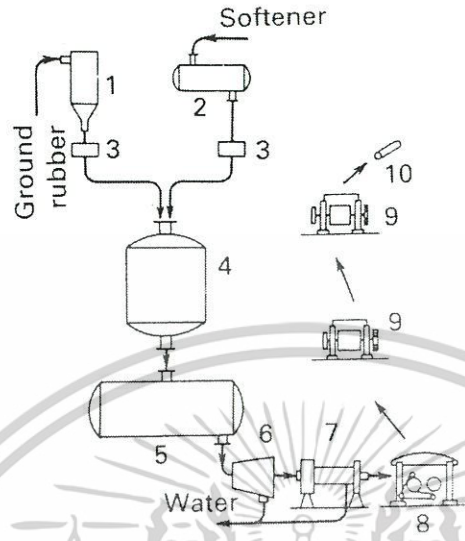
ผลิตภัณฑ์จะลดลง ถึงแม้จะมีชื่อว่า "การบดที่อุณหภูมิห้อง" แต่ในทางปฏิบัติจะให้ความร้อนระหว่างการผลิต การให้ความร้อนสูงจะทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการสลายตัว



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการบดยางที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (ก) ประเทศสหรัฐอเมริกา (ข) สหราชอาณาจักรอังกฤษ [14]

2. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก (Wet ambient grinding) เป็นวิธีปรับปรุงการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง ซึ่งลดขนาดอนุภาคผงยางโดยการบดในน้ำ แสดงดังรูป 2.5 ขนาดอนุภาคขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการบด อนุภาคผงยางที่ได้มีขนาด 400-500 เมช ข้อดีของขนาดอนุภาคเล็กคือทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการอัดรีดและการรีดแผ่นมีผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการบดยางที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก [14]

### 2.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for rubbers) [2, 15-17]

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องมีการ "ออกสูตรยาง" (Rubber formulation) ซึ่งเป็นการกำหนดชนิดและปริมาณของสารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมเข้ากับยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ส่วนประกอบของสูตรผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ สามารถแบ่งเป็นกลุ่มสารหลักได้ดังต่อไปนี้

#### 2.3.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent)

ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำใหยางซึ่งเป็นวัสดุอ่อนนิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด และไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง ไหลได้เมื่อกึ่งไว้นาน กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนต่ออุณหภูมิ สารเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization)

การเชื่อมโยงยางด้วยกำมะถัน เป็นวิธีที่นิยมที่สุดเนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นยางที่ไม่อิมิตัว มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) และยางบิวตะไดอีน (BR) ฯลฯ จึงต้องอาศัยการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) กำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิดคือ

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปผลึกรวมบิก (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม ( $S_8$ ) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 150 องศาเซลเซียส เป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถันประมาณ 1-3 ส่วนในร้อยละของยาง ถ้าใส่กำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการ "บลูม" (Bloom) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำมะถันเกิดการแพร่จากภายในออกมาสะสมเป็นผลึกที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์เห็นเป็นรอยคราบสีเหลือง

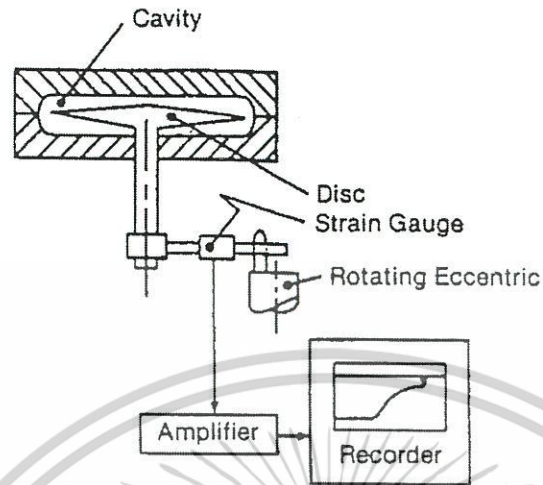
2. กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ละลายในตัวทำละลายและยาง ผสมเข้ากับยางได้ยากกว่ากำมะถันชนิดละลาย แต่เมื่อผสมเข้ากันแล้วจะเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนกับยาง ทำให้ไม่เกิดการบลูม จึงนิยมใช้กำมะถันชนิดนี้เมื่อต้องการใส่กำมะถันในปริมาณมาก เช่น ยางชนิดแข็งมาก ข้อจำกัดของกำมะถันชนิดนี้คือ มีราคาแพง นอกจากนี้อาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ที่อุณหภูมิสูงเกิน 100 องศาเซลเซียส จึงต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไป ถ้าต้องการใช้ประโยชน์กำมะถันชนิดไม่ละลาย

### 2.3.1.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeters for rubber compounds)

สามารถแบ่งเครื่องวัดการเชื่อมโยงยางออกเป็น 2 ชนิด คือ

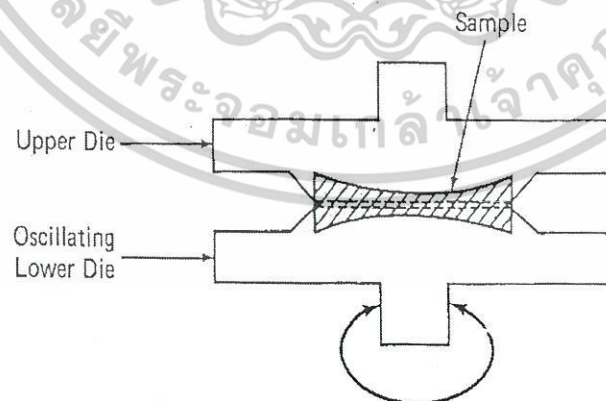
1. เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometers, ODR) เป็นเครื่องที่สามารถวัดการเชื่อมโยงของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางและห้องปฏิบัติการทดสอบยางทั่วไป เพื่อใช้ในการหาสภาวะการเชื่อมโยงยางที่เหมาะสมหาเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงานคือการตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ของจานรูปโคนครึ่งวงกลม (Biconical disc) หมุนสั้นอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวัดการไหลแบบจานสั้น [2]

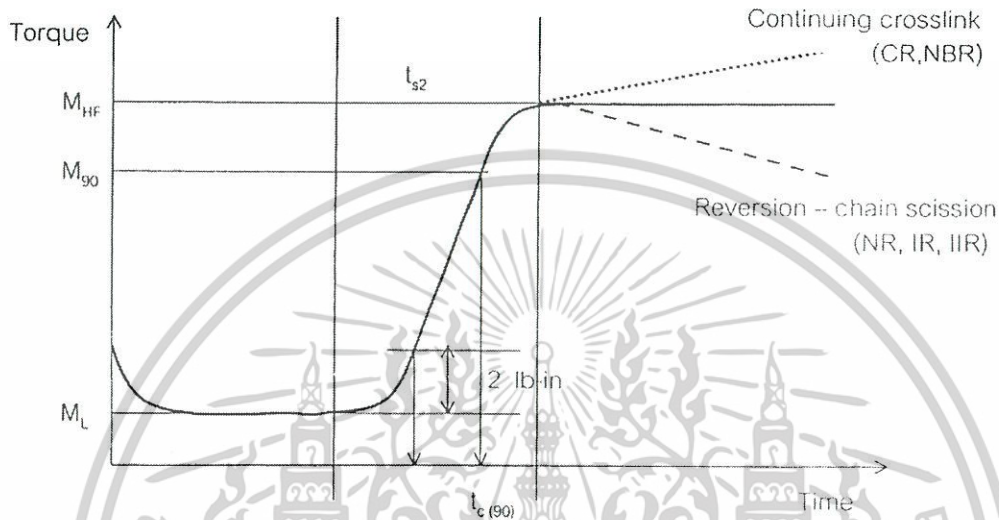
2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทคุณสมบัติอย่างรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้การเชื่อมโยงได้เร็วกว่า ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ซึ่งให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ให้ข้อมูลมากขึ้นดีกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $E''$ ) อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ Phase angles หลักการทำงานคือ จานด้านล่าง (Lower die) จะหมุนสั้นไปมาทำมุม  $\pm 1,3$  หรือ 5 องศา ที่ความเร็ว 1.7 เฮิรตซ์ จานด้านบนจะอยู่กับที่และวัดแรงบิด (Torque) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการเชื่อมโยงยางสามารถแสดงดังรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งเรียกว่ากราฟเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) [2]

ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่าง ๆ ในกราฟการเชื่อมโยงดังนี้

$M_L$  = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

$M_{HF}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

$M_{HR}$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)

$M_H$  = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)

$t_{s2}$  = เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือ เวลาสกอร์ช (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว (lb-in) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ )

$M_{90}$  = ค่าแรงบิดที่ร้อยละ 90 ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก

$$M_{90} = M_L + 0.9(M_{HF} - M_L)$$

$t_{c(90)}$  = เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยงร้อยละ 90 ( $M_{90}$ ) นิยามเท่ากับเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเชื่อมโยงยาง (Optimum cure time)

CRI = ดัชนีอัตราเร็วเชื่อมโยง (Cure rate index) คำนวณได้จากสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือ สารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาการเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กัมมะถันในปริมาณที่น้อยลง

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงสามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM เป็น 6 กลุ่มดังนี้

1. ซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamide)
2. ไทเอโซล (Thiazoles)
3. กัวนิดีน (Guanidines)
4. ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates)
5. ไทยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides)
6. ไทยูเรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้มากกว่าหนึ่งชนิดรวมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าเป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerators) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนยจิสติก” (Synergistic effects) ทำให้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

#### 2.3.2.1 CBS (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide)

เป็นสารเร่งที่อยู่กลุ่มซัลเฟนาไมด์ ซึ่งเป็นสารเร่งที่มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) นานกว่าไทเอโซล การใส่ซัลเฟนาไมด์เพิ่มขึ้น ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงสั้นลงบ้าง แต่ทำให้มีเวลาเชื่อมโยง (Cure time) สั้นมากและมอดุลัสสูงขึ้นมากด้วย เนื่องจากซัลเฟนาไมด์มีเวลาเริ่มเชื่อมโยงนานทำให้เกิดการเชื่อมโยงในแม่แบบดี เพราะมีเวลาให้ยางไหลได้เต็มแม่แบบและไม่เหมาะแก่การเชื่อมโยงแบบใช้อากาศร้อน แต่เมื่อนำซัลเฟนาไมด์ผสมกับเตตระเมทิลไทยูเรมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram monosulfide, TMTM) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

#### 2.3.2.2 TMTD (Tetramethyl thiuram disulfide)

TMTD เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มไทยูเรมไดซัลไฟด์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดและนิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มนี้ ยางที่ใช้ไทยูเรมเป็นสารเร่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้หลายวิธี เช่น ใช้เครื่องอบไอน้ำและอากาศร้อน ซึ่งทำให้ง่ายเกิดการจัดเรียงตัวก่อนที่จะเสียรูปในขณะที่เชื่อมโยง ในบางครั้งอาจใช้ไทยูเรมเป็นสารเร่งทุติยภูมิร่วมกับสารเร่งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบันได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

#### 2.3.3.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่เป็นสารอนินทรีย์ที่สำคัญและนิยมใช้ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มอดุลัสจะเพิ่มขึ้นและปริมาณของซิงค์ออกไซด์ที่ให้มีมอดุลัสสูงสุดคือมากกว่า 3 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถใช้ในปริมาณ 1 phr ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีมอดุลัสสูงและมีสีใส

#### 2.3.3.2 กรดไขมัน (Fatty acid)

กรดไขมันเป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ สำหรับสารเร่งการเชื่อมโยงบางตัว เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก กรดลอริก เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดอะลิฟาติกอิ่มตัว ที่มีคาร์บอน 12 ถึง 18 อะตอม ปริมาณการใช้กรดไขมันในยางขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ปริมาณน้อย สำหรับยางธรรมชาติมีกรดไขมันอยู่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งอยู่ในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่มีอยู่ในยางธรรมชาติมีปริมาณต่างกันมาก ซึ่งทำให้เวลาในการเชื่อมโยงต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ในยางธรรมชาติ จะใช้ประมาณ 1-4 phr เพื่อลดเวลาการเชื่อมโยงที่ต่างกัน

### 2.3.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant)

#### 2.3.4.1 สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant)

เป็นสารที่ป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสลายได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ซึ่งออกซิเจนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อมสลายของยาง โดยที่โลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยาง เป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสลายเร็วขึ้น

สารป้องกันการออกซิเดชัน สามารถแบ่งตามสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น 3 ชนิดคือ

1. สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์
2. สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์
3. Imidazyl derivative

### 2.3.4.2 สารป้องกันโอโซน (Antiozonant)

เป็นสารที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ซึ่งจะก่อให้เกิดรอยแตกที่เนือยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ดึงยาง เมื่อนำยางไปยืดไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง ยางชนิดไม่อิ่มตัว เช่น ยางบิวทิล (IIR) หรือยางอีพียาร์ (EPR) สารป้องกันโอโซนที่ดีที่สุดคือ P-Phenylene diamine นอกจากนี้ยังพบว่าขี้ผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax) ยังเป็นสารที่ใช้ป้องกันโอโซนได้ด้วย โดยปริมาณขี้ผึ้งที่ใช้ต้องมากพอที่จะซึมออกมาที่ผิว ซึ่งขี้ผึ้งที่ซึมออกมาที่ผิวจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับผิวยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน

### 2.3.5 สารตัวเติม ( Fillers)

สารตัวเติมเป็นสารที่มีราคาถูก เทียบกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีราคาแพง สามารถใช้ผสมในยางเพื่อเพิ่มปริมาณของยางผสมสูตรหรือผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยางโดยทำให้พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมมีความแข็งแรงสูงขึ้น

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ดินขาว (Clay) ฯลฯ

#### 2.3.5.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก นอกจากนั้นช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่นลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรงได้แก่

1. ขนาด (Size) หรือพื้นที่ผิว (Surface area) ขนาดอนุภาคของเขม่าดำจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว สารตัวเติมยังมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเขม่าดำขนาดเล็ก การผสมเขม่าดำเข้ากับยางยิ่งทำได้ยากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โครงสร้าง (Structure) ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่ออย่าง ส่วนใหญ่จะมีผลทางด้านการแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างมาก จะผสมกระจายในยางได้ดี ทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีด (Extrusion) มีผิวเรียบ แต่ผสมในยางได้ปริมาณน้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างน้อย

3. เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เขม่าดำ ประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณน้อยปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะให้ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน ซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง โดยเขม่าดำที่มีความเป็นด่าง จะเกิดการเชื่อมโยงเร็วกว่าเขม่าดำที่มีความเป็นกรด

4. ความเป็นรูพรุน ความเป็นรูพรุนในเขม่าดำจะมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เพราะรูพรุนนี้จะดูดสารเร่งเข้าไปทำให้การเชื่อมโยงช้าลง

#### 2.3.5.2 ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง

1. ความแข็งแรงดึง เขม่าดำเกือบทุกตัวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่เขม่าดำปริมาณ 40-50 phr จะให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด

2. ความทนทานต่อการขีดถู ขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีผลอย่างมากต่อความทนทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการขีดถูจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคของเขม่าดำเล็กลง โดยที่ปริมาณเขม่าดำ 60 phr จะให้ความทนทานต่อการขีดถูสูงสุด

3. ความแข็งกด (Hardness) ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น และขนาดอนุภาคของเขม่าดำลดลง แต่ความทนทานต่อการฉีกขาด ปริมาณเขม่าดำจะทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง เมื่อใส่เขม่าดำเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการฉีกขาดจะลดลง

#### 2.3.6 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids)

สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือ สารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่าง ๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติใช้ในปริมาณน้อยไม่เกิน 5 phr

##### 2.3.6.1 เปปไทเซอร์ (Peptizers)

เปปไทเซอร์หรือสารตัดสายโซ่ ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ของยางทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความหนืดของยางลดลง เกิดการผสมได้ง่ายขึ้น นิยมใส่เพื่อลดเวลาการบด (Mastication) โดยเฉพาะยางดิบที่แข็งเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณเปปไทเซอร์ที่ใส่ในยางประมาณ 1-3 phr เช่น กรดซัลโฟนิค (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรไทโอฟีโนล (Pentachlorothiophenol) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง ช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทำให้วัสดุมีสมบัติความยืดหยุ่นเป็นอย่างดีขึ้น นิ่มตัวขึ้น พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยาง ไม่แพร่ออกมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ เช่น กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมัน (Oils) สารจำพวก เอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine) ฯลฯ

### 2.3.7 สารให้ฟอง (Blowing agent)

สารให้ฟอง คือ สารที่ใส่เข้าไปในยาง เมื่อให้ความร้อนแก่ยางในขณะทำการเชื่อมยาง โมเลกุลของสารให้ฟองจะสลายตัวให้ก๊าซออกมา ซึ่งทำให้ยางเกิดรูพรุนในรูปของฟองน้ำ (Sponge) หรือยางรูพรุนขนาดเล็ก (Micro-cellular rubber)

สารให้ฟองที่ดีมีลักษณะดังนี้คือ

- ควรปล่อยก๊าซ ออกมาในช่วงอุณหภูมิแคบและแน่นอน เพื่อสามารถควบคุมได้ง่าย และรวดเร็วพอสมควร
- ก๊าซที่ให้ออกมาไม่ควรกัดกร่อนโลหะ เช่น ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ควรเป็นก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- สามารถกระจายและละลายในยางได้ดี
- มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง
- ไม่มีผลต่ออัตราการเชื่อมยาง
- ไม่ควรทำให้ยางหดตัวหรือยุบตัวภายหลังการเชื่อมยาง
- ราคาถูก

สารให้ฟองสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารให้ฟองชนิดอินทรีย์ สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต ซึ่งสารทั้งสามชนิดนี้จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันนิยมใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตมากที่สุด เนื่องจากแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต่างและกรดตามลำดับ ก๊าซเหล่านี้ถ้าหากเก็บอยู่ในยางจะรวมตัวกันได้ ดังนั้นโอกาสของยางที่ขยายตัวจะยุบตัวกลับเล็กน้อยได้ นอกจากนี้ความเป็นต่างทำให้ยางเกิดการเชื่อมยางเร็วขึ้น
2. สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์ ปัจจุบันจะใช้สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์เกือบทั้งหมด เนื่องจากสารอนินทรีย์สามารถละลายในยางได้ดี ทำให้การกระจายของสารให้ฟองเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ฟองอากาศที่อยู่ในยางก็จะกระจายทั่วถึงตลอด สามารถแบ่งออกอีกเป็นกลุ่มตามโครงสร้างดังนี้
  - ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 hydrazide
- สารประกอบไนโตรโซ (N-Nitroso Compounds) เช่น N,N'-Dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT) และ N,N'-Dimethyl- N,N'- Dinitrosophthalamide



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างชนิดของสารให้ฟองที่เหมาะสมกับการใช้งานต่าง ๆ [16]

	Benzene-Sulfohydrazone	Benzene-1,3-disulfohydrazone	Dinitrosopentamethylene tetramine	Azodicarbonylamide
<u>กระบวนการเกิดฟองก๊าซก่อน</u>				
<u>การเชื่อมโยง</u>				
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
<u>กระบวนการเกิดฟองก๊าซหลัง</u>				
<u>การเชื่อมโยง</u>				
ยางรูปพุนขนาดเล็กชนิดนิ่ม <sup>3)</sup>	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดีมาก
พื้นรองเท้าที่มีรูปพุน	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดี
พื้นรองเท้าที่มีรูปพุนขนาดเล็กชนิดแข็ง <sup>4)</sup>	ใช้ได้	ดีมาก	ดีมาก	ดี
ยางอีโบนไทที่มีรูปพุน	ดีมาก	ดี	ดี	ใช้ได้
ชนิดของรูปพุน	ละเอียดมากจนมองไม่เห็นรูปพุน	มองเห็นรูปพุน	ละเอียดมากจนมองไม่เห็นรูปพุน	ละเอียดมาก

<sup>1)</sup> เชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน

<sup>2)</sup> เชื่อมโยงโดยใช้เกลือเหลวหรือความถี่สูง

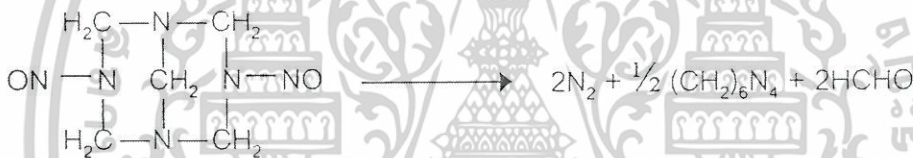
<sup>3)</sup> ความหนาแน่นประมาณ 0.3 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

<sup>4)</sup> คล้ายหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.7.1 Dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT หรือ DPT)

DNPT มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอ่อน สลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 205 องศาเซลเซียส เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสไดไฮไดรด์ และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน แสดงดังรูปที่ 2.9 อย่างไรก็ตามฟอสฟอรัสไดไฮไดรด์และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่น DNPT สามารถทำให้เจือจางได้โดยไม่เกิดอันตราย ที่ความเข้มข้นร้อยละ 80 จะให้ปริมาณก๊าซมากเป็นพิเศษ (ประมาณ 260 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ภายใต้สภาวะปกติ) เนื่องจาก DNPT เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซปริมาณมาก จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ DNPT ได้แก่ พื้นรองเท้าฟองน้ำ (Porous soles) และ Micro cellular rubber แต่ไม่เหมาะกับการทำ Sponge rubber เนื่องจาก DNPT สลายตัวที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.9 กลไกปฏิกิริยาการสลายตัวของ DNPT [17]

### 2.3.8 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) หรือ คิกเกอร์ (Kicker) เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาของสารให้ฟอง โดยช่วยลดช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง คิกเกอร์มีหลายชนิด การเลือกใช้คิกเกอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นมีความสำคัญมาก ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการเลือก ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง สภาพวะของการใช้งาน ความสามารถในการผสมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หรือความเข้ากันได้ (Compatibility) ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์และสารตัวเติมต่าง ๆ เป็นต้น คิกเกอร์เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้สามารถใช้งานสารให้ฟองได้ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้าง และสามารถใช้งานได้กับสารให้ฟองหลายชนิด

คิกเกอร์ที่ใช้งานกับสารให้ฟองชนิด DNPT มีหลายชนิด ได้แก่

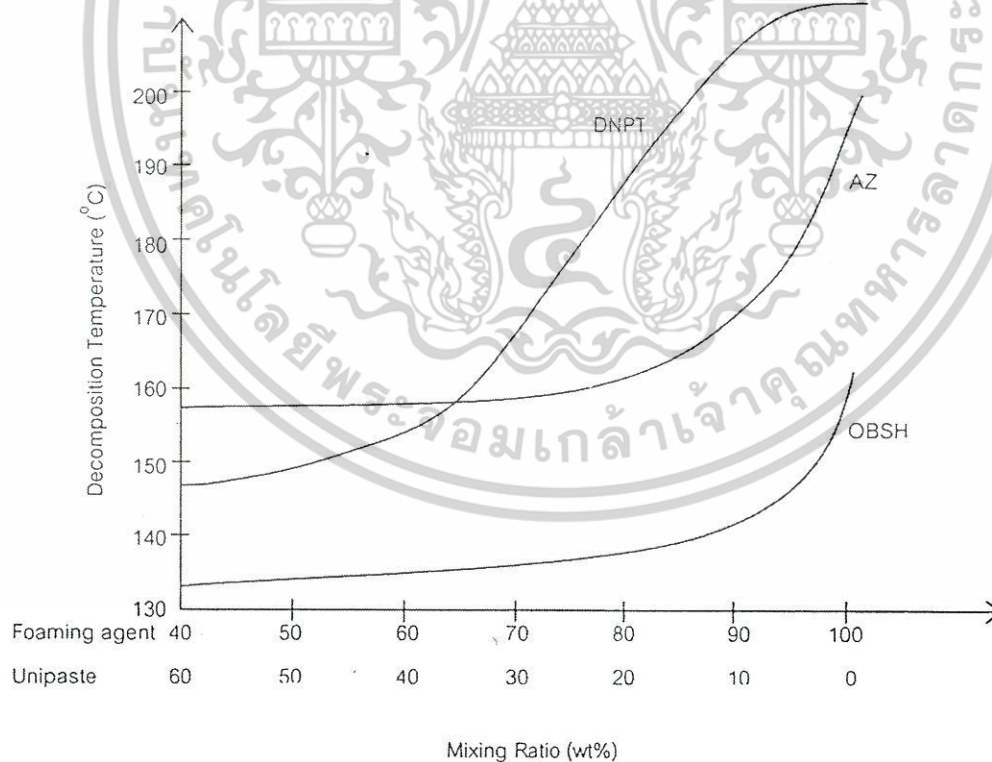
- สารที่เป็นกรด เช่น กรดซาลิไซลิก และกรดพาทาลิก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกลิ่น และกรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลง

- สารที่เป็นด่าง เช่น ยูเรีย และสารผสมที่มียูเรีย ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น
- สารที่เป็นกลาง เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล การใช้สารที่เป็นกลาง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกลิ่น และยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

ยูเรียเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้กับสารให้ฟอง DNPT เนื่องจากทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของ DNPT เหมาะสมกับกระบวนการผลิต ช่วยกระตุ้นอัตราการเชื่อมโยง (มีสมบัติเป็นด่าง) ทำให้ลดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) นอกจากนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีขาวกว่าการใช้สารให้ฟองเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณทิกานีเยม ไดออกไซด์ (สารที่ให้สีขาว) ที่ใช้ในยาง นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดจากการใช้ DNPT ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของยูเรียต่อสารให้ฟอง AZ, DNPT และ p,p'-Oxybis(benzenesulfonyl hydrazide) (OBSH) แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของ Unipaste<sup>®</sup> (ยูเรีย) ต่อสารให้ฟอง AZ, DNPT และ OBSH [17]

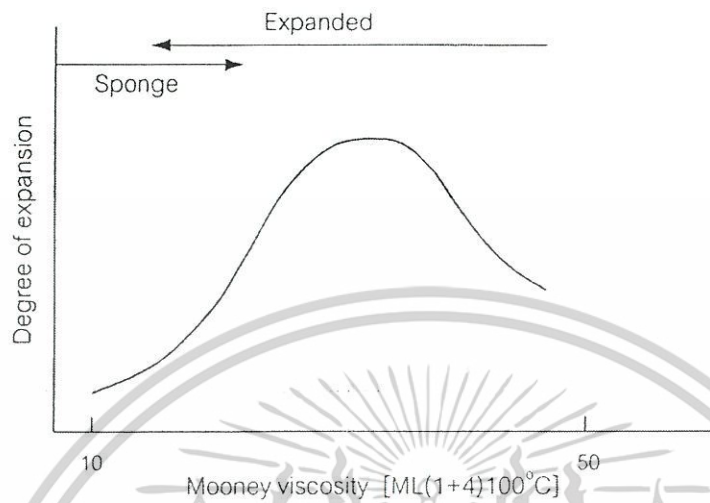
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular rubber) [12]

ผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุน แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

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

Foam rubber เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตจากน้ำยาง มีโครงสร้างเซลล์ติดต่อกัน (Open cellular structure) เช่น ยางฟองน้ำ (Latex foam) ส่วน Sponge rubber และ Expanded rubber เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางแห้ง แต่ต่างกันที่โครงสร้างเซลล์ของ Sponge rubber จะติดต่อกัน ส่วน Expanded rubber มีโครงสร้างเซลล์ไม่ติดต่อกัน (Closed cellular structure) ในการทำให้เกิดรูพรุนภายใน Sponge rubber และ Expanded rubber จะทำโดยใส่สารให้ฟองซึ่งแตกตัวให้ก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อน การขยายตัวของ Sponge rubber และ Expanded rubber จะขึ้นกับความหนืด (Viscosity) ของยาง สูตรยางที่ใช้ในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber จะต้องมีความหนืดต่ำ ความหนืดที่เหมาะสมจะทำให้การขยายตัวของก๊าซสมบูรณ์ และเมื่อเวลาผ่านไปความหนืดของยางจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ที่ความหนืดต่ำยางมีความแข็งแรงต่ำทำให้ฟองก๊าซเกิดการรวมตัวกันหลุดออกจากยางและเกิดการสลายตัวในที่สุด ทำให้ง่ายมีโครงสร้างแบบเปิดและความหนาแน่นสูงซึ่งที่ความหนืดสูงยางมีความแข็งแรงพอที่จะรักษาโครงสร้างของฟองก๊าซ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบปิด แต่ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก ฟองก๊าซจะถูกควบคุมให้อยู่ภายในยาง ซึ่งทำให้การขยายตัวของก๊าซลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ [12]

สิ่งสำคัญในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber คือ ชนิดของสารให้ฟอง โดย Sponge rubber จะใช้ไซเตียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารที่ให้ไนโตรเจน ส่วน Expanded rubber จะใช้สารที่ให้ไนโตรเจนเท่านั้น คุณสมบัติการสลายตัวของสารให้ฟองและคุณสมบัติการเชื่อมโยงจะต้องสมดุลกัน นอกจากนี้สภาวะการผลิตก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ความหนืดของพอลิเมอร์ ปริมาณสารทำให้ขึ้นม ปริมาณสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยง และชนิดสารให้ฟอง

## 2.5 เครื่องอัดรีดสำหรับยาง (Rubber extruder) [18-20]

เครื่องอัดรีดสำหรับยางเป็นเครื่องมือที่หลักยางหรือดินยาง ให้ผ่านช่องแคบแม่แบบ (Die) เพื่อให้ได้ยางที่มีรูปร่างตาม Die ซึ่งเครื่องอัดรีดสำหรับยางจะเป็นแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเท่านั้น และมักจะออกแบบให้ยาวกว่าเครื่องอัดรีดประเภทอื่น

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดรีด คือ

1. ครอบอกใส่เกลียวหนอน (Barrel) ทำหน้าที่อุ่นยางให้มีอุณหภูมิตามต้องการโดยมีการหล่อ น้ำ ไขมัน หรือของเหลวอื่น เพื่อทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิตามต้องการได้ การป้อนยางเข้าไปในครอบอกจะต้องสม่ำเสมอ เพื่อให้ยางถูกอัดรีดออกมาได้สม่ำเสมอ ขนาดของยางหรือความกว้างของแถบยางเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดการป้อนยาง การเพิ่มขนาดของยางเข้ามาก

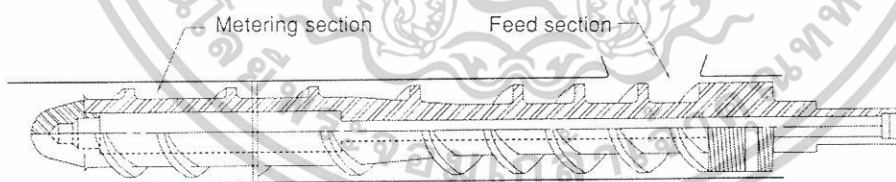
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกินไปเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งเครื่องจะเกิดการอุดตัน (Choke) ตรงส่วนเข้าได้ ทำให้การส่งยางเข้าเกลียวหนอนขาดตอน ทำให้ได้ผลผลิตไม่สม่ำเสมอ

2. เกลียวหนอน (Screw) ทำหน้าที่ส่งผ่านยางเข้าไปในเครื่อง เกลียวหนอนมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L:D) ตามชนิดของเครื่องมือ

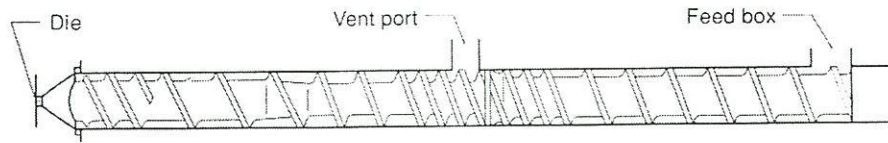
- Hot feed extruder เป็นเครื่องอัดรีดแบบป้อนยางในขณะร้อน (ใช้ยางที่ออกจากเครื่องบดผสมลูกกลิ้งในขณะร้อน) มี L:D เท่ากับ 4:1-6:1 แสดงดังรูปที่ 2.12
- Cold feed extruder เป็นเครื่องอัดรีดแบบป้อนยางในขณะเย็น มี L:D เท่ากับ 10:1-15:1 ใช้สำหรับการป้อนยางเย็น ซึ่งต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องมือถูกกว่าการควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นดีกว่า และค่าแรงงานลดลง เมื่อเทียบกับ Hot feed extruder แสดงดังรูปที่ 2.13

เกลียวหนอนสำหรับยางจะมีร่องลึก (flight depth) ประมาณ 1:6 D-1:10 D ร่องยิ่งตื้นยิ่งทำให้ยางสามารถรับความร้อนจากกระบอกรีดได้ง่ายขึ้นและมีแรงเฉือนเกิดขึ้นสูง ถ้าตื้นเกินไปอาจทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงก่อนกำหนด (Scorch) ในกระบอกรีดได้ง่าย ไม่เหมือนกับเกลียวหนอนของเครื่องอัดรีดพลาสติก ซึ่งมีร่องลึกประมาณ 1:10 D-1:30 D เพื่อให้ถ่ายเทความร้อนได้ดีและไม่เกิดการเชื่อมโยงก่อนกำหนด



รูปที่ 2.12 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางร้อน (Hot feed extruder) [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางเย็น (Cold feed extruder) [20]

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

- ลดอัตราความเร็วในการอัดรีด
- เพิ่มอุณหภูมิของยาง
- เพิ่มความยาวของ Die
- เพิ่มความเร็วในการดึงยางออกจากเครื่องอัดรีด

ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอัดรีด จะต้องใช้ขนาดของ Die ให้เล็กกว่าผลิตภัณฑ์รวมทั้งอาจต้องเปลี่ยนรูปทรงของ Die เพื่อชดเชยปรากฏการณ์ Die swell

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pramanik P.K. และ Baker W.E. (1995) [21] ได้นำผงยางรถยนต์ขนาด 40 และ 80 เมช มาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้น (LLDPE) เพื่อปรับปรุงสมบัติความทนต่อแรงกระแทกโดยใช้เอทิลีนอะคริลิกแอซิด (Ethylene-acrylic acid) และยางธรรมชาติแบบอีพอกซิไดซ์ (Epoxydized natural rubber) เป็นสารช่วยผสม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติแบบอีพอกซิไดซ์หรือใช้ผงยางรถยนต์ขนาดเล็ก จะทำให้สมบัติความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) และการเคลือบผงยางรถยนต์ด้วยไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์กับไทแรลลิลไซยานูเรต (Tirallyl cyanurate) จะทำให้สมบัติความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

✓ Balogh G. และ Samay G. (1996) [22] ศึกษาการนำยางล้อรถที่ใช้แล้วมากลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เป็นส่วนผสมในการทำยางด้านข้าง (Sidewall) และหน้ายาง (Tread) ของล้อรถบรรทุก ชนิดของยางที่ศึกษา คือ IR:SBR และ BR:SBR ส่วนยางล้อรถที่ใช้แล้วที่นำมาศึกษาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มี 3 ชนิด คือ ผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ยางรีเคลมที่เตรียมโดยวิธีการตัดแยก (Classical method) และผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยง ปริมาณผงยางที่ทำการศึกษาคือ ร้อยละ 0 10 และ 20 พบว่ายางรีเคลมจะให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 มิลลิเมตรและผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณที่ใช้พบว่าผงยางทุกชนิดทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าการไม่ใส่ผงยาง โดยที่การใช้ยางรีเคลมปริมาณน้อย จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ ส่วนการใช้ผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยงในปริมาณมาก จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ปริมาณน้อย

Kowalska E. และ Wietgosz Z. (1997) [23] ศึกษาการผลิตพองน้ำขิมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนและผงยาง โดยใส่สารให้พองและสารช่วยผสม ผ่านกระบวนการอัดรีดที่มีหัวแม่แบบชนิดพิเศษ (Specially designed head) พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของท่อลดลงส่วนสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณสารให้พองเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและส่วนสมบัติเชิงกลจะลดลง จากการศึกษาการขิมผ่านของน้ำ พบว่าความดันน้ำเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมอัตราการขิมผ่านของน้ำ และอัตราการขิมผ่านของน้ำจะแปรผกผันกับความยาวท่อ เนื่องจากความดันน้ำจะลดลงตามความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 35 เป็นร้อยละ 40 อัตราการขิมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนที่ปริมาณพอลิเอทิลีนร้อยละ 45 อัตราการขิมผ่านของน้ำลดลง แต่สูงกว่าที่ปริมาณพอลิเอทิลีนร้อยละ 35

ชลดา เลวิช และ สาโรช ช่างชุม (1998) [24] ศึกษาชนิดและปริมาณสารให้พอง และสารกระตุ้นปฏิกิริยา (Kicker) ในยาง พบว่าสารให้พอง Azodicarbonamide (AZ) มีอุณหภูมิการสลายตัวสูง คือประมาณ 190-240 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงได้โดยการใช้ AZ ร่วมกับสารให้พองชนิดอื่นที่มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า และการใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยา AZ ร่วมกับการให้พอง Dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT) และ p,p'-Oxybis(benzenesulfohydrazide) (OBSh) จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงมาอยู่ที่ 150-180 องศาเซลเซียส และ 120-135 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่ปริมาณก๊าซลดลงเล็กน้อย ส่วนการใช้คิกเกอร์ จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเหลือประมาณ 130-145 องศาเซลเซียส แต่ปริมาณก๊าซลดลงอย่างชัดเจน เมื่อศึกษาการขยายตัวของยางโดยใช้เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dynamic mechanical analyzer (DMA) พบว่าการขยายตัวของยาง นอกจากจะขึ้นกับปริมาณ ก๊าซที่ได้จากสารให้ฟอง ยังขึ้นกับความหนืดและการเชื่อมโยงของยาง

Han M.H. (1998) [25] ศึกษาสมบัติของผงยางรถยนต์กับยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene butadiene rubber, SBR) โดยศึกษาคุณสมบัติของ การผสม ลักษณะผิว ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติทางกายภาพ ทำการผสมโดยใช้เครื่อง ผสมแบบปิดและขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยการอัดแบบ พบว่าคุณสมบัติของการผสมยางกับผงยางรถยนต์ เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการผสมยางกับสารเสริมแรง (Reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ การใส่ผงยาง รถยนต์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยง เนื่องจากกำมะถัน (Sulfur) และสารเร่ง (Accelerator) กระจายไม่สม่ำเสมอทั่วภูมิภาคของยางกับผงยางรถยนต์ เมื่อขนาดและปริมาณ ของผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดิ่งลดลง ขณะที่ผิวของคอมโพสิตจะมีความหยาบเพิ่มขึ้น ทั้งก่อนและหลังการเชื่อมโยง เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการขาดของชั้นทดสอบโดยวิธีการดึง พบว่า จะเริ่มต้นขาดที่ภูมิภาคของผงยางรถยนต์ ขณะที่การขยายรอยแตกของการทดสอบการหักงอจะ ถูกขัดขวางโดยผงยางรถยนต์

ดาวัน นิลทรงกลด (1999) [26] ศึกษาการเตรียมยางไมโครเซลลูลาร์จากยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้ยางฟองที่มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D 1056, Type 2 ; Class A โดยใช้ยาง ธรรมชาติผสมกับยางสไตรีนบิวตะไดอิน สารให้ฟองที่ศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่ Unifoam<sup>®</sup> AZ-H40 (Azodicarbonamide) Open cell<sup>®</sup>-100 และ Supercell<sup>®</sup>-D 80 (Dinitrosopentamethylene tetramine) และ Porofor<sup>®</sup> TSH PLV (Benzenesulfohydrazide) สำหรับสภาวะ การผลิตที่ศึกษา ได้แก่ สูตรยาง อุณหภูมิ เวลา ปริมาณยางที่ใส่ในแม่แบบ วิธีการเชื่อมโยง และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตะไดอิน พบว่าสภาวะการเชื่อมโยงที่ เหมาะสมกับการผลิตยางฟองคือ การเชื่อมโยงโดยใช้เครื่องอัดแบบชั้นตอนเดียวที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณยาง 3:4 ของแม่แบบ ส่วนสูตรที่เหมาะสมในการผลิตคือสูตรที่มี อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตะไดอิน 100:0 โดยใช้สารให้ฟอง Unifoam<sup>®</sup> AZ-H40 Open cell<sup>®</sup>-100 และ Super cell<sup>®</sup>-D80 และสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างยาง ธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตะไดอิน 90:10 โดยใช้สารให้ฟอง Super cell<sup>®</sup>-D80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์ และคณะ (1999) [27] ศึกษาสมบัติของท่อน้ำซึมหรือวัสดุที่มีรูพรุนเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางการเกษตร ซึ่งทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างอนุภาค GRT และใช้ไอโซโดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง โดยทำการศึกษาดัชนีการซึมที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ อัตราส่วนของ GRT:LDPE และผลของปริมาณ AZ วัสดุถูกผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ GRT และ AZ ในวัสดุจะส่งผลคล้ายกันคือ มีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลงและอัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุมีค่าลดลง จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุพบว่า การเพิ่มปริมาณ GRT ไม่มีผลทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการตกผลึกเปลี่ยนแปลง แต่มีผลทำให้ปริมาณของค่าความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า GRT และ LDPE สามารถยึดติดกันได้ดี รูพรุนของวัสดุเกิดจากช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อนของผงยาง GRT และฟองก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของ AZ

พลชิต บัวแก้ว และคณะ (2000) [28] ศึกษาการผลิตท่อน้ำหยดจากยางธรรมชาติและยางรีเคลม จากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (ยางไนไตรล์/ยางคลอโรพรีน) ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำให้ยางคงรูปโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อ (Filler) ต่อสมบัติของท่อ พบว่าการใช้ซิลิกา (Silica) เป็นสารเพิ่มเนื้อทำให้ท่อมีความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ดี ที่ปริมาณซิลิกา 50 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (phr) ท่อจะทรงตัวดี จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณยางรีเคลมต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ พบว่าปริมาณยางรีเคลมน้อยกว่า 60 phr น้ำไม่สามารถซึมผ่านท่อได้ เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำจะสูงขึ้น และเมื่อใช้ขนาดอนุภาคยางรีเคลมเล็กลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น

ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และ อลงกรณ์ ศิลปชำนาญ (2000) [29] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้ไอโซโดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง อัตราส่วนที่ใช้คือ GRT:LDPE:AZ เท่ากับ 60:40:3 ขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยการอัดแบบขึ้นรูป พบว่าการใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 30 เมช จะทำให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ร้อยละการยืด ฌ จุดขาด และค่าพลังงานที่ทำให้แตกหักสูงขึ้น เมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP และสารช่วยผสม (PE-g-MA) จะทำให้ร้อยละการยืด ฌ จุดขาดสูงขึ้น ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง แต่อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง

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

สัจจะชัย สัจจะระณะสกุล (2001) [31] ศึกษาการผลิตและสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง พบว่าสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ ใช้เวลาในการอัดแบบ 5 นาทีที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มปริมาณผงยาง GRT ในวัสดุพบว่า สมบัติเชิงกลของ GRT:HDPE มีแนวโน้มลดลง อัตราส่วน GRT:HDPE ที่เหมาะสมคือ 60:40 เมื่อเพิ่มปริมาณ AZ จะทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งกต และความหนาแน่น แต่จะทำให้สมบัติบางประการเพิ่มขึ้น เช่น ร้อยละการยืด ฌ จุดขาดและอัตราการซึมผ่านของน้ำ เมื่อใช้ขนาดอนุภาคผงยาง GRT เล็กกลง พบว่าวัสดุมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นแต่มีการซึมผ่านของน้ำลดลง จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเพิ่มขึ้น แต่มีร้อยละการยืด ฌ จุดขาดและปริมาณการซึมผ่านของน้ำลดลง จากการศึกษาสัจจะระณะสกุลพบว่า GRT และ HDPE สามารถผสมเข้ากันได้ดี มีลักษณะเป็นรูพรุนเนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารให้ฟอง AZ และช่องว่างระหว่างอนุภาค GRT การซึมผ่านของแผ่นน้ำซึม GRT:HDPE:AZ อัตราส่วน 60:40:8 จะให้อัตราการซึมผ่านของน้ำ 24-25 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นท่อน้ำซึม

บริษัท FARU (2001) [32] ได้คิดค้นเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการใช้ล้อยางรถยนต์เก่ามาใช้ให้เป็นประโยชน์ โดยนำผงยางรถยนต์ (GRT) มาผสมกับพอลิพรอพิลีน (PP) เรียกว่าวัสดุใหม่นี้ว่า Elastomeric alloy (EA) มีสมบัติเหมือนยางแต่สามารถถูกแปรรูปได้เหมือนเทอร์โมพลาสติก สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายเพราะสามารถเติมสารเติมแต่งได้หลายชนิด เป็นที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมรถยนต์ ทำกันชน เป็นต้น ซึ่งสามารถใช้ผงยางรถยนต์ได้หลายขนาด นอกจากนี้ยังมีการทำ Revulcon<sup>®</sup> หรือขยะของยางที่ถูกแปรรูปกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกรรมวิธีการปรับสภาพทางเครื่องกลที่ไม่มีสารเคมีใด ๆ เพิ่มเติม และยางที่บิดจะทำการเชื่อมโยงใหม่ได้ (Revulcanized) และหลอมเหลวในแม่แบบได้ ไม่ว่าจะขยะยางนั้นจะอยู่ในช่วงขนาดอนุภาคเท่าใด และสามารถผสมกับพลาสติกต่าง ๆ ขยะพลาสติกและผสมกับยางพอลิเมอร์ผสมที่เกิดจากยางใหม่ในสัดส่วนที่มากกว่าเม็ดยางที่ไม่ได้ปรับสภาพโดยยังคงคุณภาพไว้

กัญญาณี แสงเกียรติยุทธ (2002) [33] ศึกษาหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ (GRT) กับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง ไดออกทิลพาทาเลต (DOP) เป็นพลาสติกไซเซอร์ และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา พบว่าการเติมซิงค์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการสลายตัวของสารให้ฟอง อัตราส่วนวัตถุดิบและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมคือ GRT:PVC:AZ:DOP เท่ากับ 60:40:14:40 ที่อุณหภูมิการอัดรีด 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที โดยท่อน้ำซึมที่ได้มีความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด ความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันน้ำ  $5 \times 10^{-3}$  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) [34] การศึกษาถึงผลการเติมยางรีไซเคิลจากบริเวณหน้ายาง ต่อสมบัติของยางธรรมชาติ 2 ชนิด โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณของยางรีไซเคิล และเวลาบดย่อย โดยสมบัติที่ทำการศึกษา ได้แก่ สมบัติการไหล ลักษณะเฉพาะของการเชื่อมโยงยาง (Cure characteristics) สมบัติทางกายภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมบัติเชิงกล พบว่าความหนืดมูนนี่ และความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม แต่ลดลงขึ้นอยู่กับเวลาบดย่อย โดยยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงกว่าจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารประกอบเพื่อให้เหมาะสมกับการบดย่อย และปริมาณของยางรีเคลม จากการศึกษา Die swell พบว่าขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลมมากกว่าน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ จากการศึกษาอัตราการเชื่อมโยงและเวลาเริ่มเชื่อมโยง พบว่าเพิ่มขึ้นและลดลง ขึ้นกับปริมาณของยางรีเคลม สำหรับยางที่เชื่อมโยงแล้ว (Vulcanized rubbers) พบว่า มอดุลัสของยางที่ 100 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรง และความร้อนสะสมขึ้นอยู่กับปริมาณของยางรีเคลม แต่ความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงต่อการฉีกขาดไม่ขึ้นกับปริมาณของยางรีเคลม การศึกษาสมบัติการไหลและลักษณะเฉพาะของการเชื่อมโยงของยางที่ยังไม่ทำการเชื่อมโยง (Unvulcanized rubbers) พบว่าไม่ได้ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ในทางตรงกันข้ามยางที่ผ่านการเชื่อมโยง พบว่าสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density)

ศุภโชค อุ่นทรัพย์เจริญ และ สมบูรณ์ แซ่ตั้ง (2003) [35] ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมน้ำของท่อน้ำซึม (Porous pipe) ที่ผลิตจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิพรอพิลีน (PP) โดยใช้ไฮโดรคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง และพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาลิกอิกแอนไฮไดรด์ (PP-g-MA) เป็นสารช่วยผสม โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง GRT:PP ปริมาณสารให้ฟอง ปริมาณสารช่วยผสม ชนิดของเมตริกซ์ได้แก่ PP เกรด P 401S (MFI 2.4 กรัมต่อ 10 นาที) และ PP เกรด P 840J (MFI 40 กรัมต่อ 10 นาที) ทำการผสมและนำไปอัดรีดรูปท่อ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดียว พบว่าสมบัติเชิงกลของ GRT:PP ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกด มีแนวโน้มที่ลดลง แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของ GRT:PP ที่เหมาะสมเท่ากับ 60:40 เมื่อเพิ่มปริมาณของสารให้ฟองในวัสดุ พบว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกด มีค่าสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของค่าความเป็นผลึก และอัตราการซึมน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ PP-g-MA ในวัสดุพบว่าสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกด มีค่าสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง และเมื่อดัชนีการไหลของเมตริกซ์เพิ่มขึ้นพบว่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส สมบัติการรับแรงกด มีค่าสูงขึ้น แต่ร้อยละการยืด ณ จุดขาด และอัตราการซึมน้ำมีค่าลดลง จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) พบว่า เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มปริมาณสารให้ฟอง ทำให้มีปริมาณรูพรุนมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมและเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่มีดัชนีการไหลต่ำลง ทำให้มีปริมาณของรูพรุนลดลง

สุมนา แจ่มเหมือน (2004) [36] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมที่เตรียมจากยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารไดไนโตรไซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (Dinitrosopentamethylene tetramine, DNPT) เป็นสารให้ฟองและสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และทำให้เกิดการเชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อนด้วยเครื่องอบความร้อน (Hot air oven) โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง ปริมาณเขม่าดำ ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์และความยาวท่อ พบว่าอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมคือ การเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ พบว่า ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น จนถึงจุด ๆ หนึ่ง คือที่ปริมาณเขม่าดำ 50 phr ส่วนความหนืดมูนี โมดูลัส ความแข็งกดและความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เมื่อปริมาณ GRT เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง พบว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาค GRT เล็กลง สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง เมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการซึมผ่านน้ำแต่ละตำแหน่งของท่อมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จากการศึกษา พบว่าการผลิตท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black เท่ากับ 40:60:3:50 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี (ความแข็งแรงดึง 4.8 MPa) อัตราการซึมผ่านของน้ำเหมาะสมกับการใช้งานในด้านเกษตรกรรม และมีต้นทุนการผลิตประมาณ 79 บาทต่อกิโลกรัม (สามารถผลิตท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ได้ยาวประมาณ 7.3 เมตร)

## 2.7 ท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า

บริษัท Leaky Pipe Systems [9] ได้ผลิตและจำหน่ายท่อฟอกอากาศ (Aeration hose) และท่อน้ำซึมจากยาง (Porous rubber hose) โดยไม่ระบุชนิดวัสดุ ท่อฟอกอากาศจะใช้สำหรับฟอกอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลา และบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งรายละเอียดของท่อ แสดงดังตารางที่ 2.2 ส่วนท่อน้ำซึมจะใช้สำหรับการให้น้ำในด้านเกษตรกรรม ส่วนหย่อม คอกม้า ฯลฯ การทำงานของท่อจะใช้ความดันต่ำและปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำน้อย เนื่องจากเป็นการให้น้ำที่ละน้อย สามารถให้น้ำได้โดยไม่จำกัดพื้นที่ แต่ขึ้นกับความแรงของแหล่งน้ำที่ใช้ ชนิดของท่อ และลักษณะการติดตั้ง ซึ่งรายละเอียดของท่อที่ผลิต แสดงดังตารางที่ 2.3

บริษัท Micro-flo Industries [37] ได้ผลิตท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยผวยางรถยนต์ 80 เปอร์เซ็นต์ และพลาสติก (พอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์) 20 เปอร์เซ็นต์ (ไม่ระบุชนิด) เป็นท่อที่ยืดหยุ่นดีและมีความลึกหรือต่ำ มีความแข็งแรงถึงประมาณ 4 MPa เป็นท่อที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้งานบริเวณใต้ดินรอบ ๆ สวนอาคารและบ้านเรือน โดยน้ำในท่อจะค่อย ๆ ซึมผ่านท่อออกมาที่ละน้อย เพื่อให้ดินมีความชุ่มชื้นตลอดเวลาโดยไม่เกิดการอุดตันของดิน ซึ่งเป็นการแก้ไขปัญหาคาดตัวของสวนอาคารและบ้านเรือน เนื่องจากดินบริเวณรอบ ๆ สวนอาคารและบ้านเรือนแห้งและเกิดการหดตัว รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Micro-flo Industries แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดท่อพอกอากาศของบริษัท Leaky Pipe Systems [9]

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก (มิลลิเมตร)	ลักษณะการใช้งาน
LP20VHA	19,25	เป็นท่อที่เล็กที่สุด ให้พอกอากาศที่ละเอียดโดยใช้ความดันต่ำ
LP20FFA	19,25	ใช้ความดันสูงกว่า LP20VHA เล็กน้อยและให้พอกอากาศที่ละเอียดกว่า
LP32VHA	32,40	มีขนาดใหญ่และเหนียวกว่า LP20VHA มีอัตราการให้อากาศสูง
LP45VHA	45,52	ให้ปริมาณอากาศสูงมากโดยใช้ความดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky Pipe Systems [9]

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในและภายนอก (มิลลิเมตร)	อัตราการซึมผ่าน ของน้ำที่ความดัน 1-1.5 บาร์ (ลิตร/เมตร/ชั่วโมง)	ลักษณะการใช้งาน
LP12L	9,14	0.75-1.0	ใช้งานบริเวณใต้ดิน รัดต้นไม้เดี่ยวๆ ที่มีการคดเคี้ยว สนามหญ้า บริเวณ ที่เป็นเนิน นอกจากนี้ยังใช้ได้กับการ เพาะปลูกในเรือนกระจก
LP12H	9,14	2-3	ใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน โดยทั่วไป ใช้กับสวนหย่อม สามารถใช้ได้ทั้ง โครงการใหญ่และเล็ก เป็นท่อที่กำลัง เป็นที่นิยมในขณะนี้
LP12UH	9,14	4-6	ใช้สำหรับการให้น้ำบนดิน ได้แก่ การให้น้ำในกระถางหรือภาชนะ สวนยาง ชาและกาแฟ เป็นท่อที่มี ความต้านทานต่อการห่อหุ้มของ เกลือและอุณหภูมิสูง
LP16H	13,19	2-3	เหมาะกับการให้น้ำที่ต้องการความ สม่ำเสมอตลอดความยาวท่อ เนื่องจากเป็นท่อที่มีความยาวมาก มาก (แพงกว่า LP12) ไม่สามารถ โค้งงอได้และไม่เป็นที่นิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Micro-flo Industries [37]

ขนาดท่อ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน และภายนอก (มิลลิเมตร)	อัตราการซึมผ่านของน้ำ ที่ความดัน 1.4 บาร์ (ลิตร/เมตร/ชั่วโมง)
6.5	6.5, 11.0	0.4
9.5	9.5, 14.0	0.4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แผนการดำเนินงาน

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาที่อนำ้ซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์ ซึ่งทำการศึกษาถึงปัจจัยในด้านปริมาณเขม่าดำ และปริมาณสารให้ฟอง โดยมีการดำเนินงานดังนี้

- ตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางรีเคลม ผงยางรถยนต์ และสารเติมแต่งต่าง ๆ ตามสูตรที่กำหนดด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิห้อง
- ตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติการเชื่อมโยง
- ตอนที่ 3 ทำการขึ้นรูปยางผสมสูตรให้มีลักษณะเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียว-หนอนเดี่ยว ที่อุณหภูมิประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 30 รอบต่อนาที
- ตอนที่ 4 ทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยเครื่องอบความร้อน ด้วยอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และเวลาที่ต้องการศึกษา
- ตอนที่ 5 ทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

#### การศึกษาสมบัติเชิงกล

- ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการยืด ณ จุดขาด
- ความแข็งแรงฉีกขาด
- ความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์
- การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด (Compression deflection)

#### การศึกษาสมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่น
- ความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

#### การศึกษาสัณฐานวิทยา

- ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฟองอากาศ

#### การศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำ

- ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ ที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการดำเนินงานสามารถสรุปเป็นแผนผังแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) เกรด UCD-103 บริษัท Union Commercial Development Co., Ltd. สมบัติบางประการของยางรีเคลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางรีเคลม เกรด UCD-103 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ลักษณะ	แผ่นสีดำ
วัตถุติด	ยางทั้งเส้น
การสกัดด้วย อะซิโตน (%)	$15 \pm 3$
ปริมาณเถ้า (%)	$6 \pm 3$
เขม่าดำ (%)	$25 \pm 3$
ความชื้น (%)	น้อยกว่า 1
ปริมาณเนื้อยาง (%)	$50 \pm 3$
ความหนืดมูนิ [ML1+4 (100 °C)]	$60 \pm 15$
ความถ่วงจำเพาะ (ที่ 25 °C)	$1.14 \pm 0.02$

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

- ผยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) ขนาด 30 เมช ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด
- สารตัวเติม เขม่าดำ (Carbon black, C-black) ชนิด FEF (N550) เกรดการค้า
- สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) กำมะถัน (Sulfur, S) เกรดการค้า
- สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) เกรดการค้า
  - N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide (CBS)
  - Tetramethylthiuram disulfide (TMTD)
- สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators) เกรดการค้า
  - Zinc oxide (ZnO)
  - Stearic acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) น้ำมันแนพทานิก (Naphthanic oil) เกรดการค้า
8. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants หรือ Age-Resistors) เกรดการค้า
  - สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene diamine (6PPD) บริษัท โคซัน (ประเทศไทย) จำกัด
  - สารป้องกันโอโซน (Antiozonant) ขี้ผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax)
9. สารให้ฟอง (Blowing agents) N,N'-Dinitrosopentamethylene tetramine (DNPT, DPT) ชื่อการค้า Unicell-G<sup>®</sup> บริษัท Dongjin Chemical สมบัติบางประการของสารให้ฟอง DNPT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ DNPT ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ชื่อทางการค้า	Unicell-G <sup>®</sup>
สูตรเคมี	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
ลักษณะ	ผงสีเหลือง
อุณหภูมิที่ละลายตัว (°C)	197-203
ปริมาณก๊าซ (ml/g, ที่ 15 °C)	210-220
ความถ่วงจำเพาะ (ที่ 25 °C)	1.45

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

10. สารกระตุ้นสารให้ฟอง (Kicker) ชนิดยูเรีย (Urea) ชื่อการค้า Unipaste-N3<sup>®</sup> บริษัท Dongjin Chemical สมบัติบางประการของสารกระตุ้นสารให้ฟอง Urea ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ Urea ที่ใช้ในงานวิจัย

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 Extruder Farrel
3. เครื่องอบความร้อน (Hot air oven) รุ่น F 400 บริษัท Binder
4. เครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น G15H-15-X บริษัท Wabash MPI
5. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไจรอนหมุน (Moving die rheometer, MDR) หรือเครื่อง Curelastometer รุ่น IIF บริษัท Nichigo Shoji
6. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine) รุ่น LS 5K บริษัท Lloyd Instruments (สำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาด)
7. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) บริษัท Intro Enterprise จำกัด
8. เครื่องทดสอบความหนาแน่น รุ่น EW-120SG บริษัท Mirage Trading
9. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone test chamber) รุ่น 703 บริษัท Hampden
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น LEO 1450 VP บริษัท LEO จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น TGA 7 บริษัท Perkin Elmer
12. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ
13. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้ความดันลม รุ่น Torino บริษัท Ceast

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การบดผสมยาง

1. ชั่งยางและสารเคมีตามสูตรที่กำหนด
2. ทำการบดยางรีเคลมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิห้อง จนยางพันรอบลูกกลิ้งและมีผิวเรียบสม่ำเสมอ (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที)
3. เติม Stearic acid ZnO และ Petroleum wax (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติม 6PPD CBS และ TMTD (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)
4. เติมผงยางรถยนต์ครั้งละประมาณ 1 ใน 4 ของทั้งหมดสลับกับน้ำมันแพททานิก (ใช้เวลาประมาณ 5 นาที)
5. เติม DNPT และยูเรีย (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติมกำมะถัน (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที) แล้วรีดยางให้เป็นแผ่น ทิ้งให้เย็นก่อนนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

#### 3.4.2 การศึกษาหาอุณหภูมิเชื่อมโยงตัวอย่าง

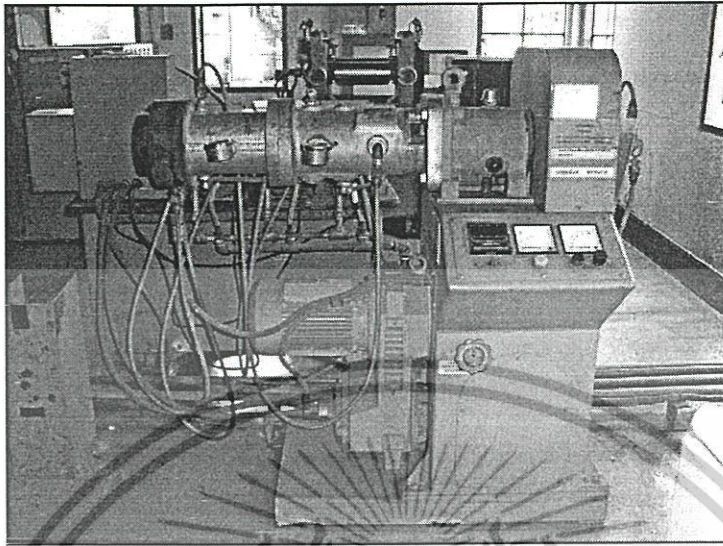
อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการเชื่อมโยงตัวอย่างสามารถทดสอบได้จากการนำยางผสมสูตรที่ประกอบด้วยสารให้ฟอง DNPT ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน สารกระตุ้นสารให้ฟอง ชนิดยูเรีย ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเชื่อมโยงยาง

#### 3.4.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

##### 3.4.3.1 การขึ้นรูปเป็นท่อ

ทำการขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

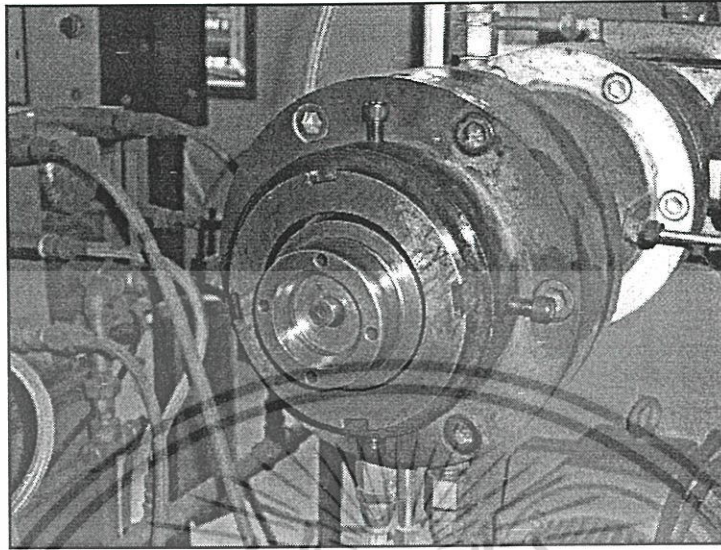


รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

รายละเอียดของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่ใช้มีดังนี้

- ความยาว: เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L:D) = 12:1
- เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diameter of screw) = 38.1 มิลลิเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางของร่องลึกสกรู (Diametrical screw clearance) = 0.13-0.20 มิลลิเมตร
- ความเร็วของสกรู (Screw speed) = 18-78 รอบต่อนาที
- ดाय (Die) มีลักษณะเป็นวงกลม 2 อันซ้อนกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 และ 18 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะของตาย (Die)

ปรับสภาวะต่าง ๆ ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนชนิดนี้

- อุณหภูมิของสกรู (Screw) กระจกอกใส่สกรู (Barrel) และอุณหภูมิของตาย (Die) ประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส
- ปรับความเร็วของสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

การขึ้นรูปเป็นท่อจะทำโดยนำยางผสมสูตรที่ตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ใส่เข้าไปในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ยางที่ออกจากตายจะมีลักษณะเป็นท่อ โดยมีแกนเหล็กยาวสำหรับสวมท่อที่ได้ เพื่อไม่ให้ท่อเสียรูปทรง

#### 3.4.3.2 การเชื่อมโยงท่ออย่าง

ทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และเวลาที่ต้องการศึกษา

#### 3.4.3.3 การทดสอบการเชื่อมโยงยาง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5289 [38]

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบยางผสมสูตรด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไร้จานหมุน (MDR) โดยจานด้านล่าง (Lower die) จะหมุนแบบส่ายไปมาที่มุม 3 องศา ตามแนวระนาบ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

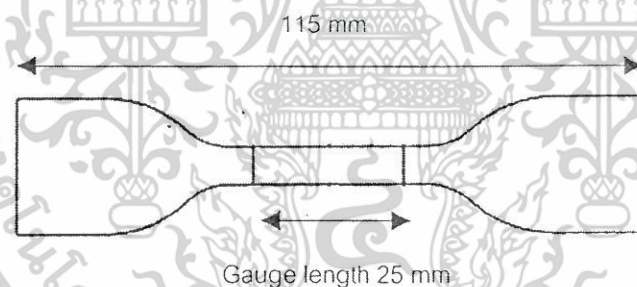
ความถี่ 1.7 เฮิรตซ์ ใช้อุณหภูมิการทดสอบ 160 องศาเซลเซียส หาเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c(90)}$ )

#### 3.4.3.4 การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [39]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อ ให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็นดาวย ซี (Die C) คือ เป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ (Load cell) ขนาด 5000 นิวตัน และอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และร้อยละการยืด ณ จุดขาด หาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ ตัวอย่าง 8 ชิ้น



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ดาวย ซี (Die C) ตามมาตรฐาน ASTM D 412 [40]

#### 3.4.3.5 การทดสอบความแข็งแรงการฉีกขาด

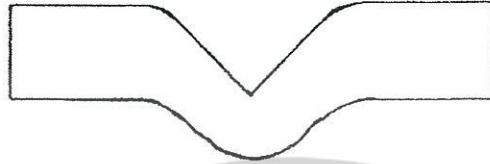
มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 624 [41]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อ ให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็นดาวย ซี (Die C) แสดงดังรูปที่ 3.5

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องรับได้ (Load cell) ขนาด 5000 นิวตัน และอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าความแข็งแรงฉีกขาด หาค่าเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่าง 8 ชิ้น



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงฉีกขาดตาย ซี (Die C) ตามมาตรฐาน ASTM D 624 [40]

การคำนวณ

$$T_s = F/d \quad (3.1)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ ความแข็งแรงฉีกขาด (กิโลนิวตันต่อเมตร)

$F$  คือ แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด (กิโลนิวตัน)

$d$  คือ ความหนาของชิ้นงาน (เมตร)

#### 3.4.3.6 การทดสอบความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [42]

วิธีการทดสอบ ทดสอบด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ เอ (Shore A durometer) โดยนำชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงจำนวน 3 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) วางซ้อนกันบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานข้างล่างให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 15 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด ทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง

#### 3.4.3.7 การทดสอบความหนาแน่น

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่น (Electronic Densimeter) แสดงดังรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความหนาแน่น

วิธีการทดสอบ โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบในอากาศและในน้ำ เครื่องจะคำนวณค่าความหนาแน่นให้อัตโนมัติโดยใช้หลักของการแทนที่น้ำ ดังนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)} = \frac{W}{(W - W_1)} \quad (3.2)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ (กรัม)

$W_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ (กรัม)

ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการหาค่าโดยประมาณ จะได้ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับความหนาแน่น

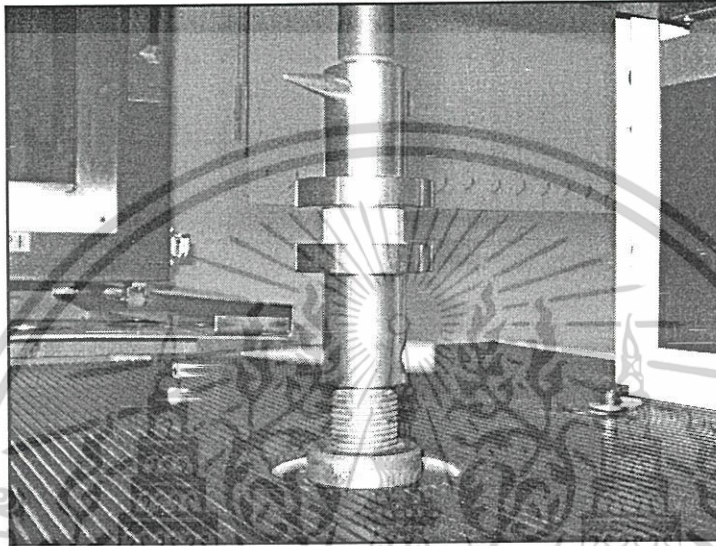
#### 3.4.3.8 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด (Compression deflection tests)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1056-91 [43]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการขึ้นรูปร่างผสมสูตรด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding machine) ซึ่งชิ้นงานทดสอบที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร ความหนา 12.5 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบแรงกดอัด (Compression machine) โดยใช้ค่าแรงสูงสุดที่เครื่องสามารถรับได้ (Load cell) ขนาด 5000 นิวตัน และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราเร็วในการกดอัดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตรต่อวินาที หาค่าแรงในการกดอัดให้ชิ้นงานมีความหนา ลดลงร้อยละ 25 ของความหนาเดิม หาค่าเฉลี่ยที่วัดได้ครั้งสุดท้ายของแต่ละชิ้นงาน เมื่อทำการ ทดสอบตัวอย่าง 3 ชิ้น ชิ้นละ 3 ครั้ง



รูปที่ 3.7 หัวทดสอบการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด

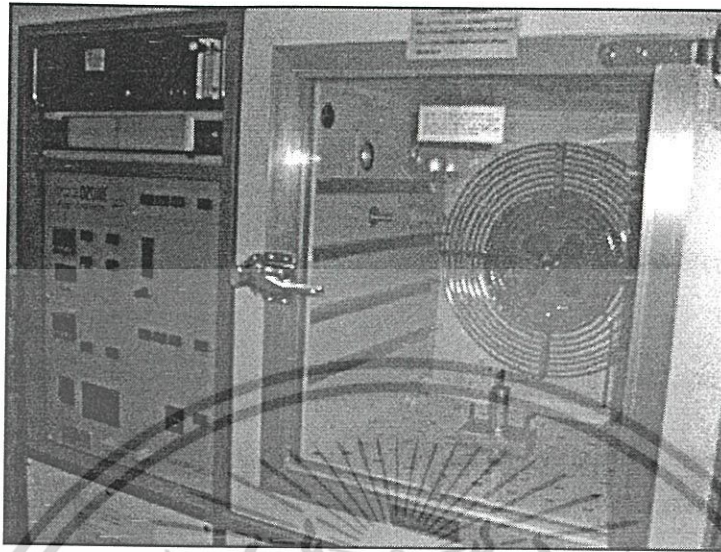
#### 3.4.3.9 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

มาตรฐานการทดสอบ ISO 1431/1-1980(E) [44]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อน้ำซึมที่เชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ ยึดปลายทั้งสองของชิ้นงานทดสอบด้วยที่จับ จากนั้นทำการยึดชิ้นงานทดสอบ 20 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำไปไว้ในที่มีดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำเข้าสู่ตู้อบโอโซนที่มีความเข้มข้นของโอโซน 25 pphm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความต้านทานไอโซน

จากนั้นทำการตรวจวัดรอยแตกของชิ้นงานทดสอบด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 7 เท่า การรายงานผลแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การรายงานผลของลักษณะรอยแตก

จำนวนของรอยแตก	ขนาดและความลึกของรอยแตก
A. รอยแตกจำนวนน้อย	1. ไม่สามารถเห็นรอยแตกด้วยตาเปล่า แต่สามารถเห็นรอยแตกด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 10 เท่า
B. รอยแตกจำนวนมาก	2. สามารถเห็นรอยแตกด้วยตาเปล่า
C. รอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน	3. ความยาวและความลึกของรอยแตกต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร
	4. ความยาวและความลึกของรอยแตก 1-3 มิลลิเมตร
	5. ความยาวและความลึกของรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร หรือชิ้นทดสอบขาด

#### 3.4.3.10 การศึกษาสัณฐานวิทยา

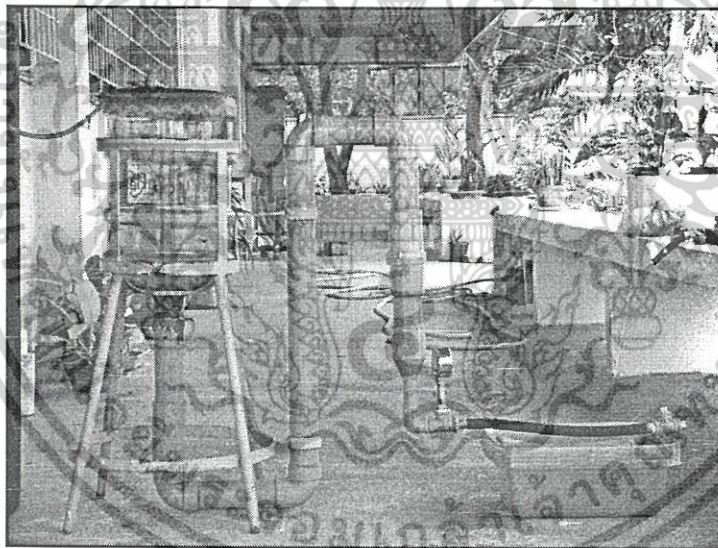
การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อน้ำซิมที่เชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก นำชิ้นงานทดสอบแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที จากนั้นหักชิ้นงานทดสอบที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานเรียบ ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบได้ชัดเจน

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของพองอากาศ

#### 3.4.3.11 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ

วิธีการทดสอบ นำตัวอย่างที่มีความยาว 30 เซนติเมตร ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeation rate) ที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 บาร์ โดยใช้ทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที รายงานผลในรูปของปริมาณการซึมผ่านของน้ำต่อเวลาต่อความยาวท่อ (l/h/m)



รูปที่ 3.9 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม

#### 3.4.4 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม

##### 3.4.4.1 ผลของปริมาณเขม่าดำ

ตอนที่ 1 หาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:สารให้ฟอง DNPT:เขม่าดำ (50:50:3:20) และสารเติมแต่งอื่น ๆ ด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลาการเชื่อมโยงดังนี้

- เวลาการเชื่อมโยงแบ่งเป็น 6 ช่วงคือ 10 20 30 40 50 และ 60 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

ตอนที่ 2 หาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:สารให้ฟอง DNPT (50:50:3) และเขม่าดำที่ปริมาณต่างกัน คือ 10, 20, 30 และ 40 และสารเติมแต่งอื่น ๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

### 3.4.4.2 ผลของปริมาณสารให้ฟอง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:เขม่าดำ (50:50:20) และสารให้ฟอง DNPT ที่ปริมาณต่างกันคือร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก และสารเติมแต่งอื่น ๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เวลาการเชื่อมโยงดังนี้

- เวลาการเชื่อมโยงแบ่งเป็น 6 ช่วงคือ 10 20 30 40 50 และ 60 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ ลัทธิฐานวิทยาและอัตราการซึมผ่านของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ส่วนในร้อยละของยาง, phr )						
	ศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำ				ศึกษาผลของปริมาณสารให้ฟอง		
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 7
ยางรีเคลม	100	100	100	100	100	100	100
ผงยางรถยนต์ (ขนาด 30 เมช)	100	100	100	100	100	100	100
DNPT	6	6	6	6	2	4	6
ยูเรีย	6	6	6	6	2	4	6
เขม่าดำ (N550)	10	20	30	40	20	20	20
สารเติมแต่งอื่น ๆ: กรดสเตียริก 1, ซิงค์ออกไซด์ 2.5, ซีพีบีโตรเลียม 0.5, น้ำมันแพทานิก 3.5, 6PPD 0.5, CBS 0.5, TMTD 0.25 และกำมะถัน 0.75							

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์ (GRT) โดยในการศึกษาจะทำการหาอุณหภูมิเชื่อมโยงที่อย่างและขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extrusion) จากนั้นทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยาและอัตราการซึมผ่านของน้ำ ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ปริมาณเขม่าดำและปริมาณสารให้ฟอง รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

#### 4.1 การศึกษาหาอุณหภูมิเชื่อมโยงที่อย่าง

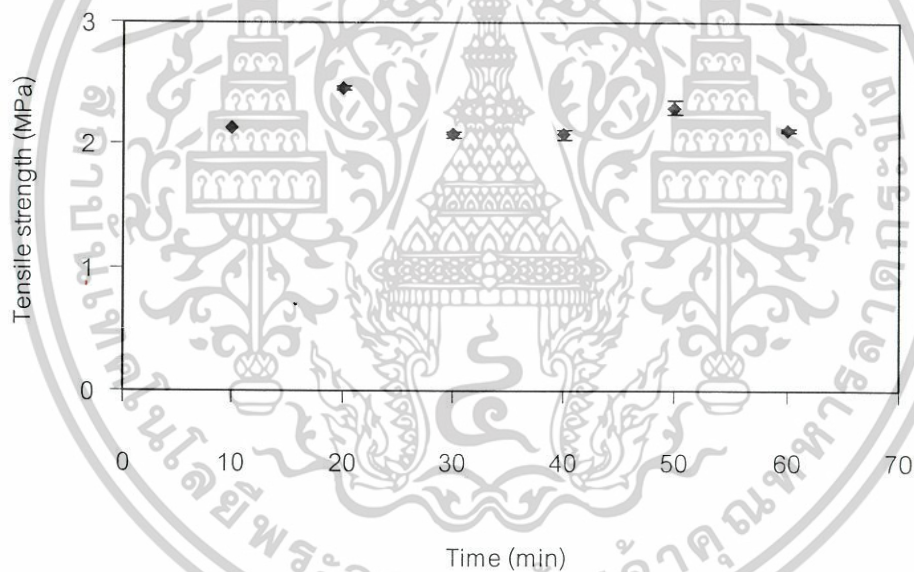
ในกระบวนการเชื่อมโยงยาง ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญคืออุณหภูมิการเชื่อมโยง ซึ่งผลิตภัณฑ์จะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่สม่ำเสมอได้ ต้องเลือกอุณหภูมิที่ใช้เวลาในการเชื่อมโยงน้อยที่สุด [45] แต่ในการเลือกอุณหภูมิการเชื่อมโยงสำหรับโครงการพิเศษนี้ ต้องเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมโยงยาง และการสลายตัวเป็นก๊าซของสารให้ฟอง ไดไนโตรไซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) โดยทั่วไปอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature,  $T_d$ ) ของสารให้ฟอง DNPT ประมาณ 205 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT จากเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) (แสดงดังภาคผนวก ก รูปที่ ก.1) พบว่าสารให้ฟอง DNPT จะมีการสลายตัวเป็นก๊าซที่อุณหภูมิประมาณ 240 องศาเซลเซียส จึงจำเป็นต้องลดอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเชื่อมโยงยาง ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติมสารกระตุ้นสารให้ฟองหรือคิกเกอร์ (Kicker) ชนิดยูเรีย (Urea) ในอัตราส่วนระหว่างสารให้ฟอง DNPT กับสารกระตุ้นสารให้ฟอง Urea เท่ากับ 1:1 พบว่าการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ที่มี Urea เป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง (แสดงดังภาคผนวก ก รูปที่ ก.2) สลายตัวเป็นก๊าซที่อุณหภูมิประมาณ 160 องศาเซลเซียส ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมโยงยางและการสลายตัวเป็นก๊าซของสารให้ฟอง DNPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

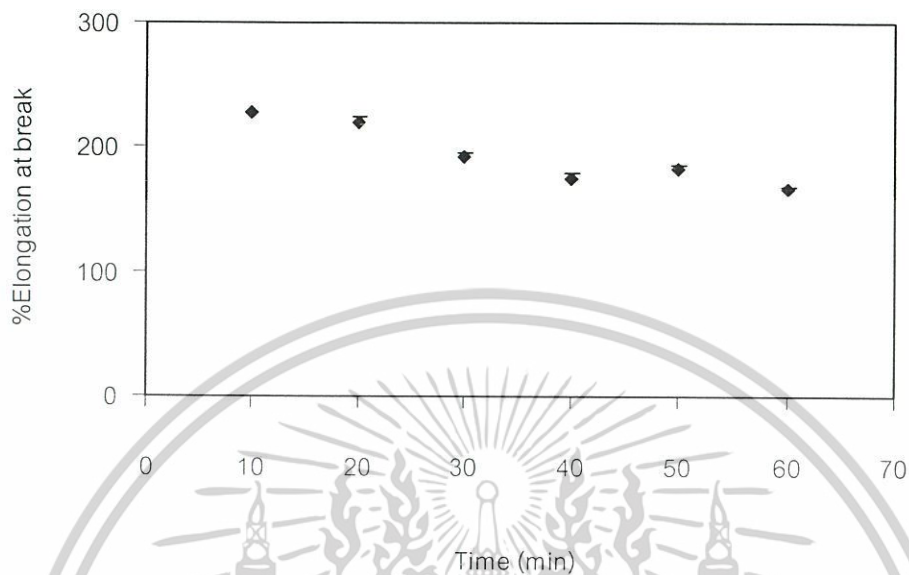
## 4.2 ผลของปริมาณเขม่าดำ

### 4.2.1 หาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสม

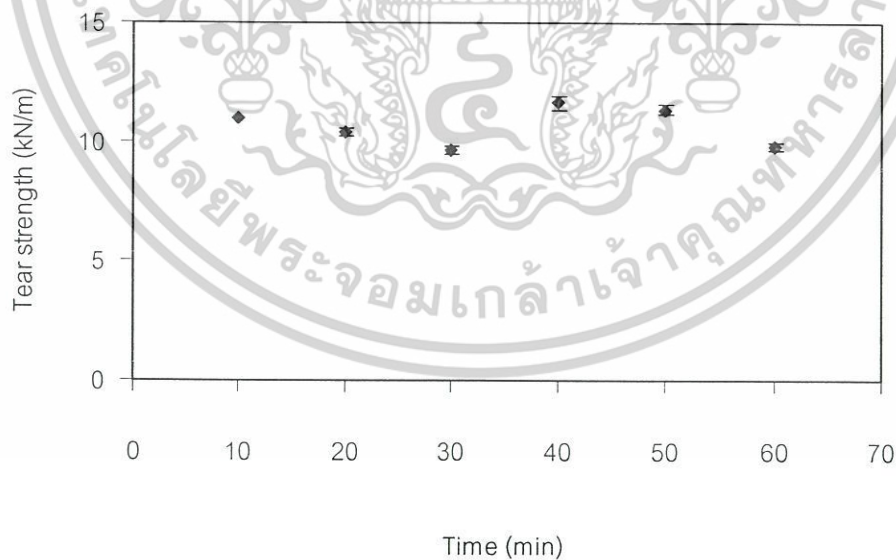
จากการศึกษาเมื่อนำยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:สารให้ฟอง DNPT:เขม่าดำ (Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black) เท่ากับ 50:50:3:20 ขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีดเป็นท่อที่มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเท่ากับ 20 และ 14 มิลลิเมตร ตามลำดับ แล้วทำการเชื่อมโยงท่อที่เตรียมได้ โดยการให้ความร้อนด้วยเครื่องอบความร้อนที่อุณหภูมิการเชื่อมโยง 160 องศาเซลเซียส โดยทำการเปรียบเทียบผลของเวลาการเชื่อมโยงที่ 10–60 นาที ผลของเวลาการเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.1–4.5 และ 4.7–4.8



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

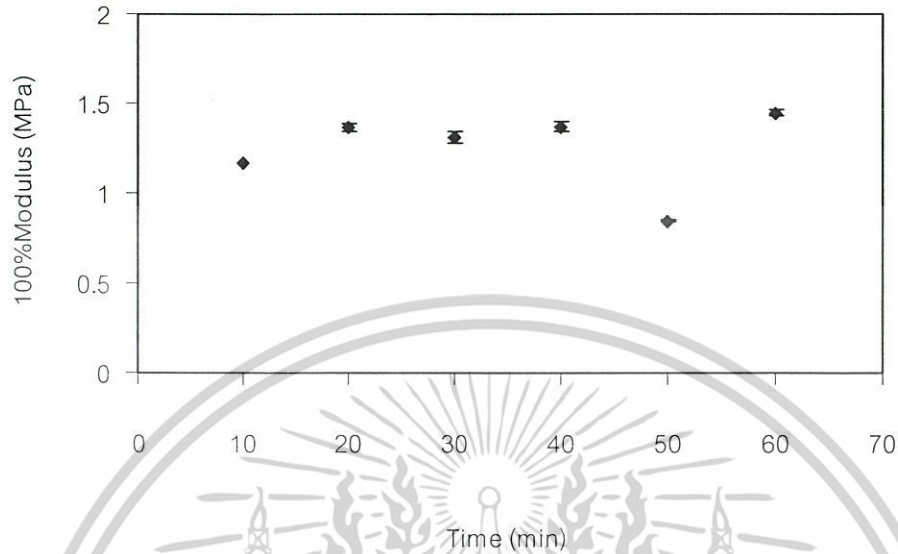


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของพ่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

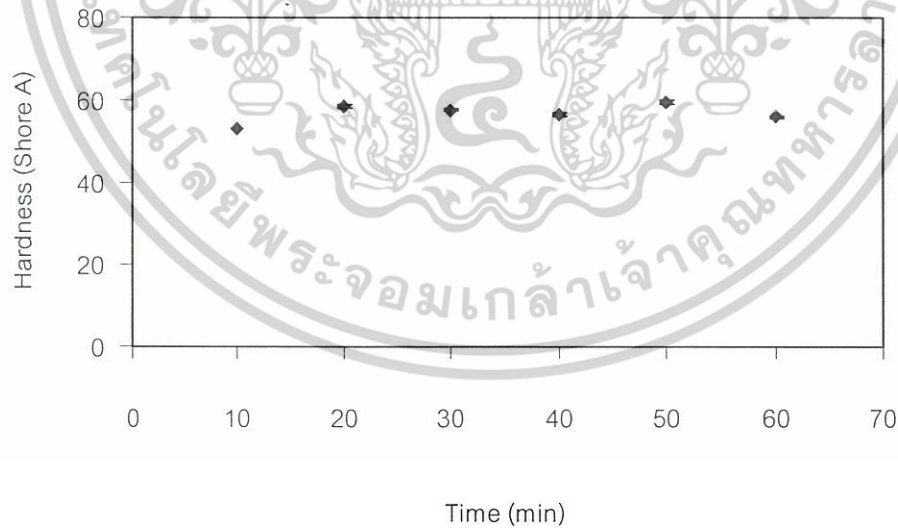


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของพ่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



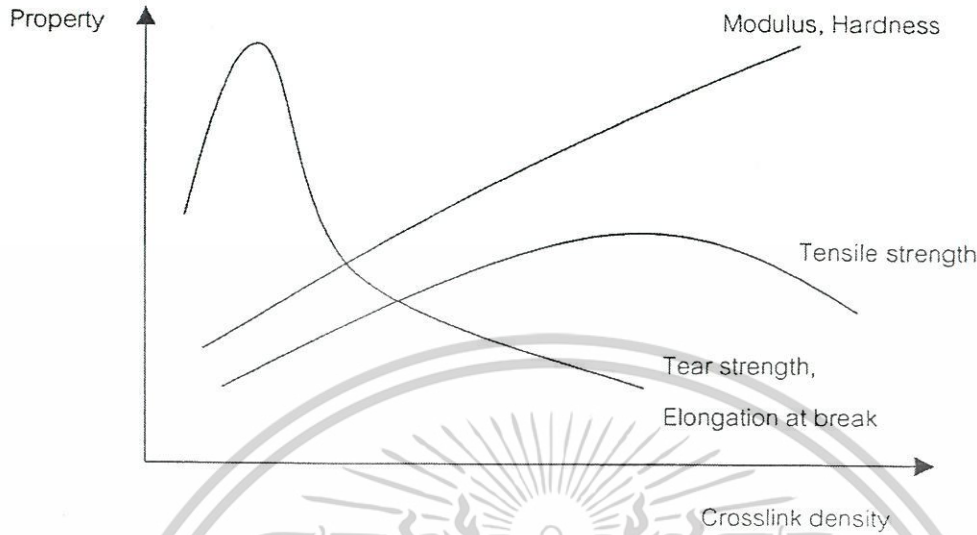
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1–4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10–60 นาที ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล เมื่อเวลานานขึ้นทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงของวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล เป็นที่ทราบกันดีว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นเชื่อมโยง ทำให้สมบัติเชิงกลบางประการโดยเฉพาะสมบัติที่เกิดการแตกหัก (Fracture properties) เช่น ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง (Optimum point) จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.3 เนื่องจากก่อนถึงจุดสูงสุด ยางยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างโมเลกุลยังเป็นสายโซ่ตรงยังไม่เป็นร่างแหสามมิติที่สมบูรณ์ เมื่อให้แรงกับชิ้นงาน สายโซ่โมเลกุลยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและหลุดออกจากกันได้ (Disentangle) โดยไม่เกิดการขาดของพันธะหรือสายโซ่โมเลกุล แต่เมื่อใช้เวลาก่อการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) เพิ่มขึ้น เกิดจุดเชื่อมโยงกลายเป็นสายโซ่กิ่ง (Branches) มากขึ้น ทำให้สายโซ่เคลื่อนที่หลุดออกจากกันยากขึ้น เมื่อได้รับแรงเป็นผลทำให้ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด สูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่เรียกว่า “จุดเกิดเจล” (Gel point) โครงสร้างโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงกลายเป็นโครงข่ายร่างแหสามมิติ (3-D Network) สมบูรณ์ หลังจากจุดสูงสุดสายโซ่เคลื่อนที่อย่างจำกัด เนื่องจากเกิดโครงข่ายร่างแหที่แน่น (Tight network) ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่เพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับ เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงลด และความแข็งแรงฉีกขาด ต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางกับสมบัติบางประการของยาง [2] แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการ [2]

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่เชื่อมโยงด้วยอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10-60 นาที พบว่าการเชื่อมโยงที่เวลา 20 นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด

จากรูปที่ 4.2 พบว่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากช่วงเวลาในการเชื่อมโยงยางทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น ซึ่งผ่านจุดเกิดเจลแล้ว สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของความแข็งแรงดึงข้างต้น

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (M100) และความแข็งแรงดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำหนักโมเลกุลระหว่างจุดเชื่อมโยง ( $M_c$ ) น้อยลง ทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ยากขึ้นถูกพันธะเชื่อมโยงยึดเหนี่ยวไว้ทำให้ยางแข็งขึ้น ต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อทำให้ยางเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูป

จากผลการทดลองสมบัติเชิงกล พบว่าค่าที่ได้มีแนวโน้มไม่เด่นชัด คาดว่าเนื่องมาจากยางรีคอมที่ป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตท่อน้ำซึมในงานวิจัยนี้เป็นยางที่นำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ามีสมบัติเชิงกลด้อยกว่ายางธรรมชาติ และสูตรที่ใช้ในการทดลองมีการเติมกำมะถันปริมาณน้อย โอกาสที่เกิดการเชื่อมโยงต่ำ ส่งผลให้จุดสูงสุดหรือจุดเกิดเจลไม่ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าที่ได้มีความเบี่ยงเบน คาดว่าเนื่องมาจากท่อน้ำซึมเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุน ซึ่งรูพรุนอาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

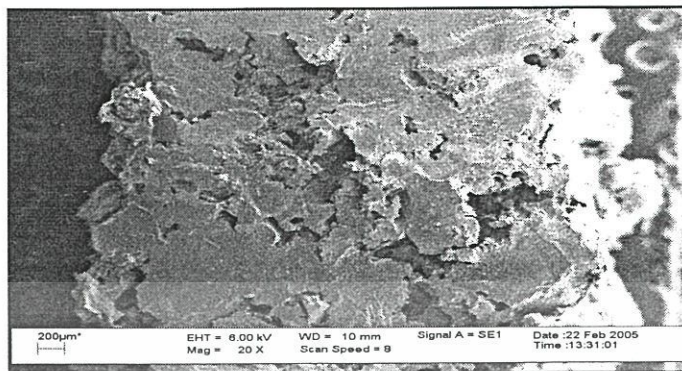
เป็นจุดบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงาน และสารให้ฟอง DNPT มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องจาก

1. เครื่องผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเครื่องผสมแบบเปิด ที่มีอัตราการให้แรงเฉือน (Shear rate) ต่ำ ซึ่งการผสมขึ้นอย่างมากกับผู้ใช้ปฏิบัติและเวลาในการผสม
2. เนื้อยางในยางรีคอมมีปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 50 และสารเติมแต่งที่ใช้มีปริมาณมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้การกระจายตัวของให้ฟอง DNPT ไม่สม่ำเสมอ แสดงดัง

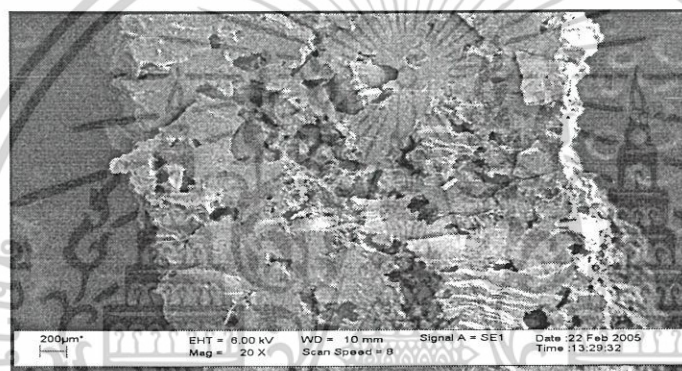
รูปที่ 4.7



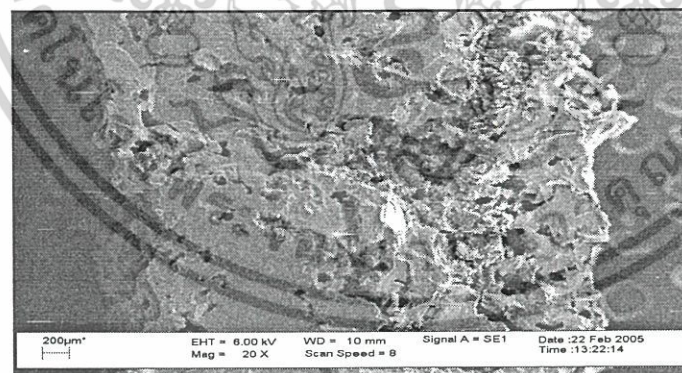
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

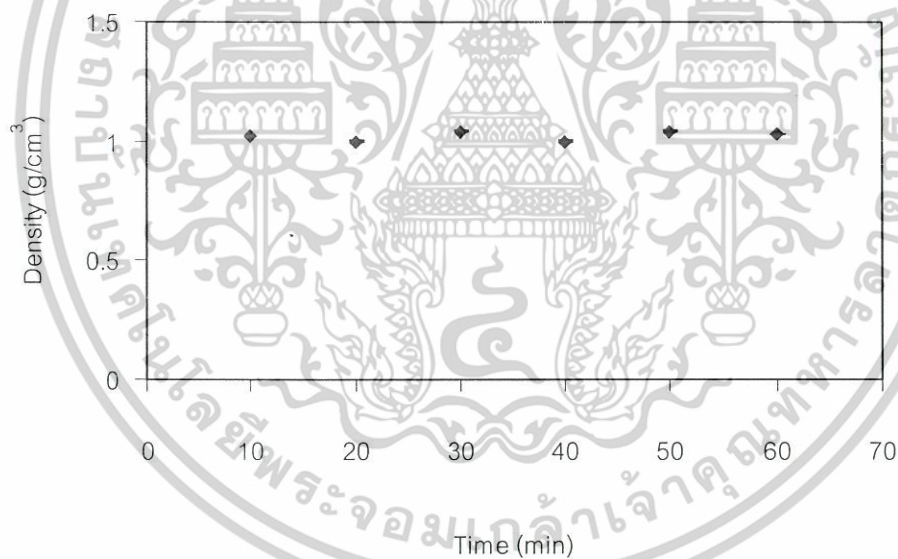


(ค)

รูปที่ 4.7 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:C-black (50:50:20) (ก) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที (ข) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที (ค) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที

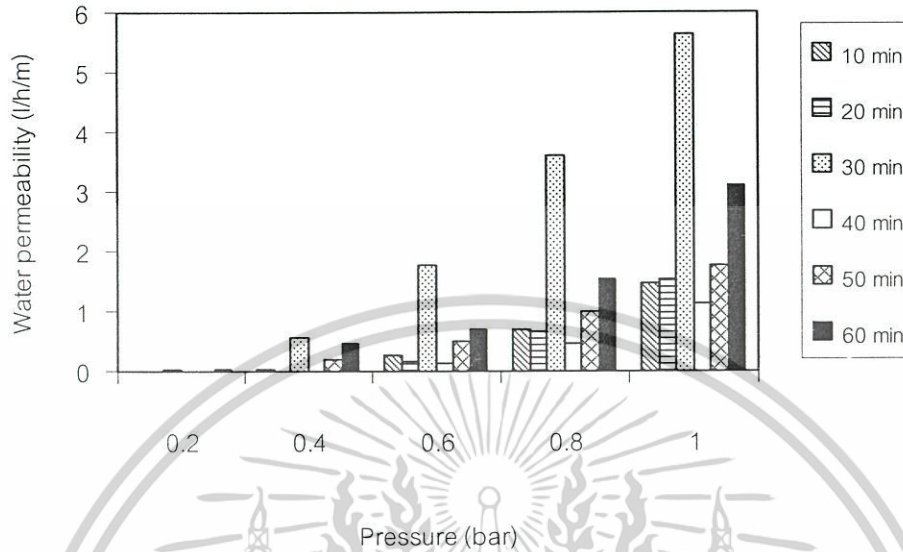
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะวิธานของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วยยางรีไซเคิล:ผงยางรถยนต์: เชมดำ เท่ากับ 50:50:20 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที พบว่าการกระจายตัวของสารให้ฟอง DNPT ไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณที่ไม่มีสารให้ฟอง DNPT จะมีการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางรีไซเคิลและผงยางรถยนต์ มีฟองอากาศเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นอากาศที่อยู่ในยางรีไซเคิล หรือเกิดขึ้นในระหว่างการบดผสม หรือเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคผงยางรถยนต์ บริเวณที่มีปริมาณสารให้ฟอง DNPT น้อย จะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซ ทำให้เกิดรูพรุนเป็นช่องสีดำภายในชิ้นงาน โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นน้อยมากและไม่ต่อเนื่อง และบริเวณที่มีปริมาณสารให้ฟอง DNPT มาก จะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซ ทำให้เกิดรูพรุนมากและมีความต่อเนื่อง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นที่เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน พบว่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความหนาแน่นมีค่าประมาณ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่ามากเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีรูพรุน ดังนั้นจึงคาดว่าสารให้ฟอง DNPT ทำให้เกิดช่องว่างแบบเปิด (Open cell) เมื่อสลายตัวเป็นก๊าซทำให้ก๊าซที่เกิดหลุดออกจากผลิตภัณฑ์ไม่เกิดเป็นฟองขังอยู่ในชิ้นงาน ทั้งนี้เนื่องจากสูตรยางที่ใช้มีปริมาณเนื้อยางที่เป็น วัสดุภาคต่อเนื่องอยู่น้อย

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน สามารถแบ่งพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

- กรณีที่ 1 เมื่อความดันเท่ากันแต่เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน พบว่ามีความแปรปรวนของอัตราการซึมผ่านของน้ำค่อนข้างมาก อาจเนื่องจากการกระจายตัวของสารให้ฟอง DNPT ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับเหตุผลข้างต้น
- กรณีที่ 2 เมื่อเวลาการเชื่อมโยงเท่ากันแต่ความดันต่างกัน พบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความดันสูงขึ้นผนังเซลล์จะเกิดการขยายตัวมากขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทางทฤษฎี ความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านของน้ำ ขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของรูพรุนภายในชิ้นงานโดยตรง กล่าวคือ ถ้าชิ้นงานมีจำนวนรูพรุนมากและมีรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมากและความหนาแน่นลดลง แต่ถ้าชิ้นงานมีจำนวนรูพรุนน้อยและมีรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำน้อยและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

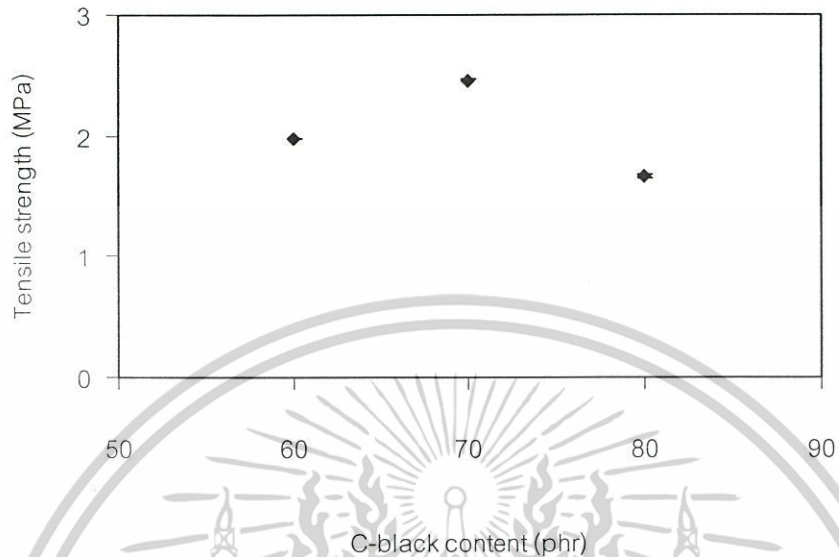
จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และเวลาการเชื่อมโยงต่าง ๆ พบว่า การเชื่อมโยงที่เวลา 20 นาที มีความแข็งแรงดัดดีกว่าที่เวลาการเชื่อมโยงอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลารวมนี้เพื่อศึกษาหาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมต่อไป

#### 4.2.2 หาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสม

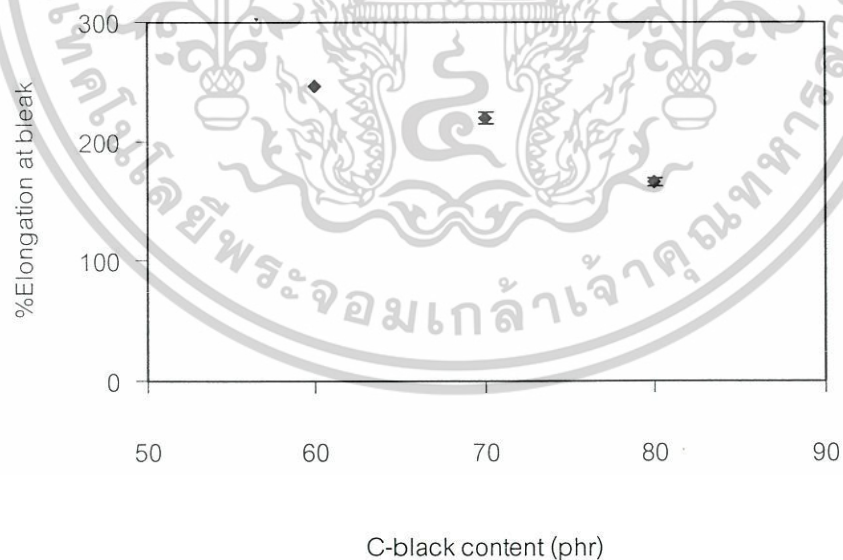
การหาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมเพื่อต้องการปรับปรุงความแข็งแรงของท่อน้ำซึมให้สูงขึ้น และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสม เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงจึงทำให้ท่อน้ำซึมมีความแข็งแรงมากขึ้น และช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้น เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) ลดการเกิดการบวมตัวที่หัวตาย (Die swell) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึมหลังการขึ้นรูป นอกจากนี้เขม่าดำยังมีราคาถูกช่วยลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตามปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไป อาจมีผลต่อกระบวนการผลิตและสมบัติต่าง ๆ รวมถึงอัตราการซึมผ่านของท่อน้ำซึม

จากการศึกษาเมื่อนำยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:สารให้ฟอง DNPT เท่ากับ 50:50:3 และเติมเขม่าดำเพิ่มในปริมาณ 10 20 30 และ 40 phr ทำให้มีปริมาณเขม่าดำรวมเท่ากับ 60 70 80 และ 90 phr ตามลำดับ (การหาปริมาณเขม่าดำรวม แสดงดังภาคผนวก ข) เนื่องจากในยางรีเคลมมีเนื้อยางร้อยละ 50 และปริมาณเขม่าดำร้อยละ 25 หรือมีปริมาณเขม่าดำผสมอยู่แล้ว 50 phr ขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีด (ยางผสมสูตรมีปริมาณเขม่าดำรวม 90 phr ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมได้) ทำการเชื่อมโยงท่อน้ำซึมที่เตรียมได้ โดยให้ความร้อนด้วยเครื่องอบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.10–4.14 และ 4.16–4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

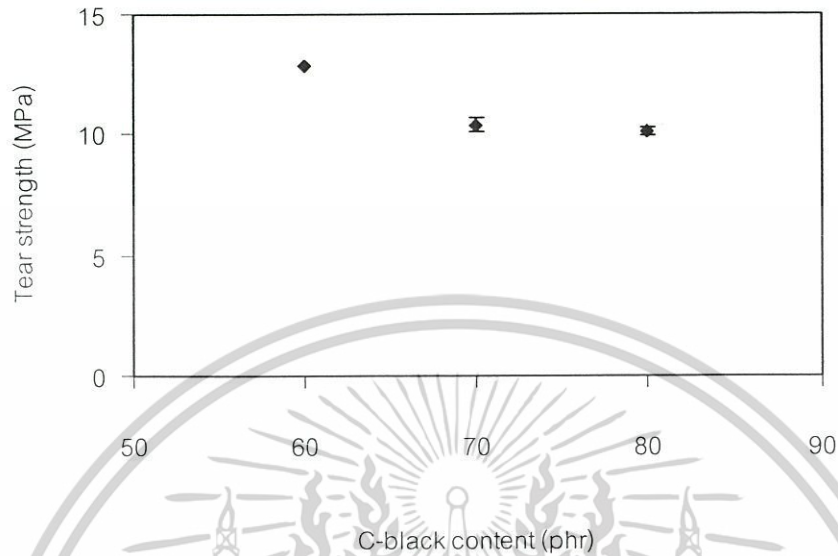


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน

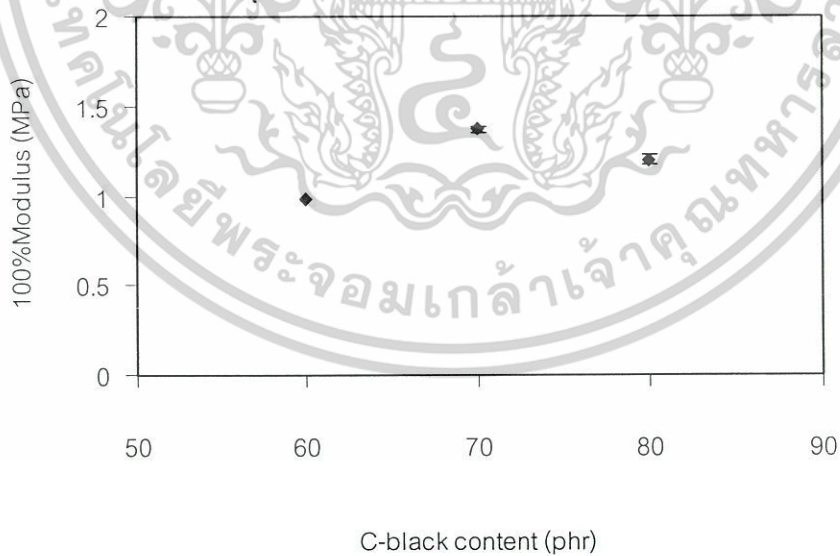


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

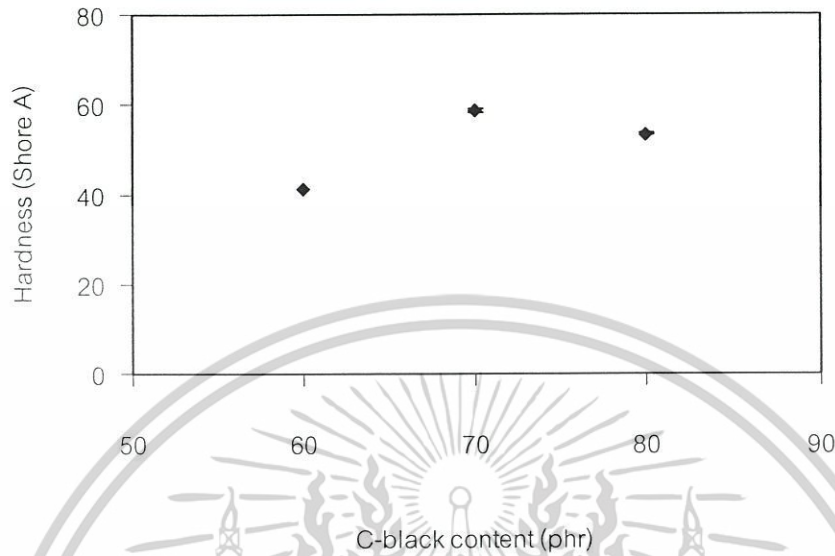


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

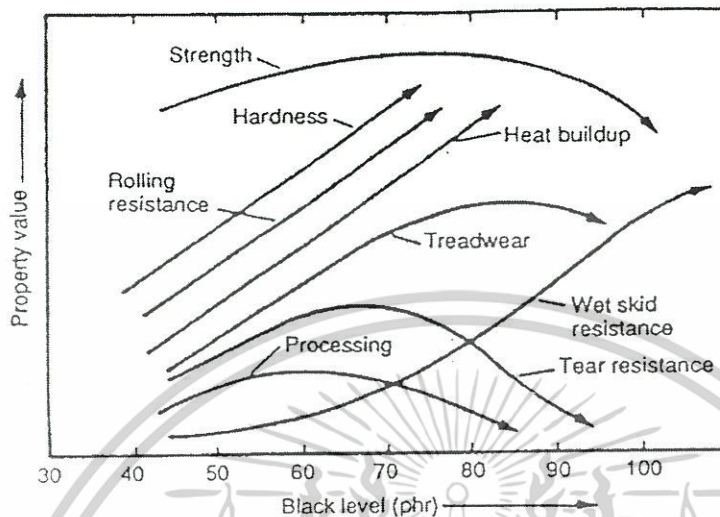


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน

รูปที่ 4.10–4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณเขม่าดำรวม 60 70 และ 80 phr ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซีเมนต์ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งกด

จากรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำรวมเพิ่มขึ้นในช่วง 60–70 phr ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณเขม่าดำรวมมากกว่า 70 phr ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเขม่าดำและยางมากขึ้น โดยเกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างเขม่าดำมากขึ้น (Bound rubber) เป็นผลทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณเขม่าดำมากเกินไปอาจเกิดการผสมที่ไม่เพียงพอทำให้การกระจายตัวของเขม่าดำไม่สม่ำเสมอเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือแอกไกลเมอเรต (Agglomerates) อาจทำให้เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในกลุ่มก้อนเขม่าดำและภายในยางเป็นผลให้ความแข็งแรงดึงลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของยาง [20] ดังรูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติของยาง [20]

จากรูป 4.11 พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีความแข็งแรงมาก มีมอดุลัสสูงมากเมื่อเทียบกับยาง (มากกว่าประมาณ 10,000 เท่า) เขม่าดำจึงไม่มีการเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรง ส่วนยางเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูปได้มาก ดังนั้นปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีความสามารถในการเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูปได้น้อยลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์การขยายความเครียด (Strain amplification effect) [2] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 4.1

$$\Lambda = 1 + (1 + 2.5\phi + 14.1\phi^2)\epsilon \quad (4.1)$$

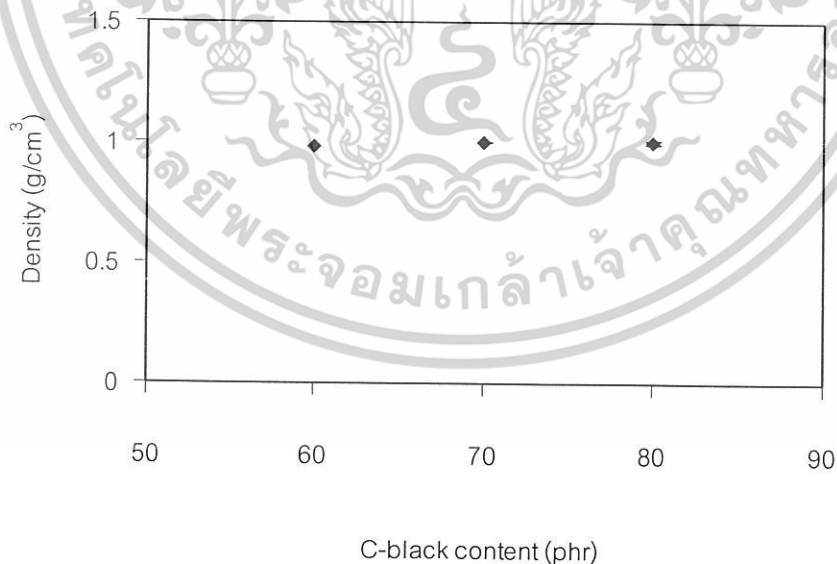
เมื่อ	$\Lambda$	คือ	อัตราส่วนการยืดที่แท้จริงของยาง (ไม่มีหน่วย)
	$\phi$	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของเขม่าดำในยาง (ไม่มีหน่วย)
	$\epsilon$	คือ	ค่าความเครียด (Strain) (ไม่มีหน่วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 4.1 เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการขยายความเครียด (Strain amplification factor) หรืออัตราส่วนการยืดที่แท้จริง (Actual elongation ratio,  $\Lambda$ ) ของยาง มีค่ามากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการยืดลดลง

จากรูป 4.12 พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำรวมเพิ่มขึ้นในช่วง 60–80 phr ความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสูตรที่ใช้ประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างยางรีเคิลมและผงยางรถยนต์เท่ากับ 50:50 ซึ่งผงยางรถยนต์เป็นอนุภาคของแข็งเช่นเดียวกับเขม่าดำ ดังนั้นปริมาณเขม่าดำที่เติมจึงมีปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ หรือแอกไกลเมอเรต (Agglomerates) ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณเขม่าดำที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง

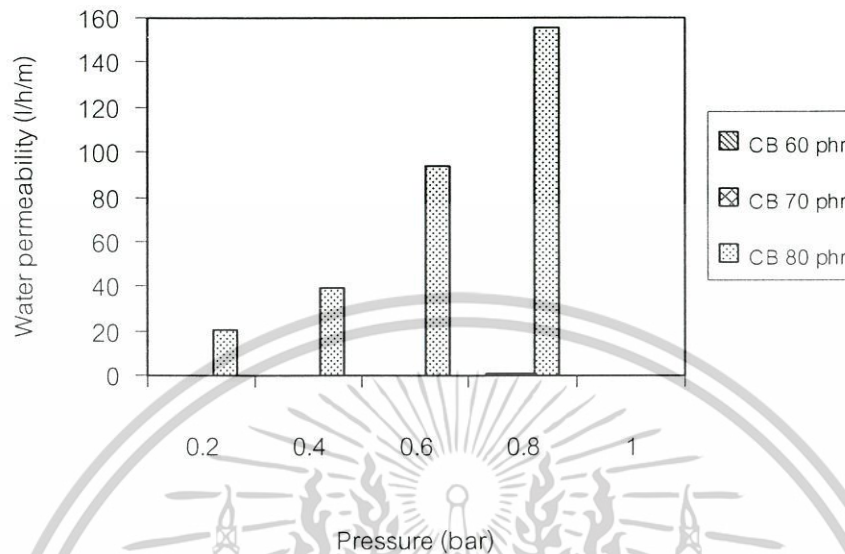
จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นในช่วง 60-70 phr มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์ และความแข็งกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณเขม่าดำมากกว่า 70 phr มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์ และความแข็งกด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติม ที่มีความแข็งแรงมาก มีมอดุลัสสูง เมื่อเทียบกับยาง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เป็นผลให้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณเขม่าดำมากเกินไป อาจเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ หรือแอกไกลเมอเรต (Agglomerates) ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของความแข็งแรงดังข้างต้น



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:

GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT (50:50:3) เมื่อปริมาณเขม่าดำรวมต่างกัน

จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำรวมเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของท่อน้ำซึมมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คาดว่าเนื่องจากเขม่าดำมีความหนาแน่นสูง (ความหนาแน่นของเขม่าดำเท่ากับ 1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) เมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ ในยาง (ความหนาแน่นของยางรีเคลมเท่ากับ 1.14 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเขม่าดำ ความหนาแน่นของวัสดุโดยรวมจึงสูงขึ้นตามกฎของของผสม (Rule of mixture) นอกจากนี้ปริมาณเขม่าดำรวมที่มากขึ้นทำให้ความหนืดของยางผสมสูงขึ้น ตามสมการของ กัท-โกลด์ (Guth-Gold equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมที่ใส่ในยางดังสมการที่ 4.2 [2] อย่างไรก็ตามสมการของ กัท-โกลด์ จะประมาณค่าความหนืดได้ถูกต้องแม่นยำเมื่อใช้กับยางที่ผสมสารตัวเติมก่อนกลบที่มีโครงสร้าง (Structure) น้อย และผสมสารตัวเติมปริมาณไม่สูงมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_f = \eta_u (1 + 2.5C + 14.1C^2) \quad (4.2)$$

เมื่อ	$\eta_f$	คือ	ความหนืดของยางผสมสารตัวเติม (Filled compound)
	$\eta_u$	คือ	ความหนืดของยางไม่ผสมสารตัวเติม (Unfilled compound)
	C	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมในยาง (Volume fraction of filler)

โดยความหนืดของยางผสมสูตรที่สูงขึ้น อาจไปขัดขวางการขยายตัวเป็นก๊าซเพื่อเกิดเป็นรูพรุนของสารให้ฟอง ทำให้จำนวนรูพรุนมีขนาดเล็กและจำนวนน้อย อย่างไรก็ตามปริมาณเคมีดำที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ หรือแอกไกลเมอเรต ทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ภายในกลุ่มก้อนเคมีดำ และภายในยาง ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้ ส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกันและเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อปริมาณเคมีดำเพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากปริมาณเคมีดำที่เพิ่มมากขึ้น อาจทำให้เกิดช่องว่างภายในกลุ่มก้อนเคมีดำ และภายในยาง จากการทดลองพบว่า ที่ความดัน 1 บาร์ของปริมาณเคมีดำรวม 60 70 และ 80 phr เกิดการขาดของท่อน้ำซึม เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่พอเพียงพอที่จะทนต่อความดัน 1 บาร์ได้

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ปริมาณเคมีดำต่าง ๆ พบว่าปริมาณเคมีดำรวม 70 phr มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำดีกว่าที่ปริมาณเคมีดำอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกปริมาณเคมีดำรวม 70 phr ในการศึกษาปัจจัยอื่นต่อไป

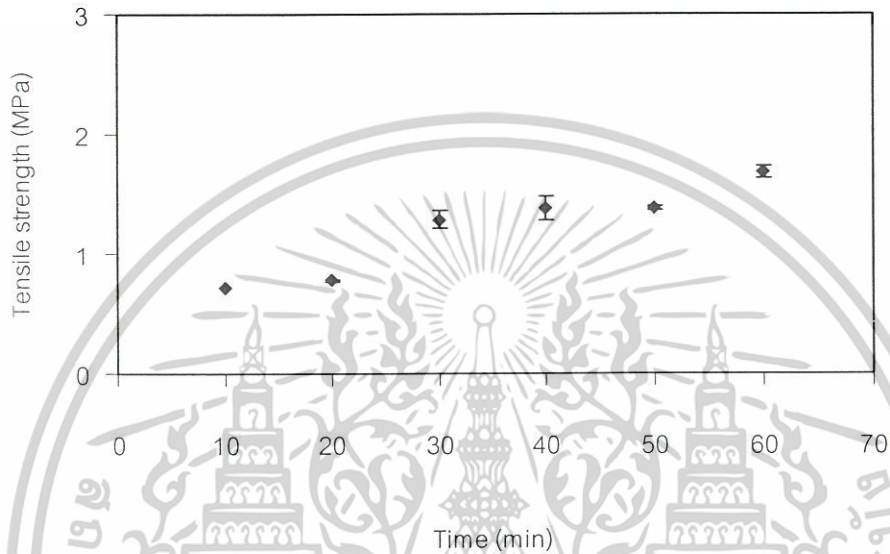
### 4.3 ผลของปริมาณสารให้ฟอง

#### 4.3.1 หาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสม

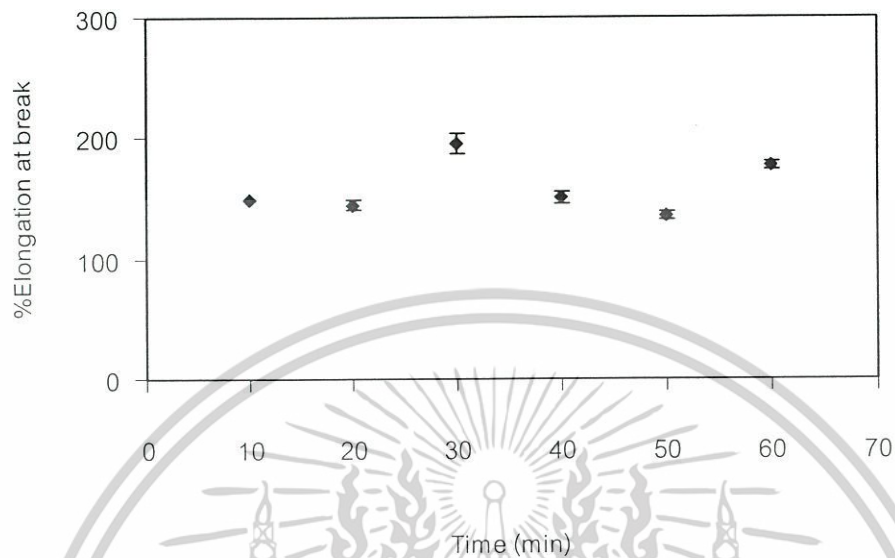
จากการศึกษาท่อน้ำซึมที่กล่าวมาข้างต้น พบว่ามีการเติมสารให้ฟอง DNPT และสารกระตุ้นสารให้ฟองชนิดยูเรีย (Urea) ในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งยูเรียมีสมบัติเป็นด่างจะส่งผลให้เวลาในการเชื่อมโยงลดลง [15] เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ต่างกัน ปริมาณสารกระตุ้นสารให้ฟอง Urea ย่อมต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมของปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่ต่างกัน โดยวิธีการที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นวิธีการที่ผลิตคนละครั้งกับการทดลองในหัวข้อ 4.2 สามารถแบ่งพิจารณาออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

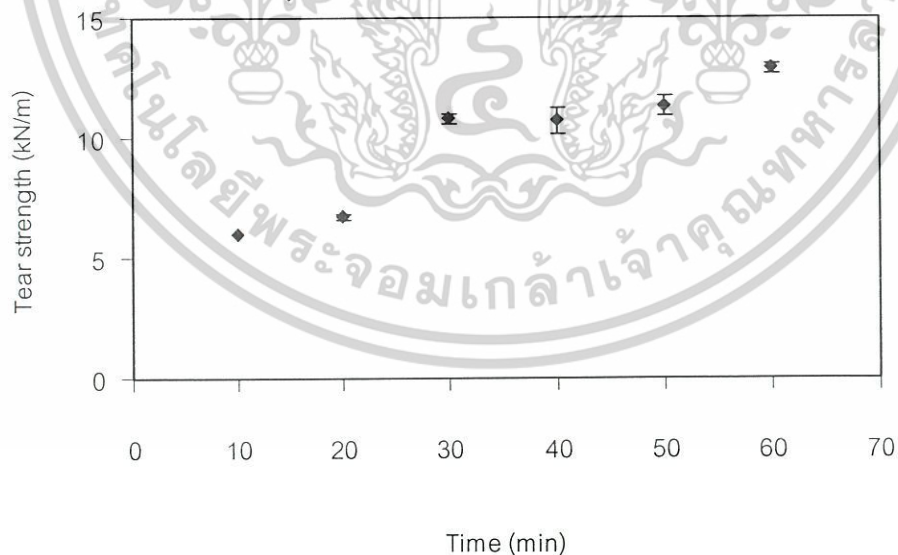
4.3.1.1 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 โดยผลของปริมาณสารให้ฟอง ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังรูป 4.18–4.23



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

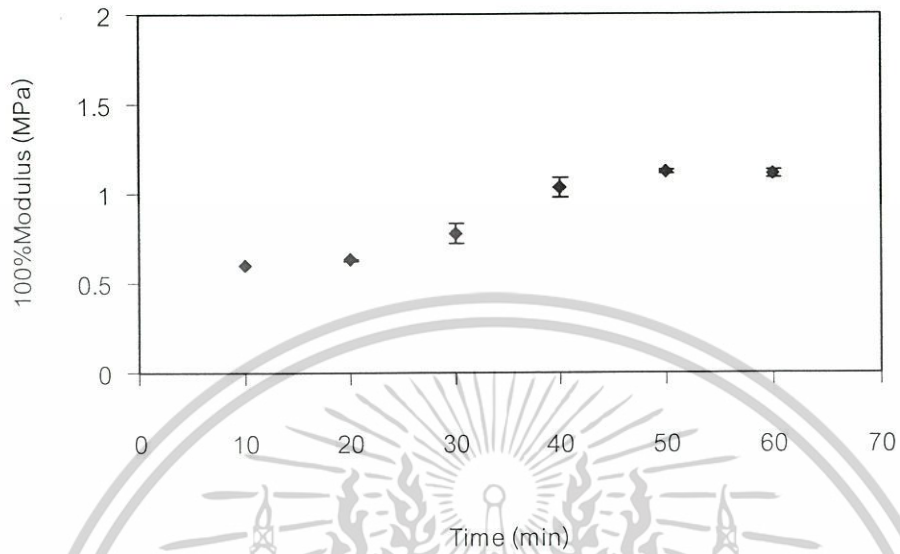


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

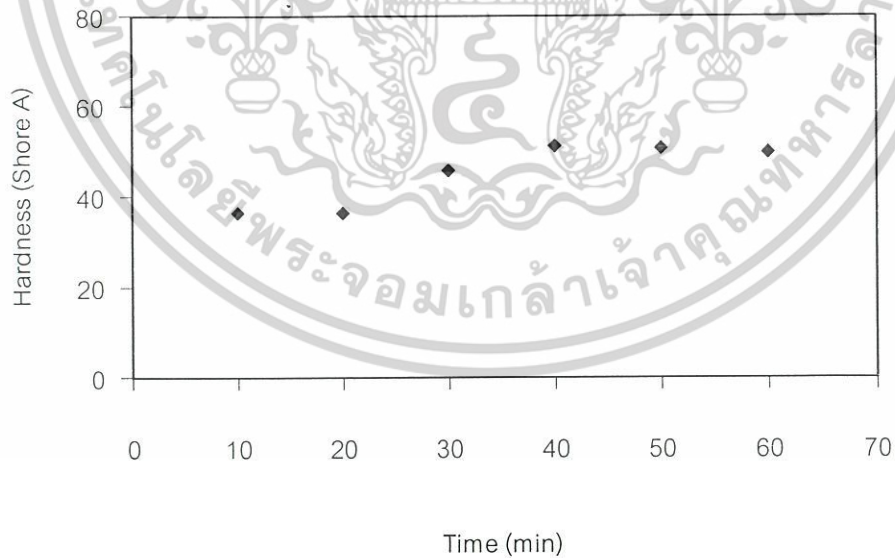


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

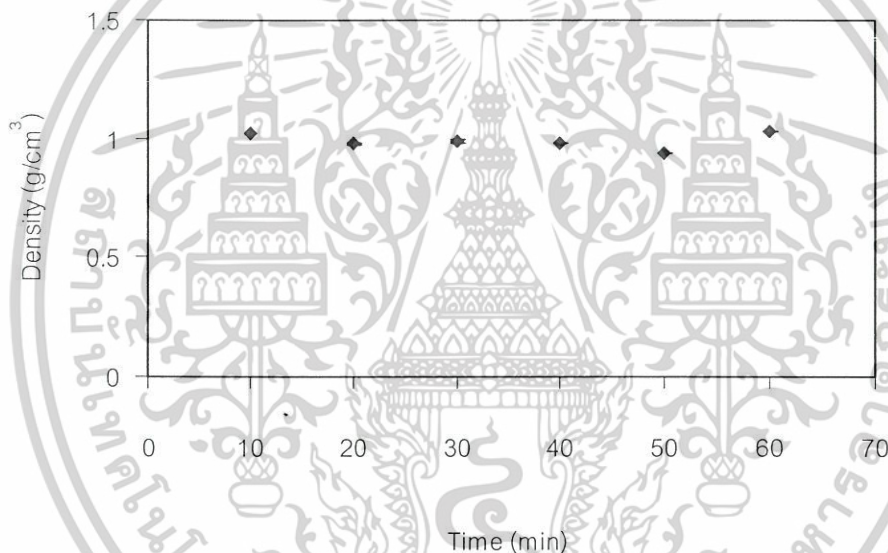


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18–4.20 พบว่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาดและความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเชื่อมโยงนานขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงก่อนจุดเกิดเจล (Gel point) ซึ่งยางยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างโมเลกุลยังเป็นสายโซ่ตรงยังไม่เป็นร่างแหสามมิติที่สมบูรณ์ ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของความแข็งแรงดึงตามหัวข้อ 4.2.1

จากรูปที่ 4.21–4.22 พบว่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซนต์และความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อใช้เวลานานในการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้น ต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อทำให้ยางเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูป ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

จากรูปที่ 4.23 พบว่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมมีค่าใกล้เคียงกันในทุกเวลาการเชื่อมโยง เนื่องจากสูตรยางที่ใช้มีปริมาณเนื้อยางที่เป็นวัสดุภาคต่อเนื้ออยู่น้อย ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1

อัตราการซึมผ่านของน้ำไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากเมื่อใช้ความดันตั้งแต่ 0.2 บาร์ ท่อน้ำซึมเกิดการขาด ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากชิ้นงานมีความแข็งแรงน้อยเนื่องจากช่วงเวลาการเชื่อมโยงเป็นจุดก่อนเกิดเจล ซึ่งยางยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างโมเลกุลยังเป็นสายโซ่ตรงยังไม่เป็นร่างแหสามมิติที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

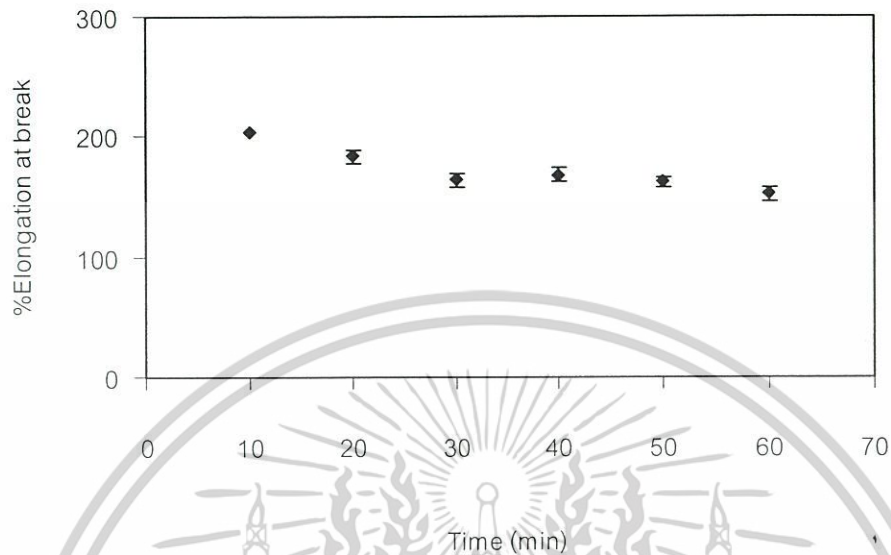
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 และเวลาการเชื่อมโยงต่าง ๆ พบว่า การเชื่อมโยงที่เวลา 60 นาที มีความแข็งแรงดีเหมาะสมกว่าที่เวลาการเชื่อมโยงอื่น ๆ

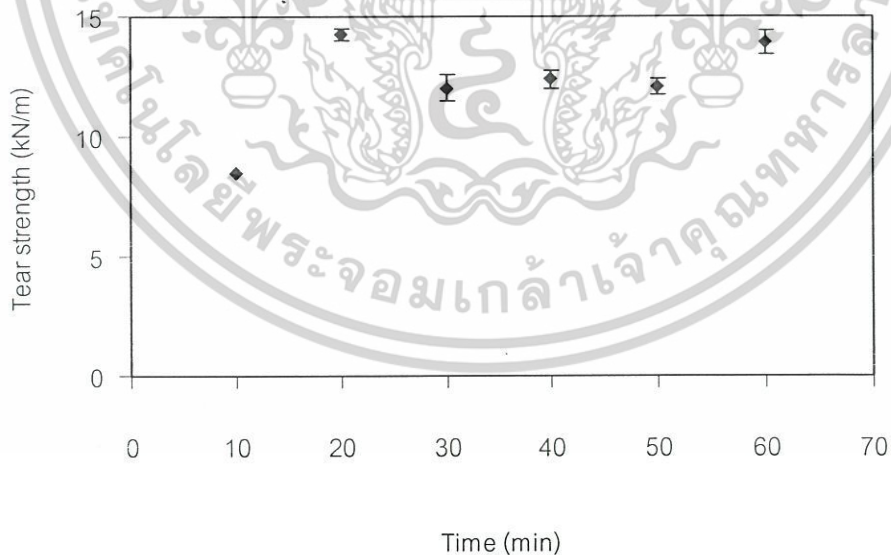
4.3.1.2 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 โดยผลของปริมาณสารให้ฟองที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังรูป 4.24–4.30



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

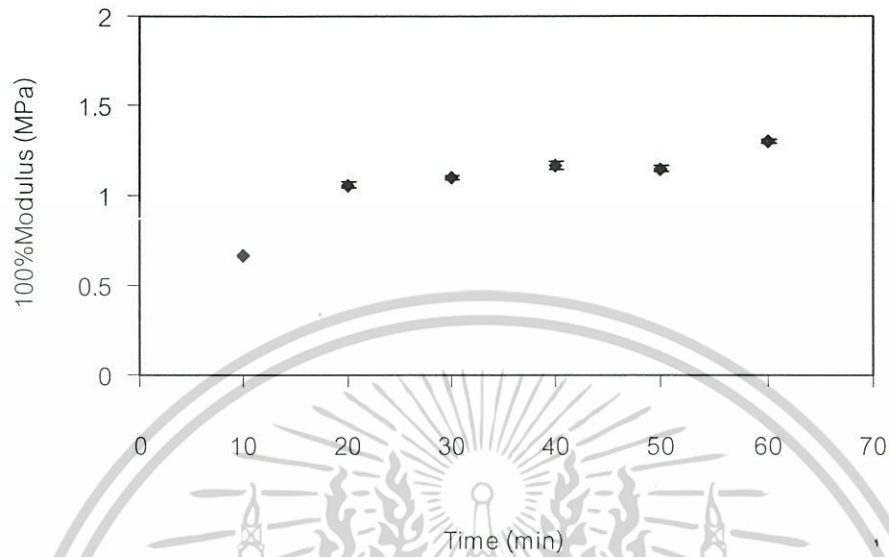


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

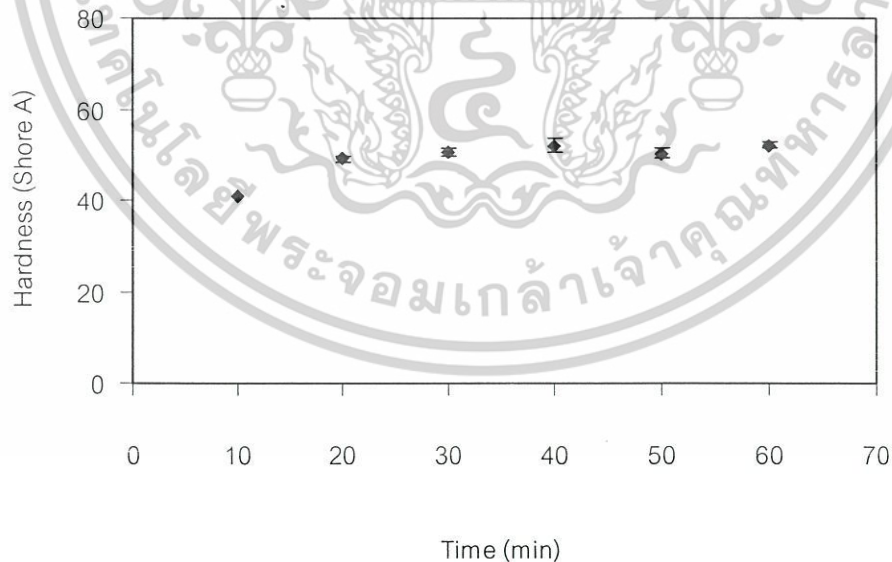


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน



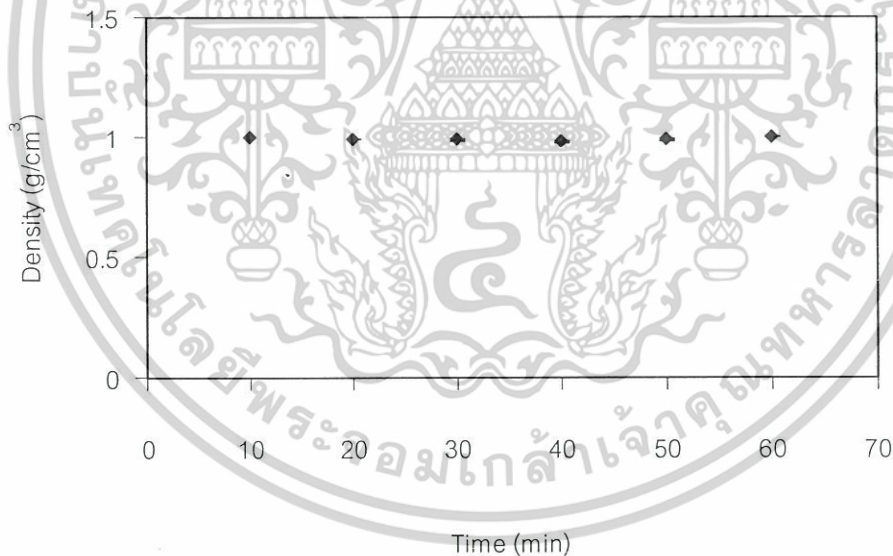
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.24 และ 4.26 พบว่าความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง เนื่องจากก่อนจุดสูงสุดยางยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้เวลากการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ยางเชื่อมโยงสมบูรณ์ และหลังจากจุดสูงสุด ยางเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของความแข็งแรงดึง ตามหัวข้อ 4.2.1

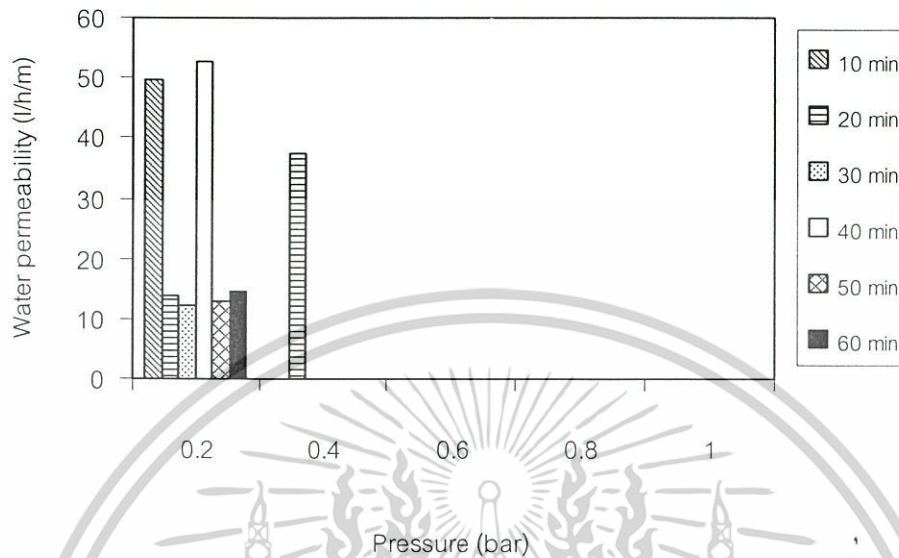
จากรูปที่ 4.25 พบว่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากช่วงเวลาในการเชื่อมโยงทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น ซึ่งผ่านจุดเกิดเจลแล้ว สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 พบว่าโมดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้น ต้องใช้แรงมากเพื่อให้ยางเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูป ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

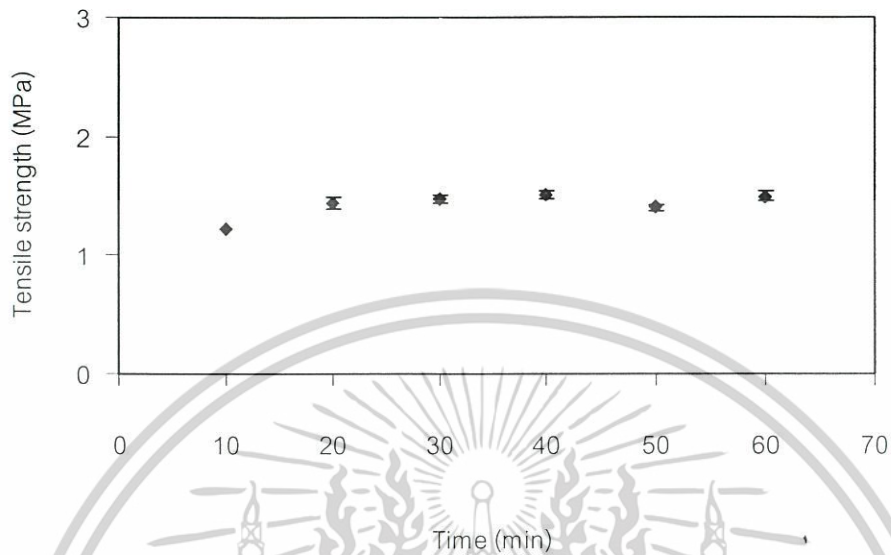
จากรูปที่ 4.29 พบว่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมมีค่าใกล้เคียงกันในทุกเวลาการเชื่อมโยง เนื่องจากสูตรยางที่ใช้มีปริมาณเนื้อยางที่เป็นวัสดุภาคต่อเนืองอยู่น้อย ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1

จากรูปที่ 4.30 พบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำ มีความแปรปรวนและเมื่อใช้ความดันตั้งแต่ 0.4 บาร์ ท่อน้ำซึมจะเกิดการขาด เนื่องจากการกระจายตัวของสารให้ฟอง DNPT ในแต่ละบริเวณไม่สม่ำเสมอ ชิ้นงานที่นำมาทดสอบอาจเป็นบริเวณที่มีสารให้ฟอง DNPT อยู่มาก เมื่อสารให้ฟอง DNPT สลายตัวเป็นก๊าซเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกันเป็นช่องว่าง (Voids) เกิดเป็นจุดบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงาน

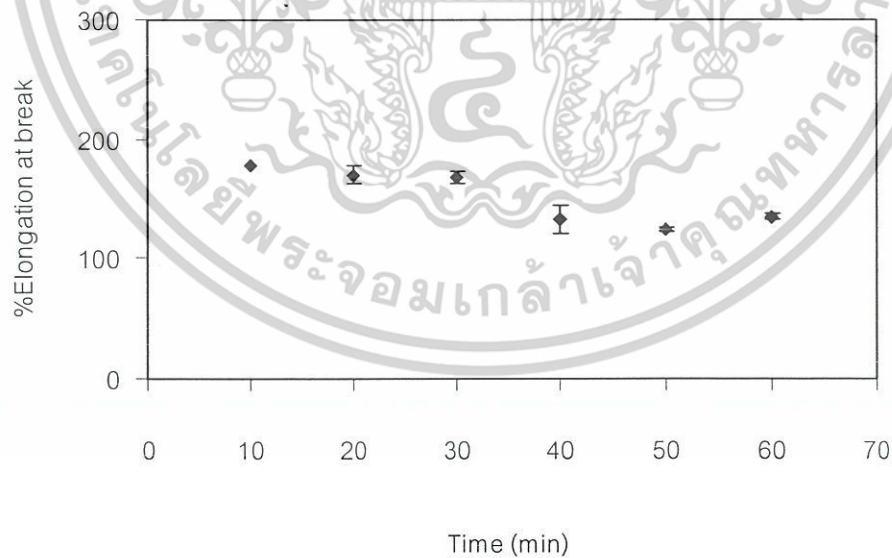
จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำ ที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 และเวลาการเชื่อมโยงต่าง ๆ พบว่าการเชื่อมโยงที่เวลา 40 นาที มีความแข็งแรงดีเหมาะสมกว่าที่เวลาการเชื่อมโยงอื่น ๆ

4.3.1.3 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 โดยผลของปริมาณสารให้ฟองที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.31-4.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

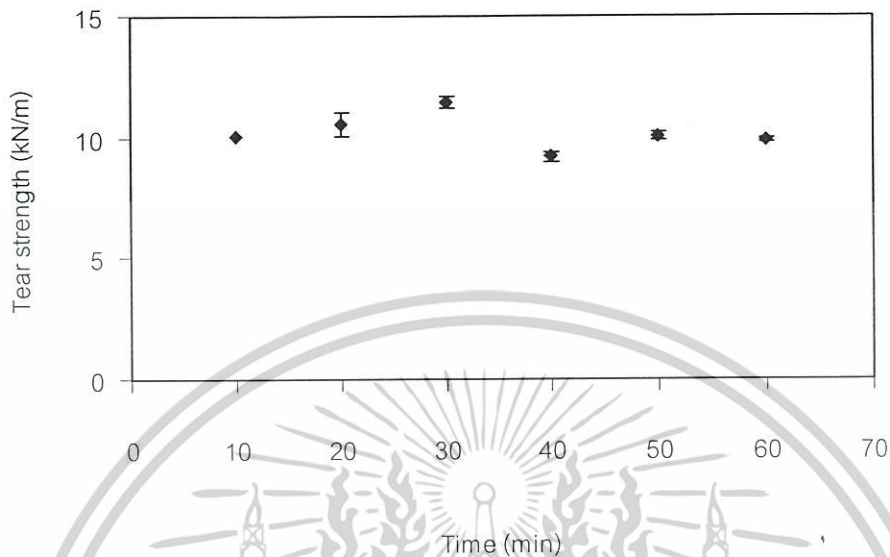


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

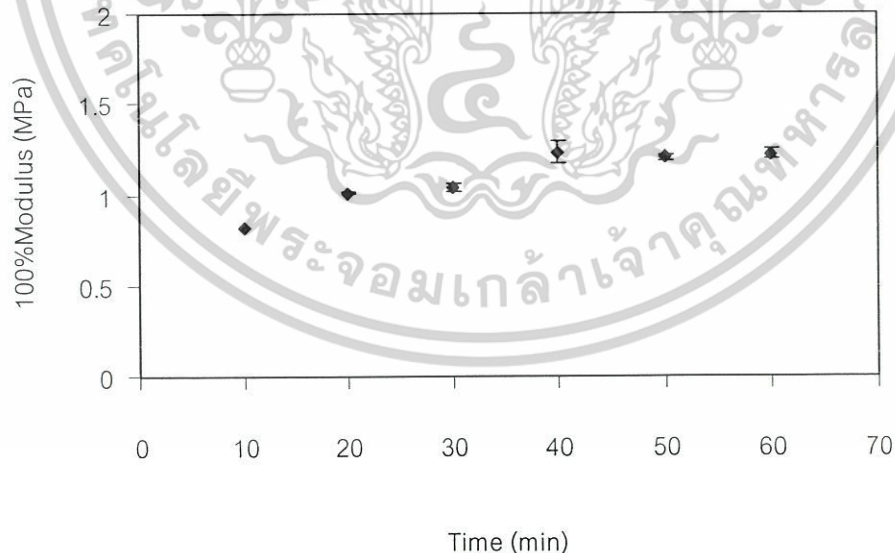


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

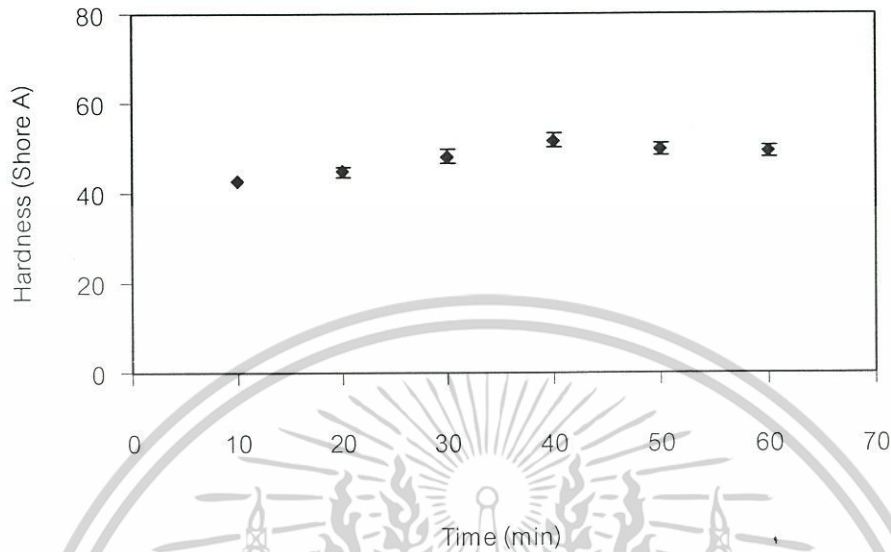


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของพ่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

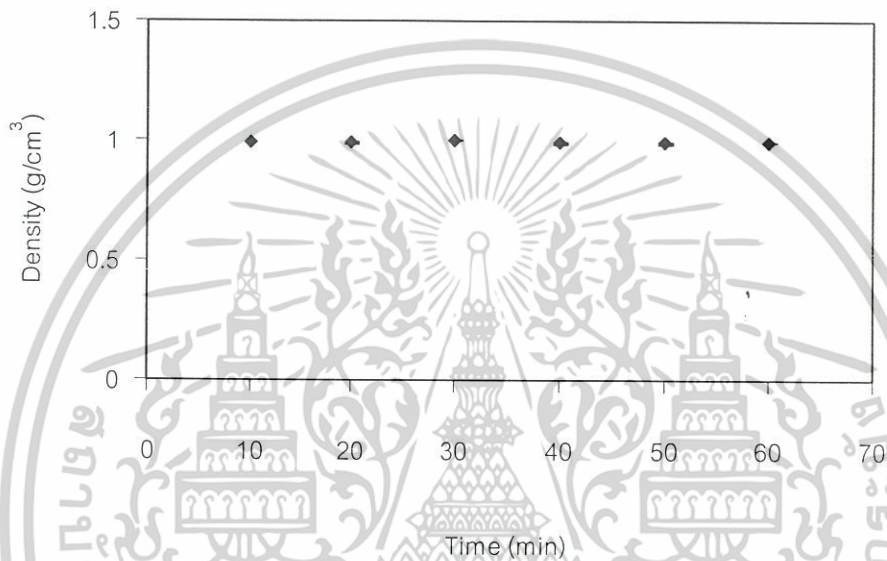
จากรูปที่ 4.31 พบว่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง เนื่องจากเมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ยางเชื่อมโยงสมบูรณ์ และหลังจากจุดสูงสุด ความแข็งแรงดึงจะลดลง เพราะเกิดการเสียหายแบบสายโซ่ขาด (Chain scission) อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการเชื่อมโยงนานขึ้น อาจเกิดการแตกออกของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic linkages) แล้วเชื่อมโยงใหม่เป็นพันธะเชื่อมโยงเดี่ยวโมโนซัลฟิดิก (Monosulfidic linkages) [2] จึงส่งผลให้ความแข็งแรงดึงคงที่

จากรูปที่ 4.32 พบว่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากช่วงเวลาในการเชื่อมโยงทำให้ยางเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น ซึ่งผ่านจุดเกิดเจลแล้ว สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของร้อยละการยืด ณ จุดขาด ตามหัวข้อ 4.2.1

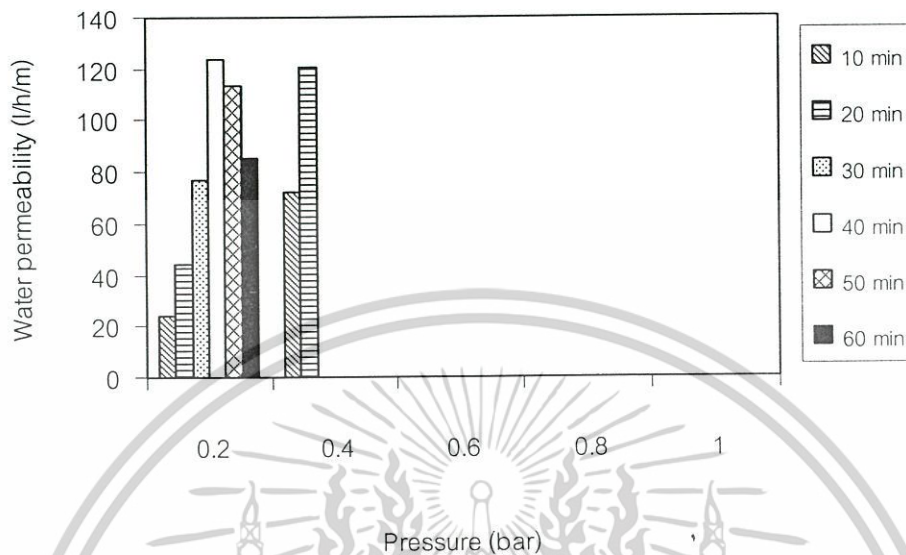
จากรูปที่ 4.33 พบว่าความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง เนื่องจากก่อนจุดสูงสุดยางยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ เมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ยางเชื่อมโยงสมบูรณ์ และหลังจากจุดสูงสุด ยางเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของความแข็งแรงดึงตามหัวข้อ 4.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 พบว่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้น ต้องใช้แรงมากเพื่อให้ยางเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูป ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) เมื่อเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

จากรูปที่ 4.36 พบว่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมมีค่าใกล้เคียงกันในทุกเวลาการเชื่อมโยง เนื่องจากสูตรยางที่ใช้มีปริมาณเนื้อยางที่เป็นวัสดุภาคต่อเนื้ออยู่น้อย ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.1

จากรูปที่ 4.37 พบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำมีความแปรปรวนและเมื่อใช้ความดันตั้งแต่ 0.4 บาร์ ท่อน้ำซึมจะเกิดการขาด เนื่องจากการกระจายตัวของสารให้ฟอง DNPT แต่ละบริเวณไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 4.3.1.2

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 และเวลาการเชื่อมโยงต่าง ๆ พบว่าการเชื่อมโยงที่เวลา 20 นาที มีความแข็งแรงดีเหมาะสมกว่าที่เวลาการเชื่อมโยงอื่น ๆ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยาง-รีเคลม:ผงยางรถยนต์:สารให้ฟอง DNPT:เขม่าดำ เท่ากับ 50:50:3:20 ระหว่างการทดลองตามหัวข้อ 4.2.1 และ 4.3.1.3 พบว่ามีสมบัติเหล่านี้แตกต่างกันมาก แสดงว่ายางรีเคลมที่ผลิตคนละครั้ง มีผลอย่างมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 หาปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่เหมาะสม

จากการศึกษาท่อน้ำซึมที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าการใส่สารให้ฟอง DNPT ในปริมาณต่างกัน จะส่งผลถึงสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ อัตราการซึมผ่านของน้ำ และเวลาการเชื่อมโยง จึงจำเป็นต้องหาปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่เหมาะสมกับการใช้งานและกระบวนการผลิต

จากหัวข้อ 4.3.1 สามารถสรุปได้ว่าปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที ทำให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด แต่การหาปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่เหมาะสม ต้องนำผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance) การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด (Compression deflection) และสัญญาณวิทยา มาพิจารณาด้วย แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.38-4.39

ตารางที่ 4.1 ความต้านทานต่อโอโซนของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: C-black (50:50:20) เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ต่างกัน

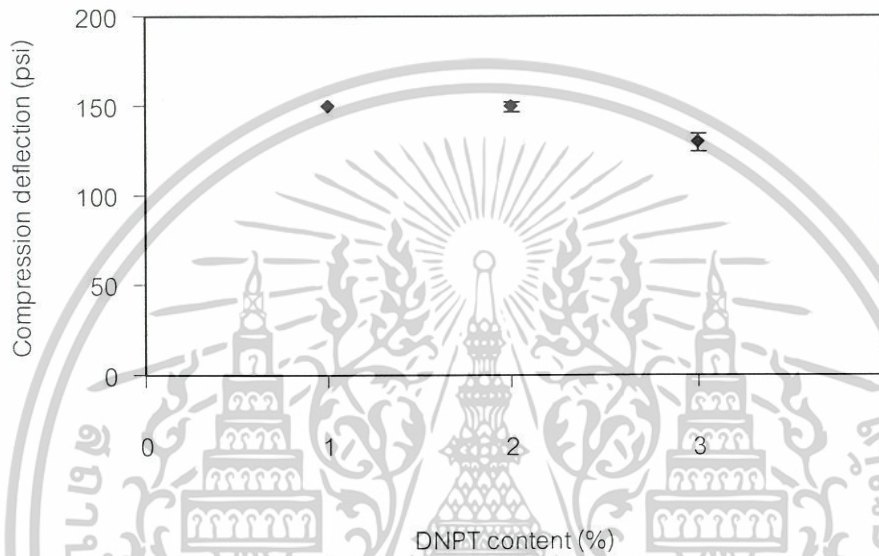
ปริมาณสารให้ฟอง DNPT (ร้อยละ)	ความต้านทานต่อโอโซนที่ 25 pphm, 40°C, ระยะเวลา 20%, 72 hr
1	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร
2	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร
3	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบความต้านทานต่อโอโซนของท่อน้ำซึมที่มีปริมาณสารให้ฟอง DNPT ต่างกัน พบว่าชิ้นงานมีความต้านทานต่อโอโซนในระดับเดียวกัน คือ เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร ซึ่งรอยแตกที่เกิดขึ้น จะตั้งฉากกับแนวการยืด ถึงแม้ว่าจะใส่ซีฟี่มิ่งปิโตรเลียมปริมาณ 0.5 phr เพื่อป้องกันโอโซน แต่ชิ้นงานยังคงเกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน เนื่องจากยางรีเคลมซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักในการผลิตท่อน้ำซึม เป็นยางที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างของยางจากโครงสร้างร่างแห 3 มิติ ให้เป็นโครงสร้างสายโซ่ 2 มิติ (Devulcanization) และยางรีเคลมประกอบด้วยยางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งโครงสร้างของยางธรรมชาติ

เอ็กสตรินเป็นเอ็กสตรินที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ณาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

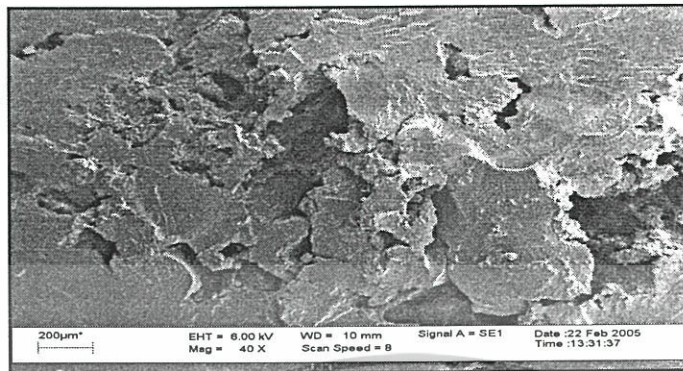
เป็นโครงสร้างที่ไม่อึดมตัว นอกจากนี้ภายในชิ้นงานมีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อทำการทดสอบจะมีการยืดชิ้นงานออกไประดับหนึ่ง จึงทำให้รูพรุนภายในชิ้นงานเกิดการยืดขยายไปตามแนวแรงซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกจำนวนมาก ทำให้มีความต้านทานต่อไอโซนได้ไม่ดีนัก



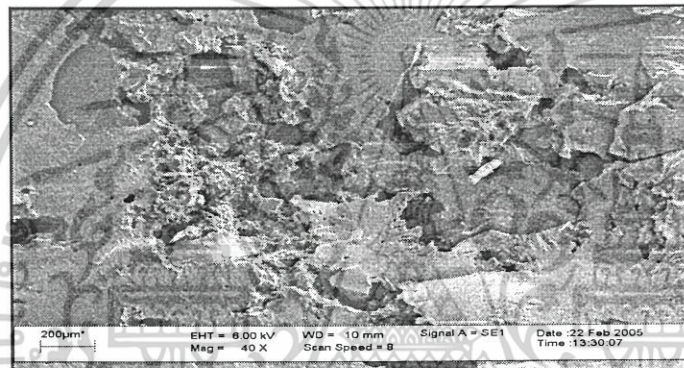
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:C-black (50:50:20) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ต่างกัน

จากรูปที่ 4.38 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด (Compression deflection) มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง DNPT เนื่องจากปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่มากขึ้น สามารถสลายตัวเป็นก๊าซทำให้เกิดรูพรุนได้มาก อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น ไม่ได้ส่งผลให้รูพรุนเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณเขม่าดำรวมถึง 70 phr ซึ่งปริมาณเขม่าดำที่มาก อาจขัดขวางการขยายตัวของก๊าซเพื่อเกิดรูพรุนของสารให้ฟอง DNPT ทำให้เกิดรูพรุนไม่แตกต่างกันมากในแต่ละปริมาณสารให้ฟอง DNPT ดังนั้นแรงที่ใช้ในการกดอัดชิ้นงานจึงใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเท่านั้น

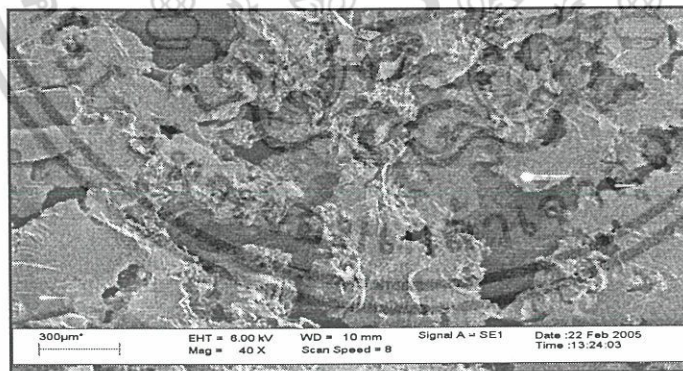
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.39 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ

ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:C-black (50:50:20) (ก) ปริมาณสารให้

ฟอง DNPT ร้อยละ 1 เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที (ข) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT

ร้อยละ 2 เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที (ค) ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3

เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.39 แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึม เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด (Compression deflection) โดยเมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น จะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซ ทำให้เกิดรูพรุนเห็นเป็นช่องสีดำภายในชิ้นงานเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นไม่มากนัก เนื่องจากมีปริมาณเขม่าดำรวมที่มาก ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัดข้างต้น

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำรวมทั้งสัณฐานวิทยา พบว่าเมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต จะทำการเปรียบเทียบท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม: ผงยางรถยนต์:เขม่าดำ (50:50:20) เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที โดยวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ซึ่งสามารถผลิตท่อน้ำซึมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน เท่ากับ 20 และ 14 มิลลิเมตร ตามลำดับ ได้ความยาว 6.06 6.37 และ 6.30 เมตร ตามลำดับ (การหาความยาวท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม แสดงดังภาคผนวก ค) แสดงดังตารางที่ 4.2-4.4

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: DNPT:C-black (50:50:1:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>1)</sup>	เป็นเงิน (บาท)
1. ยางรีเคลม	428.27 กรัม	14 บาท/กก	5.99
2. ผงยางรถยนต์ (ขนาด 30 เมช)	428.27 กรัม	13 บาท/กก	5.57
3. ซิงค์ออกไซด์	10.71 กรัม	39บาท/กก	0.42
4. กรดสเตียริก	4.28 กรัม	25 บาท/กก	0.11
5. CBS	2.14 กรัม	130 บาท/กก	0.28
6. TMTD	1.07 กรัม	100 บาท/กก	0.11
7. เขม่าดำ (N550)	85.65 กรัม	27 บาท/กก	2.31
8. น้ำมันแอสฟัลติก	14.98 กรัม	68 บาท/กก	1.02
9. 6PPD	2.14 กรัม	230 บาท/กก	0.49
10. ซีฟิ่งปิโตรเลียม	2.14 กรัม	50 บาท/กก	0.11
11. DNPT	8.57 กรัม	184 บาท/กก	1.58
12. ยูเรีย	8.57 กรัม	136 บาท/กก	1.17
13. กำมะถัน	3.21 กรัม	19 บาท/กก	0.06
14. ค่าแรง	90 นาที	175 บาท/วัน <sup>2)</sup>	10.94
15. ค่าไฟฟ้า	30 หน่วย	2.5 บาท/หน่วย	75.00
16. เบ็ดเตล็ด	-	-	5.00
ราคาต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (6.06 เมตร) <sup>3)</sup>			110.16
ราคาต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีความยาว 1 เมตร			18.18

หมายเหตุ <sup>1)</sup> เป็นราคาขายโดยประมาณ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2548

<sup>2)</sup> คิดค่าแรงตามค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน

<sup>3)</sup> ราคาไม่รวมต้นทุนเครื่องจักรการผลิต และค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: DNPT:C-black (50:50:2:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>1)</sup>	เป็นเงิน (บาท)
1. ยางรีเคลม	421.05 กรัม	14 บาท/กก	5.89
2. ผงยางรถยนต์ (ขนาด 30 เมช)	421.05 กรัม	13 บาท/กก	5.47
3. ซิงค์ออกไซด์	10.53 กรัม	39 บาท/กก	0.41
4. กรดสเตียริก	4.21 กรัม	25 บาท/กก	0.11
5. CBS	2.11 กรัม	130 บาท/กก	0.27
6. TMTD	1.05 กรัม	100 บาท/กก	0.11
7. เขม่าดำ (N550)	84.21 กรัม	27 บาท/กก	2.27
8. น้ำมันแอฟทานิก	14.73 กรัม	68 บาท/กก	1.00
9. 6PPD	2.11 กรัม	230 บาท/กก	0.48
10. ซีฟิงปิโตรเลียม	2.11 กรัม	50 บาท/กก	0.11
11. DNPT	16.84 กรัม	184 บาท/กก	3.10
12. ยูเรีย	16.84 กรัม	136 บาท/กก	2.29
13. กำมะถัน	3.16 กรัม	19 บาท/กก	0.06
14. ค่าแรง	70 นาที	175 บาท/วัน <sup>2)</sup>	8.51
15. ค่าไฟฟ้า	20 หน่วย	2.5 บาท/หน่วย	50.00
16. เบ็ดเตล็ด	-	-	5.00
ราคาต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (6.37 เมตร) <sup>3)</sup>			85.08
ราคาต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีความยาว 1 เมตร			13.40

หมายเหตุ <sup>1)</sup> เป็นราคาขายโดยประมาณ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ. 2548

<sup>2)</sup> คิดค่าแรงตามค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน

<sup>3)</sup> ราคาไม่รวมต้นทุนเครื่องจักรการผลิต และค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT: DNPT:C-black (50:50:3:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>1)</sup>	เป็นเงิน (บาท)
1. ยางรีเคลม	414.08 กรัม	14 บาท/กก	5.79
2. ผงยางรถยนต์ (ขนาด 30 เมช)	414.08 กรัม	13 บาท/กก	5.38
3. ซิงค์ออกไซด์	10.35 กรัม	39 บาท/กก	0.40
4. กรดสเตียริก	4.14 กรัม	25 บาท/กก	0.10
5. CBS	2.07 กรัม	130 บาท/กก	0.27
6. TMTD	1.04 กรัม	100 บาท/กก	0.10
7. เขม่าดำ (N550)	82.82 กรัม	27 บาท/กก	2.24
8. น้ำมันเนฟทานิก	14.49 กรัม	68 บาท/กก	0.99
9. 6PPD	2.07 กรัม	230 บาท/กก	0.48
10. ซิงค์บิโตรเลียม	2.07 กรัม	50 บาท/กก	0.10
11. DNPT	24.84 กรัม	184 บาท/กก	4.57
12. ยูเรีย	24.84 กรัม	136 บาท/กก	3.38
13. กำมะถัน	3.11 กรัม	19 บาท/กก	0.06
14. ค่าแรง	50 นาที	175 บาท/วัน <sup>2)</sup>	6.08
15. ค่าไฟฟ้า	10 หน่วย	2.5 บาท/หน่วย	25.00
16. เบ็ดเตล็ด	-	-	5.00
ราคาต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (6.30เมตร) <sup>3)</sup>			59.94
ราคาต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีความยาว 1 เมตร			9.51

หมายเหตุ <sup>1)</sup> เป็นราคาขายโดยประมาณ ณ เดือนมีนาคม พ.ศ.2548

<sup>2)</sup> คิดค่าแรงตามค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน

<sup>3)</sup> ราคานี้ไม่รวมต้นทุนเครื่องจักรการผลิต และค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2-4.4 แสดงถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึม พบว่าการนำยางรีเคลม และผงยางรถยนต์มาใช้เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตท่อน้ำซึม เป็นการลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์มีราคาถูกมาก เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ โดยท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber:GRT:C-black (50:50:20) เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 นาที ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 2 ที่เวลาการเชื่อมโยง 40 นาที และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที มีต้นทุนการผลิต 18.18 13.40 และ 9.51 บาทต่อหนึ่งเมตรตามลำดับ ซึ่งนับว่าต้นทุนการผลิตต่ำมาก ราคาถูก เมื่อเทียบกับท่อพีวีซี (PVC pipe) ขนาดเดียวกันที่มีราคาขายประมาณ 89 บาทต่อหนึ่งเมตร [46] โดยตัวอย่างสมบัติบางประการของท่อน้ำซึม แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างสมบัติบางประการของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย Reclaimed rubber: GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20) ที่เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที

สมบัติของท่อน้ำซึม	ผลที่ได้
ความแข็งแรงดึง (MPa)	1.44
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด	169.78
มอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	1.01
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	10.58
ความแข็งกด (Shore A)	44.68
การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงอัด (psi)	129.53
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.99
ความต้านทานต่อไอโซนที่ 25 pphm, 40 °C, 20 %, 72 hr	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มิลลิเมตร
อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันต่าง ๆ (l/h/m)	
- 0.2 บาร์	44.1
- 0.4 บาร์	120.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- คุณภาพมีเชื่อมโยงท่ออย่างที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากกระบวนการเชื่อมโยงยาง และการสลายตัวเป็นก๊าซของสารให้ฟอง DNPT คือ 160 องศาเซลเซียส
- การเติมเขม่าดำเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของท่อน้ำซึม พบว่าปริมาณเขม่าดำรวม 70 phr มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำดีกว่าที่เขม่าดำปริมาณอื่น ๆ
- เวลาการเชื่อมโยงที่ทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมที่สุดของปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 2 และ 3 คือ 60 40 และ 20 นาที ตามลำดับ
- ท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:เขม่าดำ เท่ากับ 50:50:20 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 2 และ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 40 และ 20 นาที ตามลำดับ มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกัน
- ท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย ยางรีเคลม:ผงยางรถยนต์:เขม่าดำ เท่ากับ 50:50:20 เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละ 1 2 และ 3 ที่เวลาการเชื่อมโยง 60 40 และ 20 นาที ตามลำดับ มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ คือ 18.18 13.40 และ 9.51 บาทต่อหนึ่งเมตร ตามลำดับ
- ท่อน้ำซึมที่ผลิตได้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานด้านเกษตรกรรมในที่ร่ม และฝังบนผิวดิน สำหรับการให้น้ำแก่ ต้นกล้า สวนหย่อม สวนชา กาแฟ เป็นต้น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่าง ๆ

ที่น่าสนใจที่อาจเป็นแนวทางในการทำการศึกษาวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาท่อน้ำซึมที่เตรียมได้จากยางชนิดอื่น เช่น NR/Reclaimed rubber
2. ศึกษาผลของความหนาของท่อน้ำซึมที่มีต่อ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตรา

การซึมผ่านของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปรับปรุงสมบัติบางประการของท่อน้ำซึม เช่น สมบัติเชิงกล ความต้านทานต่อไอโซน อัตราการซึมผ่านของน้ำ และความสามารถในการทนต่อแรงดันน้ำ ฯลฯ
4. ศึกษาผลการนำไปใช้งานจริงด้านเกษตรกรรม
5. การใช้ยางรีเคลมที่ผลิตคนละครั้ง จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติของยางรีเคลมก่อนการทดลอง เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Rubber Research Institute. "Statistic". [Online] Available :  
<http://www.Rubberthai.com>. 2004.
- [2] อธิพิล แจ้งชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง. ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546
- [3] Rubber and tyre. [Online] Available : <http://www.recycle.mcmmail.com/rubber.html>.  
2004.
- [4] [Online] Available : <http://www.facct.ntu.ac.uk/.../recycle/rubber.html>. 2004.
- [5] [Online] Available : <http://www.rmf.org.nz/index.cfm/tube>. 2004.
- [6] สุภรัตน์ รักชลธิ์ และ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน. เอกสารประกอบการสอนวิชาหัวข้อเรื่อง  
ที่น่าสนใจในอุตสาหกรรม. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [7] Rao P.P. "Sustainable Management of Used Tyres". The Rubber International.,  
vol. 4, no. 1, August 2002. pp. 54-57.
- [8] Product Directory Chemicals. "rubber & latex". [Online] Available :  
<http://www.made-in-china.com>. 2004.
- [9] Leaky Pipe Systems. "Porous Hoses". [Online] Available :  
<http://www.leakypipe.co.uk>. 2004.
- [10] Barlow F.W. Rubber Compounding. New York : Marcel Dekker, Inc. 1993.  
pp. 79-83.
- [11] Indian Rubber Institute. Rubber Engineering. India : The McGraw – Hill companies.  
2000. pp 59, 711-713.
- [12] Blow C.M. Rubber Technology and Manufacture. London : Butterworth & Co.  
Publication Ltd. 1971. pp. 203-209.
- [13] Adhikari B. and DeD. And Maiti S. "Reclamation and Recycling of Waste Rubber".  
Progress in Polymer., vol. 25, no. 7, 2000. pp. 909-948.
- [14] Makarov V.M. and Drozdovski V.F. Reprocessing of Tyres and Rubber Wastes  
Recycling from the Rubber Products Industry. Ellis Horwood. 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2528
- [16] Hofmann W. Rubber Technology Handbook. Munich : Hanser Publishers. 1989.
- [17] Dongjin Semichem. Dongjin Chemical. Dongjin Semichem Co.Ltd.2001.
- [18] บุญธรรม นิธิอุทัย และปรีชา ป่องภัย. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
- [19] อธิพิล แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [20] Mark J.E.and Erman B. and Eirich F.R. Science and Technology of Rubber. 2nd Ed. New York : Academic Press, Inc. 1994.
- [21] Pramanik P.K. and Baker W.E. Plastic, Rubber and Composites Processing and Application., vol. 24, no. 4, 1995. pp. 229-237.
- [22] Balogh G. and Samay G. "Possibilities of Recycling Tyre Waste". International Polymer Science and Technology., vol. 23, no. 11, 1996. pp. 86-91.
- [23] Kowalska E. and Wielgosz Z. "Scrap Rubber Reused – A New Process Produces Porous Pipes from Worn – out Tyres". Polymer Recycling., vol. 2, no. 3, 1996. pp. 231-219.
- [24] ชลดา เลวิส และ สาโรช ช่างชุม. "การศึกษาชนิดและปริมาณของสารฟูลและสารกระตุ้นในยาง". ยางและพอลิเมอร์, ฉบับที่ 2, 2541.
- [25] Han M.H. "Ground Rubber Criteria – for the Use in Tire Stock Compounds". International Seminar on Elastomer, Bangkok, Thailand, December 1998.
- [26] ดาริน นิลทรงกลด. "การเตรียมยางไมโครเซลลูโลสจากยางธรรมชาติ". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542
- [27] เบลูจวรรณ ชนะจรัญวิทย์ และคณะ "การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางจากยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ". โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] พลชิต บัวแก้วและคณะ."การผลิตท่อน้ำหยดใช้ในสวน". รายงานผลการวิจัยเรื่องเต็ม ประจำปี 2543. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.
- [29] ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และ อลงกรณ์ ศิลปชำนาญ "การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ". โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
- [30] คณัมพร สวัสดิ์ชุมพร และคณะ "การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น". โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [31] สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล."การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [32] Robert W. The Rubber International Magazine., June. vol. 14, 2001. pp. 59-99
- [33] กัญญาณี แสงเกียรติยุทธ."การศึกษาเพื่อหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์กับพอลิไวนิลคลอไรด์". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [34] Sombatsompop N. and Kumnuantip C. "Rheology, Cure Characteristics, Physical and Mechanical Properties of Tire Tread Reclaimed Rubber/Natural Rubber Compounds". Journal of Applied Polymer science., vol. 87, 2003. pp. 1723-1731.
- [35] ศุภโชค อุ่นทรัพย์เจริญ และ สมบูรณ์ แซ่ตั้ง."การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิพรอพิลีน". โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [36] สุมนา แจ่มเหมือน. "การผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์". วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [37] Micro-flo Industries. "Micro-flo Moisture Control System". [Online] Available : <http://www.micro-flo.com>. 2004.
- [38] ASTM D 5289 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Property – Vulcanization Using Rotorless Cure Meters", Philadelphia : American Society for Testing and Materials.,2001.

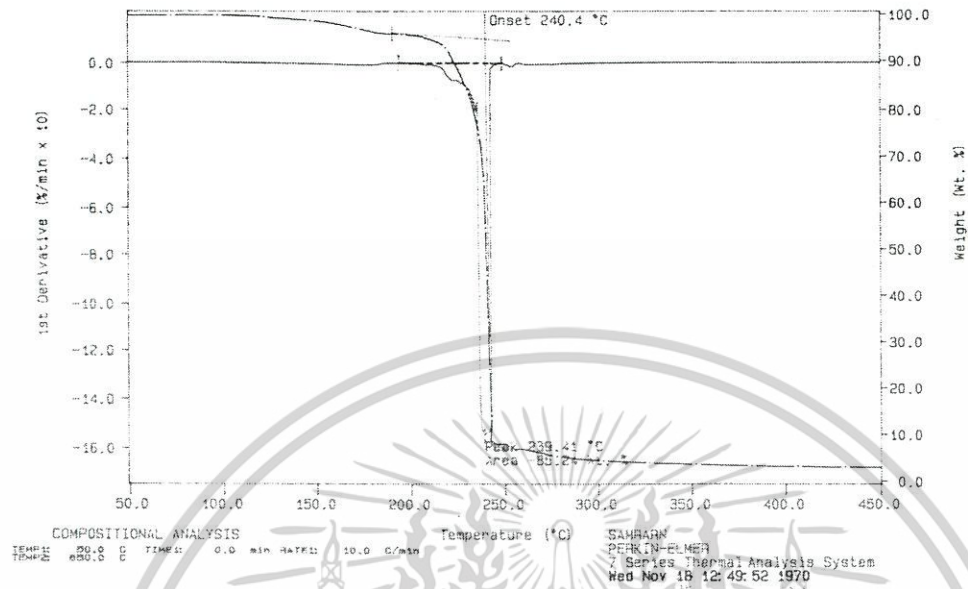
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] ASTM D 412 Committee on standard "Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomers-Tension"., Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1992.
- [40] อธิพิณ แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาการวัตพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [41] ASTM D 624 Committee on standard "Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers"., Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1991.
- [42] ASTM D 2240 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness"., Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1991.
- [43] ASTM D 1056 Committee on standard "Standard Specification for Flexible Cellular Materials – Sponge or Expanded Rubber"., Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1991.
- [44] ISO 1431/1 Committee on standard "Rubber – Resistance to ozone cracking – Part 1 : Static strain test"., Switzerland : International Organization for Standardization., 1984.
- [45] Morton M. The Rubber Technology. 2nd Ed. New York : Van Nostrand Company. 1895.
- [46] Flexible PVC. [Online] Available : <http://www.FlexPVC.com>, 2004.

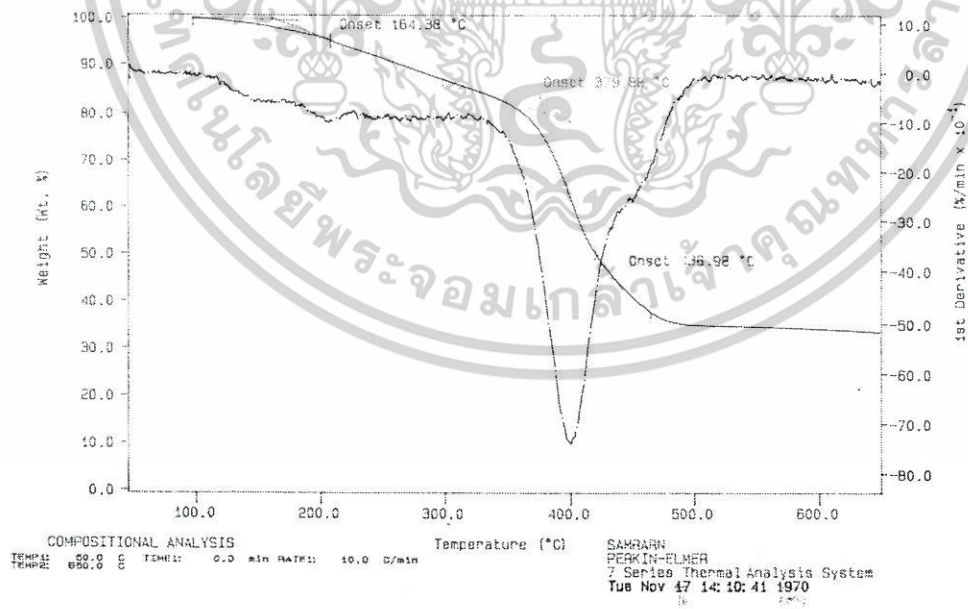
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT



รูปที่ ก.2 เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ที่มี Urea เป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางรีเคลม 100 ส่วน

มีเนื้อยาง 50 ส่วน  
เนื้อยาง 100 ส่วน

มีเขม่าดำ 25 ส่วน  
มีเขม่าดำ 50 ส่วน

- ∴ เมื่อเติมเขม่าดำเพิ่ม 10 phr ได้ปริมาณเขม่าดำรวม = 50+10 = 60 phr  
 เมื่อเติมเขม่าดำเพิ่ม 20 phr ได้ปริมาณเขม่าดำรวม = 50+20 = 70 phr  
 เมื่อเติมเขม่าดำเพิ่ม 30 phr ได้ปริมาณเขม่าดำรวม = 50+30 = 80 phr  
 เมื่อเติมเขม่าดำเพิ่ม 40 phr ได้ปริมาณเขม่าดำรวม = 50+40 = 90 phr



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:1:20)

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะของท่อน้ำซึม} &= 1.03 \\ \text{ปริมาตรของท่อน้ำซึม 1 กิโลกรัม} &= 1000/1.03 \\ &= 970.87 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อน้ำซึมเท่ากับ 2.0 และ 1.4 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของท่อน้ำซึมยาว 1 เมตร} &= \pi(r_1^2 - r_2^2)h \\ &= \pi(1.0^2 - 0.7^2) * 100 \\ &= 160.22 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ท่อน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัมมีความยาว} &= 970.87/160.22 \\ &= 6.06 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

## 2. Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:2:20)

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะของท่อน้ำซึม} &= 0.98 \\ \text{ปริมาตรของท่อน้ำซึม 1 กิโลกรัม} &= 1000/0.98 \\ &= 1020.41 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อน้ำซึมเท่ากับ 2.0 และ 1.4 เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของท่อน้ำซึมยาว 1 เมตร} &= \pi(r_1^2 - r_2^2)h \\ &= \pi(1.0^2 - 0.7^2) * 100 \\ &= 160.22 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ท่อน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัมมีความยาว} &= 1020.41/160.22 \\ &= 6.37 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

## 3. Reclaimed rubber:GRT:DNPT:C-black (50:50:3:20)

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะของท่อน้ำซึม} &= 0.99 \\ \text{ปริมาตรของท่อน้ำซึม 1 กิโลกรัม} &= 1000/0.99 \\ &= 1010.10 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อน้ำซีเมนต์เท่ากับ 2.0 และ 1.4 เซนติเมตร

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรของท่อน้ำซีเมนต์ยาว 1 เมตร} &= \pi(r_1^2 - r_2^2)h \\
 &= \pi(1.0^2 - 0.7^2) \times 100 \\
 &= 160.22 \\
 \therefore \text{ท่อน้ำซีเมนต์น้ำหนัก 1 กิโลกรัมมีความยาว} &= 1010.10 / 160.22 \\
 &= 6.30 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้