

การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ผสมยางธรรมชาติและยางรีเคลม  
เพื่องานเกษตรกรรม

STUDY OF POROUS PIPE MADE FROM GRT MIXED NR AND  
RECLAIMED RUBBERS FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-016

การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ผสมยางธรรมชาติและยางรีเคลม  
เพื่องานเกษตรกรรม

STUDY OF POROUS PIPE MADE FROM GRT MIXED NR AND  
RECLAIMED RUBBERS FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS



ปัฐวี พินิจกุล  
PATTAWEE PINITKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF POROUS PIPE MADE FROM GRT MIXED NR AND  
RECLAIMED RUBBERS FOR AGRICULTURAL APPLICATIONS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดของสถาบันฯ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2019**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ผสมยางธรรมชาติ และยางรีไซเคิลเพื่องานเกษตรกรรม
ชื่อนักศึกษา	นาย ปัฐวี พินิจกุล
รหัสประจำตัว	59605041
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติและการประยุกต์ใช้งานท่อน้ำซึมชนิดเสริมแรงที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ (NR) ผสมยางรีไซเคิล (RR) และผงยางรถยนต์ (GRT) โดยมีเศษเส้นใยยางรถยนต์ (WTF) ชนิดสั้นจากชั้นพลาย (Ply) ของยางรถยนต์ใช้แล้วเป็นสารเสริมแรง สารให้ฟองไดโนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) และคิกเกอร์ยูเรียถูกใช้เพื่อสร้างโครงสร้างเซลล์เปิด การผสมสูตรทำด้วยเครื่องผสมนืดเตอร์ ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อน อัตราส่วน GRT และยาง (NR และ RR) ถูกควบคุมอยู่ที่ 60:40 (โดยน้ำหนัก) แล้วทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ เวลาการเชื่อมโยง, อัตราส่วนระหว่าง NR:RR, ปริมาณสารให้ฟอง และศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง เช่น ปริมาณเขม่าดำ, เปรียบเทียบปริมาณการใช้ WTF ด้วยวิธีการนำมาใช้โดยตรง และการทำมาสเตอร์แบทช์ และเขม่าดำร่วมกับ WTF สมบัติของท่อน้ำซึมที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัมพันธวิทยา อัตราการซึมผ่านของน้ำ เปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม และค่าความดันระเบิดของท่อน้ำซึม จากการศึกษาผลของอัตราส่วนยาง NR:RR พบว่าสมบัติเชิงกลของท่อไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้สูตรที่มีอัตราส่วน NR:RR เป็น 50:50 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงผสม (เขม่าดำ และ WTF) พบว่าสมบัติบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่เขม่าดำ 50 phr และ WTF 6 phr แต่ความหนืดมูนนี้ มอดูลัสที่ 100% และความแข็งแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสารเสริมแรง อย่างไรก็ตามการใช้เขม่าดำ 50 phr และปริมาณ WTF 4 phr ให้สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรสูงสุด การใช้ WTF ร่วมกับเขม่าดำส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม และอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมสูตรอื่น ๆ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความดันระเบิดของท่อน้ำซึมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ท่อน้ำซึมมีอัตราการซึมผ่านน้ำและความดันในแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกันจากการทดสอบท่อระยะยาว 50 เมตร โดยมีต้นทุนการผลิตประมาณ 13 บาท/เมตร ซึ่งมีราคาต่ำกว่าท่อน้ำซึมเชิงพาณิชย์ สรุปว่าท่อน้ำซึมในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

**คำสำคัญ :** ท่อน้ำซึม ยางธรรมชาติ ยางรีไซเคิล เส้นใยสั้นจากพลายยางรถยนต์ อุปกรณ์ให้น้ำ

#### ทางการเกษตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Study of Porous Pipes made from GRT mixed NR and Reclaimed Rubbers for Agricultural Applications
<b>Student Name</b>	Mr. Pattawee Pinitkul
<b>Student ID</b>	59605041
<b>Degree</b>	Master of Science (Polymer Technology)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

### Abstract

In this research, reinforced porous pipes for water irrigation in agricultural applications were studied. The pipes were made from natural rubber (NR), reclaimed rubber (RR) and ground rubber tire (GRT). Short waste tire fibers (WTF) from ply fibers of worn-out tires were used as the reinforcement. Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT) blowing agent and urea kicker were used to create open-cell structures. Rubber compounds were mixed by a kneader and then shaped into porous pipes by a single-screw extruder. Pipe samples were vulcanized by a hot air oven. Ratio of the GRT to based rubbers (NR and RR) was fixed at 60:40 (by weight). Factors affecting porous pipe properties were studied, i.e., cure time, NR:RR ratio, and blowing agent loading. Effects of reinforcing agents were also studied, i.e., carbon black loading, methods of WTF loading (direct loading and masterbatch) and carbon black with WTF loadings. Properties of porous pipes were investigated including mechanical properties, physical properties, morphology, water permeability rate, %diameter swell and burst pressure. By studying NR:RR ratios, mechanical properties of the pipes were not significantly different. NR:RR ratio of 50:50 was used to study effects of mixed reinforcing agent (carbon black and WTF) of the pipe. It was found that tensile strength, elongation at break and tear strength were increased up to an optimum point at carbon black 50 phr and WTF 6 phr. But mooney viscosity, rubber modulus (M100) and hardness were increased as filler loading was increased. The highest mechanical properties were achieved when carbon black loading of 50 phr and WTF loading of 4 phr. As the WTF and carbon black were used, %diameter swell and water permeability rate were decreased but burst pressure was higher. In addition, water permeability rate and water pressure each position along the 50 meter pipe length were similar. The production cost of pipes was about 13 baht/meter which is lower than that of the commercial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ones. It can be concluded that the porous pipes in this research have a potential for commercial production.

**Keywords :** Porous pipe, Natural rubber (NR), Reclaimed rubber (RR), Waste tire fiber (WTF), Irrigation equipment



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยการความช่วยเหลือ ความร่วมมือ รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความช่วยเหลือในด้านทฤษฎีและการปฏิบัติงาน ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ซึ่งเป็นผลให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรุณาเป็นกรรมตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณบุญหาญ อู่อุดมยิ่ง บริษัท แสงไทยผลิตายาง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในด้านปฏิบัติการทดลองงานวิจัย รวมถึงบุคลากรในบริษัท ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. รุ่งตะวัน พนากุลชัยวิทย์ และคณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย และคำปรึกษาในการทำวิจัย

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิชาการจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ปัฐวี พินิจกุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubbers, NR) .....	6
2.2 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber, RR) .....	7
2.3 วิธีการทำยางรีเคลม .....	7
2.3.1 วิธีการทางเคมี (Chemical method) .....	7
2.3.2 วิธีการใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic method).....	8
2.3.3 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave method).....	9
2.3.4 วิธีการทางชีวภาพ (Biological method) .....	9
2.4 ผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT).....	9
2.4.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding).....	10
2.4.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) .....	10
2.5 พอลิเมอร์ผสม .....	11
2.6 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....	12
2.6.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent).....	12
2.6.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) .....	12
2.6.1.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยง (Curemeters for rubber compounds) .....	13
2.6.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) .....	14
2.6.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators) .....	15
2.6.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradation).....	15
2.6.5 สารตัวเติม (Fillers).....	16
2.6.5.1 เขม่าดำ (Carbon black).....	16
2.6.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) .....	17
2.6.7 สารให้ฟอง (Blowing agent).....	17
2.6.7.1 Dinitro pentamethylene tetramine (DNPT หรือ DPT) .....	18
2.6.8 คิกเกอร์ (Kicker).....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.9	พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG).....	19
2.7	ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular rubber).....	19
2.8	คอมโพสิต (Composites).....	20
2.8.1	อินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ (Fiber-matrix interfaces) .....	21
2.8.2	ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of adhesion).....	21
2.9	เส้นใยเสริมแรง.....	23
2.9.1	เส้นใยจากธรรมชาติ (Natural fibers).....	23
2.9.2	เส้นใยอะรามิด .....	24
2.9.3	เส้นใยไพลอน .....	24
2.10	การใช้น้ำของพืช .....	25
2.11	ความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ.....	27
2.12	เทคนิคการให้น้ำพืชของเกษตรกร .....	28
2.12.1	ระบบน้ำต้น .....	28
2.12.2	ระบบน้ำหยด.....	29
2.12.2.1	ท่อน้ำหยด (Drip pipe).....	29
2.12.2.2	ท่อน้ำซึม (Porous pipe).....	29
2.13	ท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า .....	31
2.14	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
<b>บทที่ 3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>37</b>
3.1	แผนการดำเนินงาน .....	37
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	38
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.3	วิธีการทดลอง.....	43
3.4.1	การเตรียม WTF.....	43
3.4.2	การผสมยางและการเตรียมมาสเตอร์แบทช์.....	43
3.4.3	การขึ้นรูปท่อน้ำซึมและเวลาการเชื่อมโยง .....	43
3.4.4	การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม .....	44
3.4.4.1	ผลของอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง.....	44
3.4.4.2	ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีไซเคิล .....	44
3.4.4.3	ผลของปริมาณเคมีดำ.....	44
3.4.4.4	ผลของเส้นใยจากยางรถยนต์ .....	45
3.4.4.5	ผลของเส้นใยจากยางรถยนต์และเคมีดำ .....	45
3.4.4.6	ผลของปริมาณสารให้ฟอง.....	45
3.4.4.7	การเปรียบเทียบอิทธิพลของสารเสริมแรงในท่อน้ำซึม ต่ออัตราการซึมผ่านน้ำและการทนความดันสูงสุด.....	45
3.4.4.8	ผลของความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อและ ผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ .....	45
3.4.5	การทดสอบ.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5.1 การทดสอบการเชื่อมโยงยาง.....	46
3.4.5.2 การทดสอบความหนืดมูนี่.....	46
3.4.5.3 การทดสอบแรงดึง .....	46
3.4.5.4 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด .....	47
3.4.5.5 การทดสอบความแข็งแรงกดแบบคูโรมิเตอร์ .....	47
3.4.5.6 การทดสอบความหนาแน่น .....	47
3.4.5.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	47
3.4.5.8 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ.....	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>49</b>
4.1 สภาวะการเชื่อมโยง.....	50
4.2 อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีไซเคิลต่อเวลาการเชื่อมโยง .....	56
4.3 การศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง.....	64
4.3.1 การศึกษาปริมาณเขม่าดำ .....	64
4.3.2 การศึกษาปริมาณเส้นใยเสริมแรงจากยางรถยนต์.....	70
4.3.3 การศึกษาปริมาณเขม่าดำร่วมกับ WTF.....	80
4.3.4 สรุปอิทธิพลของการใช้สารเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ของท่อน้ำซึม .....	87
4.4 การศึกษาปริมาณสารให้ฟอง.....	92
4.5 ผลของความยาวท่อน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ.....	98
4.6 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของท่อน้ำซึม .....	99
4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	99
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>101</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	101
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	102
เอกสารอ้างอิง .....	103
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	107
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ .....	109
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของการขึ้นรูปทดสอบชิ้นงาน .....	110
ภาคผนวก ง ผลของการใส่สารคู่ควบ (Coupling agent).....	112
ภาคผนวก จ ผลของยางผสมสูตรยางธรรมชาติและยางรีไซเคิลเมื่อไม่มีสารให้ฟอง.....	114
ภาคผนวก ฉ การหาความยาวท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม .....	116
ประวัติผู้เขียน.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ข้อดี และข้อเสียของเทคนิคการให้น้ำทางการเกษตร.....	3
2.1 รายละเอียดท่อน้ำซีมของบริษัท Leaky pipe systems .....	31
2.2 ข้อมูลความดันในการใช้งาน ปริมาณน้ำ และราคาท่อน้ำซีมที่ผลิตในเชิงการค้า.....	33
3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ เกรด STR20.....	39
3.2 สมบัติบางประการของยางรีเคลม เกรด UCD-105 ที่ใช้ในงานวิจัย .....	39
3.3 สมบัติบางประการของ DNPT ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.4 สมบัติบางประการของ Urea ที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
3.5 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ .....	41
3.6 สูตรการผลิตท่อน้ำซีม.....	42
4.1 สมบัติการเชื่อมโยงของการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม .....	57
4.2 ผลของความยาวท่อน้ำซีมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ .....	98
4.3 สมบัติบางประการของท่อน้ำซีมสูตร C50F4D1 .....	99
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีม.....	100
ค.1 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร .....	110
ค.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร.....	110
ค.3 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร .....	110
ค.4 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร .....	111
ค.5 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร .....	111
ง.1 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ .....	112
ง.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ.....	112
ง.3 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ .....	113
ง.4 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ .....	113
จ.1 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม ...	114
จ.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม.....	114
จ.3 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม .	114
จ.4 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม.....	115
จ.5 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม.....	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 รูปขยายของรถยนต์ (ภาพซ้าย) และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ (Waste tire fiber) (ภาพขวา) .....	2
1.2 ภาพวาดแสดงท่อน้ำซึม .....	2
1.3 แสดงการให้น้ำของท่อน้ำซึม เช่น การให้น้ำใต้ฟิล์มคลุมดิน(Mulch film) (ภาพซ้าย) และการให้น้ำใต้ดินบริเวณปลายราก เป็นการให้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดการสูญเสียน้ำน้อย (ภาพขวา) .....	3
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน).....	6
2.2 กลไกของปฏิกิริยาไดฟีนิลไดซัลไฟด์ระหว่างการดีวัลคาไนเซชัน.....	8
2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible).....	11
2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่ผสมเข้ากันไม่ได้.....	12
2.5 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve).....	13
2.6 กลไกปฏิกิริยาการสลายตัวของ DNPT .....	18
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ.....	20
2.8 มุมสัมผัส และแรงดึงผิวของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง.....	22
2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส .....	24
2.10 ลักษณะโมเลกุลของพารา-อะรามิด (ซ้าย) เมตา-อะรามิด (ขวา).....	24
2.11 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ Nylon 6,6.....	25
2.12 เซลล์ใบของพืชที่มีรูเปิดปากใบ.....	26
2.13 การจำแนกความชื้นในดินและความชื้นที่พืชนำไปใช้ได้และไม่ได้.....	27
2.14 การให้น้ำแบบฉีดฝอย (Sprinkler irrigation).....	28
2.15 การให้น้ำพืชด้วยท่อน้ำหยด (Drip pipe).....	29
2.16 การใช้งานท่อน้ำซึมบนดิน (ขวา) และ การใช้งานท่อน้ำซึมใต้ดิน (ซ้าย) .....	30
2.17 ตัวอย่างการใช้งานท่อน้ำซึมในการให้น้ำกับพืช.....	30
2.18 รูปแบบการใช้งานท่อน้ำซึมในพื้นที่บริเวณกว้าง เช่น สนามกอล์ฟ สนามหญ้า .....	31
2.19 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท กสิพันธ์ารัต จำกัด.....	32
2.20 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม LBS global company ท่อน้ำซึมขนาด 5 มิลลิเมตร (รูปซ้าย) ท่อน้ำซึมขนาด 13 มิลลิเมตร (รูปขวา) .....	32
3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบ.....	38
3.2 การขึ้นรูปท่อน้ำซึม .....	44
3.3 การทดสอบความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อและผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ.....	46
3.4 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม.....	48
4.1 แผนผังลำดับขั้นตอนของการวิจัยศึกษาท่อน้ำซึม.....	50
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเชื่อมโยงกับปริมาณกำมะถันรวม (Total sulfur)	

4.3	กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ของท่อน้ำซึม สูตร C30F0D1 .....	52
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกล.....	52
4.5	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน .....	52
4.6	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน .....	53
4.7	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน .....	54
4.8	การเกิดออกซิเดชันของยางธรรมชาติ .....	54
4.9	กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน .....	55
4.10	กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน .....	55
4.11	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน .....	56
4.12	กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงด้วยเครื่อง MDR ของยางผสมสูตรที่มีอัตราส่วน (NR:RR) ที่แตกต่างกัน.....	57
4.13	กราฟแสดงค่าความหนืดมูนิของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน.....	58
4.14	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน.....	58
4.15	SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่กำลังขยาย 30 เท่า ก) NR:RR (25:75) และ ข) NR:RR (75:25).....	59
4.16	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน .....	60
4.17	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน.....	60
4.18	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน.....	61
4.19	กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100 % ของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน ..	61
4.20	กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน .....	62
4.21	กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดัน 0.5-1.4 bar ของท่อน้ำซึมสูตร อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม NR:RR-50:50 (C30F0D1).....	63
4.22	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม ที่ความดัน 0.5-1.4 bar ของสูตรอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลม NR:RR-50:50 (C30F0D1) .....	63
4.23	กราฟแสดงค่าความหนืดมูนิของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน .....	65
4.24	กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน .....	65
4.25	SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการศึกษา ปริมาณของเขม่าดำที่แตกต่างกัน ก) เขม่าดำ 50 phr ข) เขม่าดำ 70 phr.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.26	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าแตกต่างกัน.....	66
4.27	กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าแตกต่างกัน ...	67
4.28	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าแตกต่างกัน.....	67
2.29	ภาพถ่ายของยางผสมสูตรเมื่อเติมเขม่าดำ 70 phr แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของ เขม่าดำที่ไม่ดีเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) ทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อมีการสลาย ตัวของก๊าซจากสารให้ฟอง .....	68
4.30	กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าแตกต่างกัน.....	68
4.31	กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าแตกต่างกัน .....	69
4.32	กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5-1.4 bar เมื่อเติมเขม่าดำ 50 phr ในสูตร C50D0D1 .....	70
4.33	กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลาง ของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5-1.4 bar เมื่อเติมเขม่าดำ 50 phr ในสูตร C50F0D1.....	70
4.34	ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน....	71
4.35	ค่าความหนืดมูนินี้ของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน....	72
4.36	ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และ การเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Mechine direction).....	73
4.37	ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และ การเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (Tranverse direction) .....	73
4.38	ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่ แตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Mechine direction).....	74
4.39	ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่ แตกต่างกันในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (Tranverse direction) .....	74
4.40	ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Mechine direction).....	75
4.41	ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (Tranverse direction) .....	75
4.42	SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วยเส้นใย จากขยะยางรถยนต์ 6 phr ที่กำลังขยาย 30 เท่า .....	76
4.43	SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วยเส้นใย จากขยะยางรถยนต์ 12 phr ที่กำลังขยาย 30 เท่า .....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.44	ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction).....	77
4.45	ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน ในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (Transverse direction).....	77
4.46	ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน.....	78
4.47	ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซีมเสริมแรงด้วยเส้นใยจากวิธีการทำมาสเตอร์แบทช์เส้นใยเปรียบเทียบกับท่อน้ำซีมเสริมแรงด้วยเขม่าดำ .....	79
4.48	ค่าการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซีมเสริมแรงด้วยเส้นใยจากวิธีการทำมาสเตอร์แบทช์เส้นใยเปรียบเทียบกับท่อน้ำซีมเสริมแรงด้วยเขม่าดำ .....	79
4.49	ภาพถ่ายท่อน้ำซีมเมื่อเพิ่มความดัน ก) 0.8 bar และ ข) 1.4 bar.....	80
4.50	ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน .....	81
4.51	SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วยเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่กำลังขยาย 100 เท่า ก) WTF 4 phr และ ข) WTF 6 phr .....	81
4.52	ค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่แตกต่างกัน.....	82
4.53	ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่แตกต่างกัน.....	83
4.54	ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่แตกต่างกัน .....	83
4.55	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่แตกต่างกัน.....	84
4.56	ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่แตกต่างกัน.....	84
4.57	ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่แตกต่างกัน.....	85
4.58	ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซีมที่ใช้ปริมาณเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ (C50F4D1) เปรียบเทียบกับท่อน้ำซีมสูตรอื่นๆ .....	86
4.59	ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซีมที่ใช้ปริมาณเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ (C50F4D1) เปรียบเทียบกับท่อน้ำซีมสูตรอื่นๆ.....	86
4.60	กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของท่อน้ำซีมต่ออิทธิพลของสารเสริมแรงแต่ละชนิด .....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.61	ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง ในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน .....	89
4.62	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพล ของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน .....	89
4.63	ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง ในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน .....	90
4.64	ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง ในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน .....	91
4.65	ค่าความดันระเบิดน้ำสูงสุดของท่อน้ำซีมในการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง ในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน .....	91
4.66	ค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง ในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน .....	92
4.67	ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟอง ที่แตกต่างกัน .....	93
4.68	ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณ สารให้ฟองที่แตกต่างกัน .....	93
4.69	ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟอง ที่แตกต่างกัน .....	94
4.70	ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟอง ที่แตกต่างกัน .....	94
4.71	ค่าความแข็งแรงกดของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน .....	95
4.72	ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟอง ที่แตกต่างกัน .....	96
4.73	SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณ สารให้ฟองที่แตกต่างกันของท่อน้ำซีม ก) DNPT 0.5 phr ข) DNPT 1 phr และ ค) DNPT 1.5 phr .....	96
4.74	ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซีมในปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน .....	97
4.75	ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของ ท่อน้ำซีมในปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน .....	97
4.76	การซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซีม สูตร C50F4D1 .....	98
ก.1	เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตร .....	107
ก.2	เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ในยางผสมสูตร .....	107
ก.3	เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT และยูเรียในยางผสมสูตร ...	108
ข.1	กราฟ FT-IR ของ WTF .....	109
ข.2	กราฟ DSC ของ WTF .....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

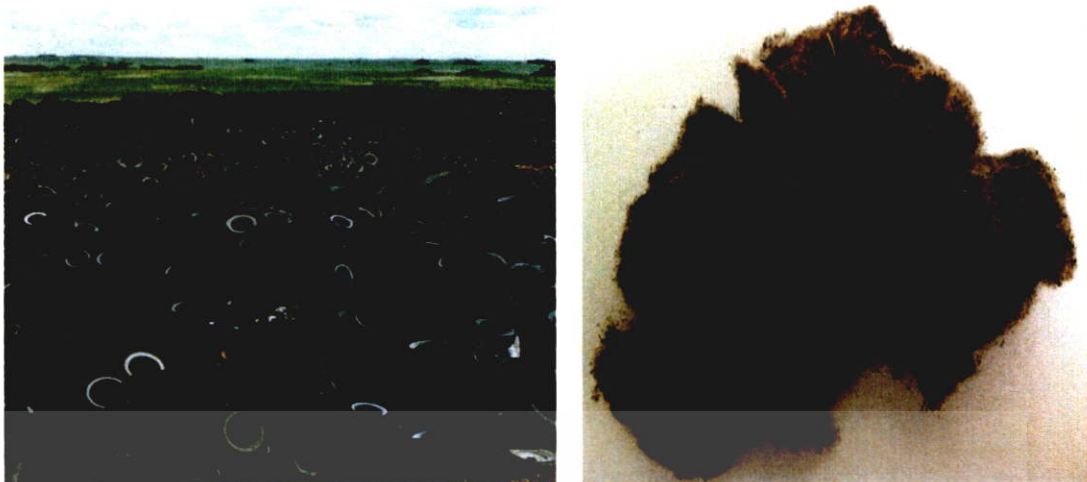
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และส่งออกในรูปยางดิบมากที่สุดในโลก ปี 2559 มีจำนวนเกษตรกรที่ทำการเพาะปลูกยางพาราถึง 1.1 ล้านครัวเรือน [1] ในปี 2560 มีผลผลิต 4.5 ล้านตัน คิดเป็นสัดส่วน 35.7% ของผลผลิตโลก [2] ปัจจุบันผู้ประกอบการไทยประสบปัญหาด้านการแข่งขันสูงจากลักษณะสินค้าที่มีความแตกต่างกันต่ำ (Low product differentiation) ซึ่งมีคู่แข่งหลักของไทยในปัจจุบัน คือ อินโดนีเซีย และเวียดนาม ขณะที่มาเลเซียให้ความสำคัญกับการผลิต และส่งออกผลิตภัณฑ์ยางที่มีการเพิ่มมูลค่า สูงมากกว่า อาทิ ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย เป็นต้น แนวทางการแก้ไขปัญหาราคายางตกต่ำของรัฐบาลที่ใช้อยู่โดยการแทรกแซงราคายางนั้นไม่เพียงพอที่จะแก้ปัญหาความเดือดร้อนของเกษตรกรได้ เพราะปัญหาที่เกษตรกรประสบอยู่ในขณะนี้คือรายได้ที่ลดลง หากมีการส่งเสริมการใช้อย่างภายในประเทศมากขึ้นโดยการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้นโอกาสที่เพิ่มรายได้จะสูงกว่าการส่งออกในรูปวัตถุดิบ นอกจากนี้จะช่วยแก้ปัญหารายได้ของเกษตรกรชาวสวนยางแล้วยังเป็นการเพิ่มการจ้างงานอีกด้วย

ในปัจจุบันยางล้อ (Tire) มีบทบาทสำคัญต่อชีวิตประจำวันของทุกคน ไม่ว่าจะเป็นยางล้อในรูปการขนส่งทั้งส่วนบุคคลและสาธารณะ ยางที่ใช้ในการผลิตยางล้อ ซึ่งรวมทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ มีปริมาณการใช้ 17 ล้านตันต่อปี อายุของยางล้อเส้นหนึ่ง ๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของยางล้อ และการขับขี่ของผู้ขับขี่ในแต่ละปี ประเทศไทยมีขยะยางรถยนต์กว่า 600,000 ตัน/ปี [3] ซึ่งยางล้อใช้แล้วจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการกำจัดที่ถูกต้องเพื่อป้องกันการทำลายสิ่งแวดล้อม น่าจะมีความเป็นไปได้ในการจัดการกับเศษยางด้วยวิธีการถมพื้นที่ให้น้อยลง แต่มีวิธีการนำวัสดุมาใช้ใหม่เพิ่มขึ้นด้วยการทำให้เศษยางที่นำกลับมาใช้ใหม่สามารถที่จะแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น การนำเศษยางมาทำยางรีเคลม (Reclaimed rubber, RR) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในรูปแบบต่าง ๆ เป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ขยะจากยางรถยนต์นั้นสามารถแบ่งองค์ประกอบได้ เช่น ยาง ผ้าใบหรือพลาย (Ply) และเหล็ก ซึ่งการนำขยะยางรถยนต์กลับมาใช้งานใหม่โดยผ่านกระบวนการทำยางรีเคลมนั้นจะเหลือพลาย และเหล็ก ซึ่งพลายจากขยะยางรถยนต์เป็นขยะที่เกิดขึ้น 10% ต่อยางรถยนต์หนึ่งเส้น [4] งานวิจัยนี้นำขยะยางรถยนต์ในส่วนที่เป็นยาง และพลายนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ คือ ท่อน้ำซึม โดยนำมาใช้งานในรูปของยางรีเคลม ผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) และเส้นใยสั้นจากพลายในขยะยางรถยนต์ (Waste tire fiber, WTF) ที่ผ่านการบดในระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลมมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นสามารถใช้เสริมแรงให้กับท่อน้ำซึม แสดงรูปขยะยางรถยนต์ และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ ดังรูปที่ 1.1



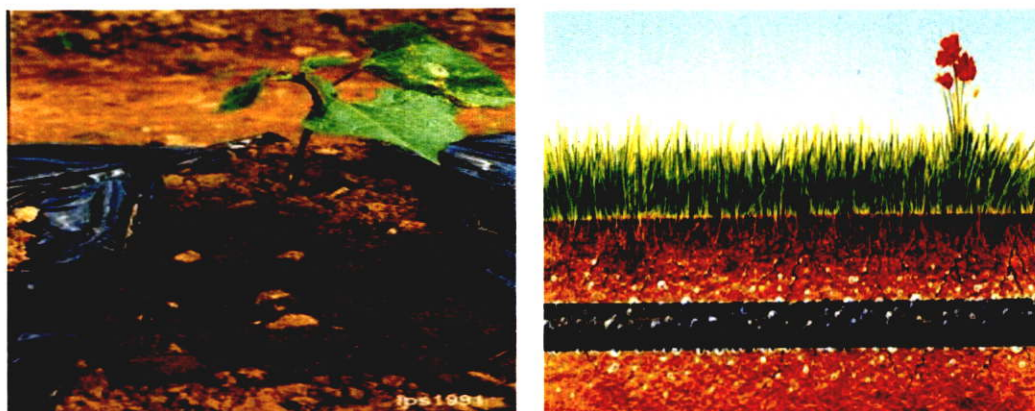
รูปที่ 1.1 รูปขยะยางรถยนต์ (ภาพถ่าย) และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ (Waste tire fiber) (ภาพถ่าย) [3-4]

“น้ำ” เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง และมีความจำเป็นที่ต้องการการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคต เป็นที่ทราบกันดีว่าปรากฏการณ์โลกร้อน (Global warming) นับว่ายิ่งจะรุนแรงขึ้นทุกวัน สังเกตได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มสูงขึ้น ฤดูร้อนยาวนาน ระดับน้ำในแหล่งน้ำต่าง ๆ ลดต่ำลง ปัญหาภัยแล้งเกิดขึ้นทุกพื้นที่เกษตรกรต้องซื้อน้ำเพื่อรดต้นไม้ ปัญหาแย่งทรัพยากรน้ำระหว่างเกษตรกรและหน่วยงานของรัฐ ฯลฯ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรที่มีความจำเป็นต้องใช้น้ำสำหรับการเพาะปลูกและอุปโภคบริโภค ดังนั้นการจัดการน้ำอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับประเทศเกษตรกรรมอย่างเช่นประเทศไทย ท่อน้ำซึม (Porous pipe) แสดงดังรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นท่อที่มีรูพรุนจำนวนมาก น้ำสามารถไหลผ่านในอัตราที่กำหนดเหมาะสมกับความต้องการของพืชสามารถใช้เป็นอุปกรณ์การให้น้ำที่มีประสิทธิภาพ และสามารถใช้โดยการวางบนพื้นดินหรือฝังบนผิวดิน (Sub-surface) บริเวณปลายรากรอบต้นไม้ลึกประมาณ 15 เซนติเมตรสามารถประหยัดน้ำได้ถึง 50-80 % โดยทั่วไปการให้น้ำบนผิวดินทำให้เกิดการสูญเปล่าของน้ำจากการระเหยไปในอากาศ และดูดซับบนผิวดิน การให้น้ำบริเวณปลายรากจึงเป็นวิธีการให้น้ำที่มีประสิทธิภาพและประหยัดน้ำสูงสุด และท่อน้ำซึมยังสามารถใช้วางบนผิวดินได้ฟิล์มคลุมดิน (Mulch film) ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 ภาพวาดแสดงท่อน้ำซึม [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 การให้น้ำของท่อน้ำซึม เช่น การให้น้ำใต้ฟิล์มคลุมดิน (Mulch film) (ภาพซ้าย) และการให้น้ำใต้ดินบริเวณปลายราก เป็นการให้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดการสูญเสียน้ำน้อย (ภาพขวา) [5]

ตารางที่ 1.1 ข้อดี และข้อเสียของเทคนิคการให้น้ำทางการเกษตร

เทคนิคการให้น้ำ	อุปกรณ์	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบน้ำต้น	สปริงเกอร์ (Sprinkler)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถให้น้ำกระจายได้ในวงกว้าง</li> <li>- มีความชื้นที่ดินสูงในการรดน้ำแต่ละครั้ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เปลืองน้ำ</li> <li>- มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงเช่นปั้มน้ำจากพลังงานเช่น ไฟฟ้า และ น้ำมัน</li> <li>- มีต้นทุนสูงในการติดตั้งและดูแลรักษา</li> </ul>
ระบบน้ำหยด	ท่อน้ำหยด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประหยัดน้ำ</li> <li>- ติดตั้งง่าย</li> <li>- สามารถใช้แรงดันน้ำจากแรงโน้มถ่วงโลกได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีต้นทุนในการติดตั้งและดูแลรักษาสูงโดยเฉพาะหัวน้ำหยด</li> <li>- เป็นการให้น้ำเฉพาะจุด</li> </ul>
	ท่อน้ำซึม	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประหยัดน้ำ</li> <li>- สามารถใช้ได้ทั้งบนดิน และใต้ดิน</li> <li>- ติดตั้ง และดูแลรักษาง่าย</li> <li>- สามารถให้น้ำได้ตลอดแนวท่อส่งผลให้ปลูกพืชต่อตารางเมตรได้มากกว่าท่อน้ำหยด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีริ้ซึมในการกระจายน้ำน้อยกว่าระบบน้ำต้น</li> <li>- รุพรุนเสี่ยงต่อการอุดตันเมื่อแหล่งน้ำสกปรกมาก</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ท่อน้ำซึมส่วนใหญ่ที่ผลิตขายในเชิงพาณิชย์เป็นท่อพลาสติกซึ่งมีความแข็งแรงทนต่อความดันน้ำได้ดีที่ความดันสูง [6] อย่างไรก็ตามท่อน้ำซึมทำจากพลาสติกนั้นไม่ทนต่อแรงกระทำภายนอก เช่น ไม่ทนต่อการเหยียบย่ำอาจเกิดการแตกหักได้ง่ายเนื่องจากท่อมีความแข็ง และเป็นรูปทรงซึ่งแตกต่างจากท่อที่มีความนิ่ม ยืดหยุ่นสูง เหนียว แข็งแรง และสามารถโยกย้ายเปลี่ยนทิศทางการให้น้ำได้ง่ายกว่าท่อน้ำซึมที่ทำจากพลาสติก นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ผลิตท่ออย่างมีราคาถูกรวมองค์ประกอบหลักเป็นผงยางที่บดจากยางที่ใช้แล้ว เช่น ยางรถยนต์ มีต้นทุนการผลิตต่ำมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์และใช้งานจริง แต่ท่อน้ำซึมทำจากยางนั้นสามารถทนแรงดันน้ำได้ต่ำ และมีอัตราการซึมผ่านน้ำที่มากเมื่อเพิ่มความดันโดยเฉพาะความดันสูง และมีการขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางมากเนื่องจากรูปทรงเกิดการขยายตัว และเกิดการฉีกขาดส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำสูง [7-8] กล่าวคือไม่สามารถใช้กับแรงดันน้ำทั่วไปได้ เช่น น้ำประปาที่มีความดันน้ำประมาณ 0.5-1.6 bar

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง [7-8] ทำการผลิตอุปกรณ์ “ท่อน้ำซึม” เป็นอุปกรณ์การให้น้ำทางการเกษตรประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามท่อน้ำซึมยังทนแรงดันน้ำได้ต่ำเกิดการขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากส่งผลให้เกิดอัตราการไหลซึมของน้ำมากโดยเฉพาะที่ความดันสูง งานวิจัยนี้จึงมาศึกษาพัฒนาท่อน้ำซึมให้มีความแข็งแรงมากขึ้นโดยศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง เช่น เชมาดา และการใช้เส้นใยสังเคราะห์ (Ply) ในขณะยางรถยนต์มาเสริมแรงแก่ท่อน้ำซึม เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น พร้อมทั้งพัฒนาอัตราการไหลของน้ำด้วยสารให้พองเพื่อให้โครงสร้างท่อน้ำซึมเป็นเซลล์เปิด (Open cell) เพื่อให้มีอัตราการไหลของน้ำเหมาะสมต่อการใช้งานของพืช และมีต้นทุนการผลิตที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยใช้วัตถุดิบจากยางธรรมชาติ และขณะยางรถยนต์ใช้แล้ว เช่น ผงยางรถยนต์, ขยะยางรถยนต์แปรรูปแล้ว (ยางรีเคลม) งานวิจัยนี้ได้ทำความร่วมมือกับบริษัท แสงไทยผลติยาง จำกัด เพื่อขึ้นรูปท่อน้ำซึมในเชิงอุตสาหกรรมเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตท่อน้ำซึมในเชิงพาณิชย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการผลิตและสมบัติของท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลม และผงยางรถยนต์ เสริมแรงด้วยเส้นใยสังเคราะห์ในขณะยางรถยนต์ โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการ ได้แก่ อัตราส่วนผงยางรถยนต์ต่อยางธรรมชาติและยางรีเคลม ปริมาณเส้นใยเสริมแรงจากผงยางรถยนต์ ปริมาณเชมาดา และปริมาณสารให้พองที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลเพื่อลดการขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter swell) ของท่อน้ำซึมให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมต่อการเกษตร โดยเฉพาะที่ความดันสูง และค่าความดันระเบิด (Burst pressure) ที่ดีขึ้น นอกจากนี้ศึกษาผลของความยาวท่อน้ำซึมต่อความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านของน้ำเพื่อการใช้งานได้จริงให้มีความเป็นไปได้ในการผลิตท่อน้ำซึมในเชิงพาณิชย์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทดลองผสม ขึ้นรูป และทดสอบสมบัติต่าง ๆ โดยใช้การเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160°C เพื่อศึกษาหาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมของท่อน้ำซึมโดยศึกษาที่เวลา 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที
- 2) ศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตท่อน้ำซึมจากอัตราส่วนของยางธรรมชาติผสมยางรีเคลม (NR:RR) ในอัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 (โดยน้ำหนัก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมที่ส่งผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม เช่น ปริมาณเขม่าดำ (30, 50 และ 70 phr), เปรียบเทียบวิธีการใช้เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ เช่น การนำมาใช้โดยตรง และ มาสเตอร์แบทช์เส้นใย (3, 6, 9 และ 12 phr), การใช้เขม่าดำร่วมกับเส้นใย (เขม่าดำ 50 phr : เส้นใย 2, 4 และ 6 phr) และปริมาณสารให้ฟอง (0.5, 1 และ 1.5 phr) โดยทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมสูตรต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา อัตราการซึมผ่านของน้ำ เปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านจุดศูนย์กลาง และความดันระเบิดของท่อน้ำซึม

4) ศึกษาผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ และความดันลด (Pressure drop) ที่ความยาวท่อ 50 เมตร ที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น 25 และ 50 เมตร

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

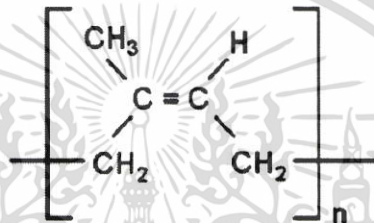
- 1) ได้สิ่งประดิษฐ์ต้นแบบ และความรู้ที่จะสามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ และจดสิทธิบัตร
- 2) เพิ่มมูลค่าและปริมาณการใช้วัตถุดิบยางพาราธรรมชาติภายในประเทศ แก้ปัญหายาง ล้นตลาด ราคาตกต่ำ ช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรชาวสวนยาง
- 3) เพื่อทำให้เกิดนวัตกรรมให้น้ำทางการเกษตรที่มีประสิทธิภาพสูง ประหยัดน้ำและใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ราคาถูก
- 4) เกิดการบูรณาการความร่วมมือในการทำวิจัยระหว่างภาครัฐและเอกชน และช่วยให้เกิดนวัตกรรมการออกแบบสินค้าต้นแบบโดยคนไทย
- 5) ยกระดับอุตสาหกรรมการแปรรูปยางภายในประเทศไทย และเกษตรกรไทย เพิ่มศักยภาพในการแข่งขันให้กับประเทศไทย ซึ่งขยายตลาดไปยังกลุ่ม AEC และทั่วโลก

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubbers, NR)

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีชื่อทางเคมี คือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงซึ่งยางธรรมชาติมีหน่วยซ้ำ ๆ กันคือไอโซพรีน (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือ ต้นยางพารา และมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ “ฮีเวีย-บราซิลิเยนซิส” (*Hevea Brasiliensis*) ในบางครั้งเรียกยางธรรมชาติว่า “ยางพารา” [9]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน) [9]

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง (Elasticity) สามารถยืดตัวออกได้มากหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่าเมื่อทำการให้แรง และสามารถหดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วหลังปล่อยแรง มีสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น ยางธรรมชาติมีจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (Crystallization) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำขึ้นยางก็จะอ่อนลงดังเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแสดงถึงสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ถึงแม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) สูง ถึงอย่างไรก็ตามยางธรรมชาติยังมีขีดจำกัดในการใช้งานในด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้น กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเหนอะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ดังนั้นยางธรรมชาติจึงต้องผสมกับสารเคมีต่าง ๆ เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น หลังการบดผสม ยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปแล้วมีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ยางรีเคลม (Reclaimed rubber)

ยางรีเคลม (Reclaimed rubber, RR) เป็นยางที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ยางที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหรือไม่ใช้แล้ว เช่น ยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพและผลิตภัณฑ์ของเสียที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต ยางเหล่านี้เป็นยางที่ผ่านการคงรูปมาแล้ว (Vulcanized rubber) มีการเชื่อมโยงแบบ 3 มิติ การทำยางรีเคลมเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของยางเป็นโครงสร้าง 2 มิติ หรือดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) ซึ่งยางรีเคลมสามารถทำได้ทั้งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ [10] โดยขั้นตอนแรกจะทำการกำจัดตัวสคูอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางออกไปให้หมด เช่น โลหะและเส้นใยต่าง ๆ และหลังจากนั้นทำการบดให้เป็นเศษ (Crumb) ขนาด 20-30 เมช (Mesh) แล้วผ่านสู่กระบวนการโดยใช้ความร้อน สารเคมี ร่วมด้วยวิธีเชิงกล ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะมีการเติมสารเคมีที่ใช้ในการช่วยบดยางรีเคลม ได้แก่ กลุ่มเปปไทซ์ (Peptizing agent) และกลุ่มฟีนอลิกไดซัลไฟด์ (Phenolic disulfides) เช่น ไดเบนซามิดิฟีนิล-ไดซัลไฟด์ (Dibenzamidediphenyl disulfide) เพนตะคลอโรโธไอฟีนอล (Pentachlorothio-phenol, PCTP) และนอกจากนี้ยังอาจใช้น้ำมัน (Reclaiming oils) เช่น น้ำมันสน เพื่อเป็นสารทำให้นิ่ม สามารถผลิตยางรีเคลมได้หลายกระบวนการ เช่น

1. Digester process เป็นกระบวนการไม่ต่อเนื่อง โดยกระบวนการนี้จะผสมเศษยางกับน้ำมัน และสารเติมแต่งอื่น ๆ แล้วจะนำไปต้มลงในหม้ออัดความดัน (Digester) ที่มีการปั่นกวนตลอดเวลา และให้ความร้อนด้วยไอน้ำ ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้อนุกรมมีความสม่ำเสมอ และรักษามวล โดยจะมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลาประมาณ 4-10 ชั่วโมง โดยมีการปั่นกวนอย่างต่อเนื่องแล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการต่อไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพ

2. Pan process หรือ Heater process เป็นกระบวนการไม่ต่อเนื่อง โดยผสมเศษยางและน้ำมันแล้วนำไปต้มลงในเครื่องอบความร้อนสูงด้วยไอน้ำ ความดันที่ใช้ประมาณ 100-250 ปอนด์ ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลานานประมาณ 5-12 ชั่วโมง แล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพต่อไป

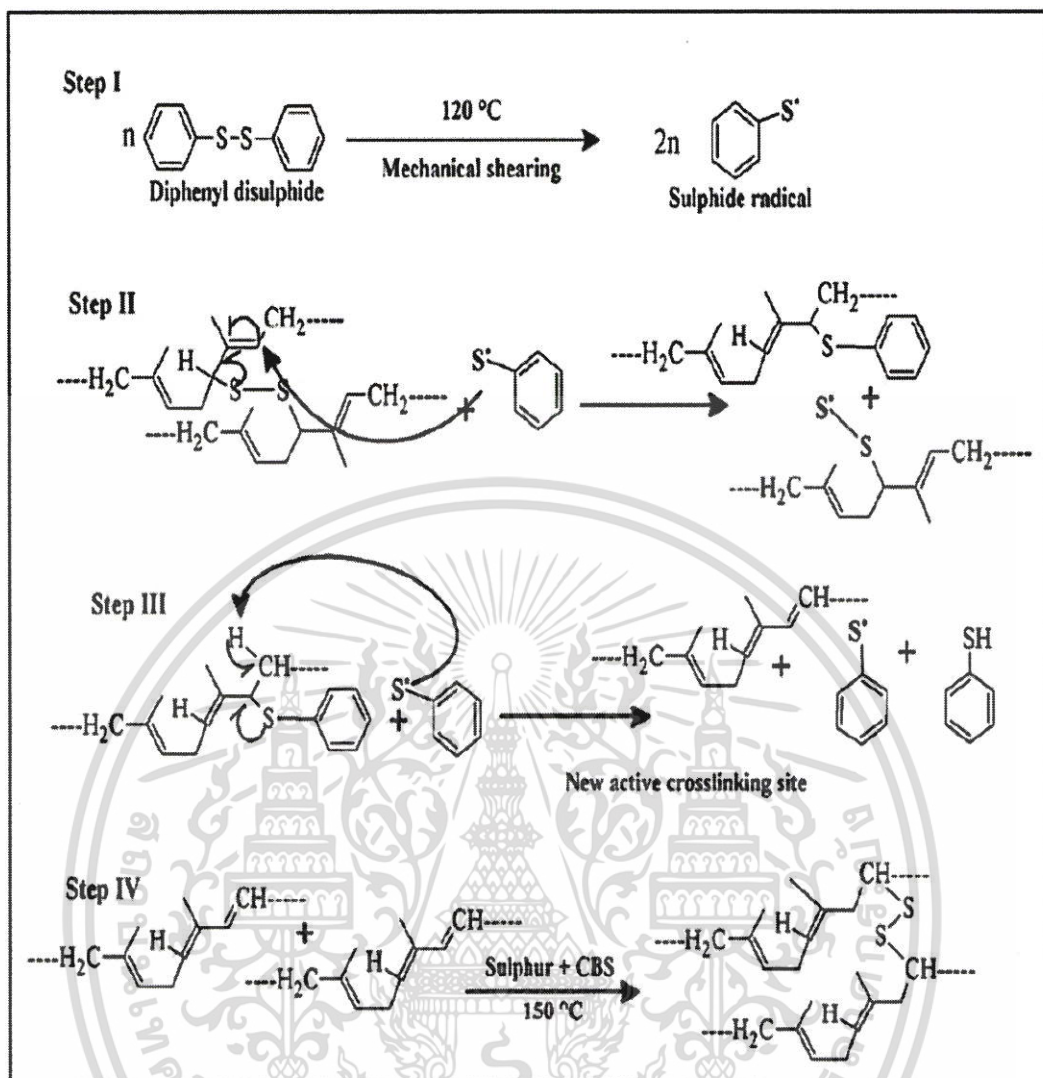
3. Reclaimator process เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องโดยมีการผสมเศษยางกับน้ำมันแล้วนำไปต้มลงในเครื่องรีเคลม (Reclaimator) ที่มีลักษณะคล้ายกับเครื่องอัดรีด ซึ่งแต่ละส่วนมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และส่วนปลายสุดจะมีอุณหภูมิที่เย็น สกรูจะมีการออกแบบเป็นพิเศษ และจะมีช่องว่างระหว่างสกรูกับกระบอกใส่สกรุน้อย อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 200-260°C เป็นเวลา 30 นาที ยางรีเคลมที่ออกมาจากกระบวนการนี้จะเย็น แล้วถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพต่อไป

## 2.3 วิธีการทำยางรีเคลม

### 2.3.1 วิธีการทางเคมี (Chemical method)

กระบวนการดีวัลคาไนเซชันทางเคมี เป็นวิธีที่ใช้สารเคมีเพื่อตัดพันธะระหว่างคาร์บอนกับซัลเฟอร์ (C-S) และซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์ (S-S) เป็นวิธีการใช้พลังงานความร้อน และพลังงานเชิงกลเพื่อเร่งการเกิดดีวัลคาไนเซชัน สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ กลุ่มไดซัลไฟด์ (Disulfides) เช่น ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (diphenyl disulfide) และไทโอฟีนอล ตัวอย่างความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ความเข้มข้นประมาณ 0.5-10 %wt วิธีการดีวัลคาไนเซชันทางเคมีส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทำเป็นแบทช์ (Batch) โดยการผสมสารเคมีกับผงยางรถยนต์จากนั้นทำการควบคุมความดัน และอุณหภูมิ ข้อเสียเปรียบของวิธีนี้ คือ มีความเป็นพิษจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามไดซัลไฟด์เป็นหนึ่งในสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงมีกลไก ดังรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาไดฟีนิลไดซัลไฟด์ระหว่างการทำวัลคาไนเซชัน [1]

### 2.3.2 วิธีการใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic method)

การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกด้วยระดับคลื่นของอัลตราโซนิกเพื่อตีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) ยางโดยเลือกตัดพันธะการเชื่อมโยงของยาง ได้แก่ คาร์บอนกับซัลเฟอร์ (C-S) และซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์ (S-S) ปรากฏจากการตัดพันธะคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) อย่างไรก็ตามถ้ามีความดัน และอุณหภูมิที่เกินระดับที่ไม่เหมาะสมคลื่นอัลตราโซนิกสามารถตัดสายโซ่หลักของยางได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องระวังในการใช้วิธีนี้ ซึ่งในวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และไม่ต้องใช้สารเคมี การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการตีวัลคาไนเซชันนั้นสามารถทำเป็นกระบวนการต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีด โดยมีการเพิ่มส่วนของอัลตราโซนิกในเครื่องอัดรีด การใช้วิธีการทำยาง รีคลอมด้วยวิธีอัลตราโซนิกเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมการตีวัลคาไนเซชันด้วยระดับคลื่นอัลตราโซนิก ทำให้สามารถมีระดับการตีวัลคาไนเซชันที่สูงได้ เหมาะสมกับอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องอัดรีดเป็นหลักในการทำยางรีคลอม

### 2.3.3 วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave method)

การดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟโดยใช้รังสีไมโครเวฟทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ และก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของยาง ส่งผลให้พันธะในการเชื่อมโยงสามารถแตกออกจากกัน โดยสามารถควบคุมพลังงานที่จะทำลายพันธะคาร์บอนกับซัลเฟอร์ (C-S) และซัลเฟอร์กับซัลเฟอร์ (S-S) โดยไม่ทำลายพันธะคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) วิธีการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟนั้นควรใช้กับยางที่มีขั้ว เทคโนโลยีดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟแสดงการจดสิทธิบัตรโดย Goodyear Tire & Rubber Co. ที่ความถี่ 915 หรือ 2450 MHz โดยทำให้เกิดพลังงานที่อยู่ระหว่าง 325 และ 1404 kJ/kg ในการดีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟไม่ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ วิธีการใช้ไมโครเวฟในการดีวัลคาไนเซชันยางนั้นเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้การแผ่รังสีเพื่อดีวัลคาไนเซชันยาง และสิ่งที่สำคัญคือการควบคุมพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเพื่อให้การเสื่อมสลาย (Degradation) ของยางน้อยที่สุด

### 2.3.4 วิธีการทางชีวภาพ (Biological method)

การใช้เทคนิคทางชีวภาพในการดีวัลคาไนเซชันโดยใช้จุลินทรีย์สามารถเลือกตัดพันธะการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์ได้ การเกิดดีวัลคาไนเซชันเกิดขึ้นที่บนบริเวณพื้นผิวของยาง และมีอัตราการดีวัลคาไนเซชันที่ต่ำด้วยข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลาค่อนข้างนานประมาณ 40 วัน ซึ่งการดีวัลคาไนเซชันด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพนี้ยังคงห่างไกลในการมาประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม แบคทีเรียที่ใช้ในการตัดพันธะการเชื่อมโยงผ่านกระบวนการดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (Desulfurization) ได้แก่ *T. ferrooxidans*, *Alicyclobacillus sp.*, *Sphingomonas sp.*, and *G. desulfuricans DSM44462T* จากผลงานวิจัยพบว่าการดีซัลเฟอร์ไรเซชันโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ *Sphingomonas sp.* ในช่วง 20 วัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของยางพันธะคู่ของยางถูกทำลาย และที่พื้นผิวของยางรถยนต์มีปริมาณกำมะถันลดลง จากการวิเคราะห์ความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ *Alicyclobacillus sp* ในกระบวนการดีซัลเฟอร์ไรเซชันของเศษยางเป็นเวลา 15 วัน โดยใช้เวลา 10 วัน หลังจากทำการทดลองมีจำนวนซัลเฟอร์ และออกซิเจนลดลงบริเวณพื้นผิวของยาง พบว่าพันธะการเชื่อมโยงของซัลเฟอร์บนบริเวณพื้นผิวถูกทำลายเปลี่ยนเป็นในรูปแบบกลุ่มซัลโฟน (Sulfones groups) และมีสมบัติการชอบน้ำ (hydrophilic properties) มากขึ้น ในปัจจุบันการดีวัลคาไนเซชันด้วยกระบวนการทางชีวภาพยังคงมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง แต่ในความเป็นจริงแล้วมีแบคทีเรียเพียงไม่กี่สายพันธุ์ที่สามารถดำเนินการดีซัลเฟอร์ไรเซชันยางได้ วิธีนี้มีขั้นตอนในการทำเป็นเวลานาน และเสี่ยงต่อการปนเปื้อนแบคทีเรีย จึงเป็นวิธีที่ยังคงศึกษาเพียงในห้องปฏิบัติการยังไม่พัฒนาถึงขั้นอุตสาหกรรม

## 2.4 ผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT)

ผงยางรถยนต์เป็นวัตถุดิบส่วนหนึ่งที่ได้ในระหว่างการผลิตยางรีเคลม (Reclaim rubber) โดยผงยางที่ทำการผลิตส่วนใหญ่จะได้จากยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และเป็นบางส่วนที่เป็นของเสียในกระบวนการผลิตนั้นสามารถผลิตได้ 2 วิธี [11]

### 2.4.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

เทคนิคนี้ทำได้โดยการให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) โดยการทำให้ยางมีอุณหภูมิต่ำ เช่น การแช่ยางที่เชื่อมโยงแล้วลงในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) ขั้นตอนต่อไปทำการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบลูกกลมโลหะ (Ball mill) จะได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 30-100 เมช (Mesh) ขนาดอนุภาคของผงยางที่ได้นี้ขึ้นกับเวลาที่แช่ในไนโตรเจนเหลวและขนาดของตะแกรงร่อน (Screen) ที่อยู่ในเครื่องบด โดยทั่วไปแล้วราคาของผงยางนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีขนาดอนุภาคเล็กลงมีการรายงานการใช้ผงยางประมาณ 5-10 phr ในยางล้อโดยสารและรถบรรทุก การแปรรูปและการผสมผงยาง ผงยางชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถแปรรูปได้หลายลักษณะดังนี้

- การอัดรีด (Extrusion) การใช้ผงยางขนาด 80-100 เมช สามารถแก้ปัญหาเรื่องรอยแตกและรอยขรุขระ ส่วนขนาดอนุภาค 50-60 เมช ก็สามารถใช้ได้ขึ้นกับความต้องการความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์ ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณ 5%

- การอัดขึ้นรูป (Molding) สามารถใช้ผงยางได้ทุกขนาดเนื่องจากการไล่ฟองอากาศที่ขังในยางขณะขึ้นรูป

- การรีดแผ่น (Calendering) มีการใช้ผงยางขนาด 80-100 เมช จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขนาด 0.06 นิ้วหรือน้อยกว่ามีผิวเรียบสูงสุด ถ้าไม่ต้องการใช้ความเรียบของผิวสามารถใช้ขนาด 30-60 เมช

- การไหลขณะขึ้นรูป (Mold flow) โดยทั่วไปผงยางจะช่วยปรับปรุงการไหลขณะขึ้นรูปเกิดการหดตัว (Shrinkage) น้อย การหดตัวลดลงเมื่อขนาดของผงยางเพิ่มขึ้น

เครื่องมือในการผลิตยางชนิดนี้มีราคาสูง ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมที่แตกต่างจากผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของผงยาง ทำให้สามารถกำจัดอากาศที่ขังอยู่ในยางที่ไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงออกไปได้ง่าย โดยเฉพาะยางล้อรถ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงของการพองหลังจากการเชื่อมโยง และผงยางจะถูกออกซิเดชันที่ผิวน้อยลงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งแตกต่างจากผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้องที่มีพื้นที่ผิวสูง (10-30 เมช)

### 2.4.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding)

สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

1. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (Dry ambient grinding) การผลิตจะทำได้โดยการนำยางที่ทำการเชื่อมโยงแล้วบดด้วยเครื่องฟันปลา (Serrated grinder) ได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ประมาณ 10-30 เมช และเกิดก้าง (Pendant) ที่ผิวชิ้นจำนวนหนึ่ง ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับยางดิบได้ดี ส่วนใหญ่ใช้ในยางล้อและผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม โดยทั่วไปใช้ประมาณ 5-20 phr เมื่อขนาดอนุภาคของผงยางเพิ่มขึ้นความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์จะลดลง ถึงแม้จะมีชื่อการผลิตว่า “การบดที่อุณหภูมิห้อง” แต่ในทางปฏิบัติจะให้ความร้อนระหว่างกระบวนการผลิต การให้ความร้อนสูงจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัว

2. การบดยางที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก (Wet ambient grinding) เป็นวิธีที่ปรับปรุงการบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง ซึ่งลดขนาดอนุภาคของยางด้วยการบดในน้ำ ขนาดอนุภาคขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการบด อนุภาคผงยางที่ได้มีขนาด 400-500 เมช ข้อดีของอนุภาคเล็กคือทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีการอัดรีดและการรีดแผ่นมีผิวเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

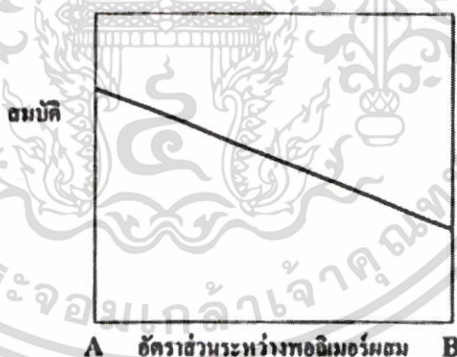
## 2.5 พอลิเมอร์ผสม

การผสม (Blending) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์โดยอาจจะเป็นการผสมกับพอลิเมอร์ ชนิดอื่น ๆ หรือ ผสมกับสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อให้ได้สมบัติที่หลากหลายตามความต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้ รวมเป็นเนื้อเดียวกัน ได้เป็นพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน เกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม โดยไม่ต้องเสียเวลาในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งต้องใช้เวลาและอาจต้องใช้ต้นทุนสูงในการสังเคราะห์ [12]

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ คือ ความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์สองชนิด หรือมากกว่าในระดับโมเลกุล ไม่แสดงการแยกเฟสเมื่อทำการผสม ซึ่งความเข้ากันได้จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ มวลโมเลกุล สัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสอง และสถานะของการผสม โดยขึ้นกับวิธีการผสม อุณหภูมิ และเวลา [14-15]

พอลิเมอร์ผสมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

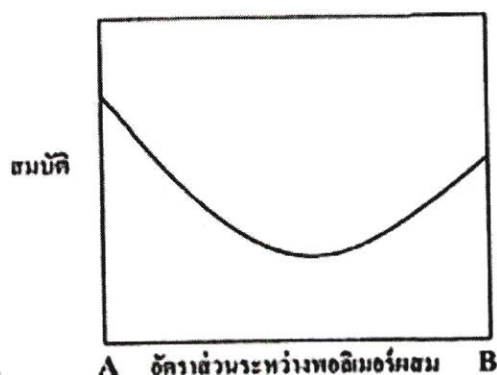
1. พอลิเมอร์ที่ผสมเข้ากันได้ (Miscible blend) หมายถึงพอลิเมอร์ที่นำมาผสมมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter) ใกล้เคียงกันเป็นผลให้พอลิเมอร์ผสมรวมเป็นวัฏภาคเดียวกัน โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้กราฟที่ได้เป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเข้ากันได้ (Miscible) [14]

2. พอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเข้ากัน (Immiscible blend) หมายถึงพอลิเมอร์ที่นำมาผสมนั้นบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกัน ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดไม่ผสมเข้ากันได้ และแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาคโดยแต่ละวัฏภาคจะมีการดึงดูดกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่อ่อนแอด้วยเหตุนี้จึงเกิดการเสียหายได้แม้ในกรณีที่มีความเค้นต่ำมาก ๆ ทั้งทางกล ทางความร้อน และทางเคมี จากนั้นสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์เดิมที่นำมาผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่มีผสมเข้ากันไม่ได้ [14]

## 2.6 สารเติมแต่งสำหรับยาง

การผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องการ “ออกสูตรยาง” (Rubber formulation) ซึ่งเป็นการกำหนดชนิดและปริมาณสารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมเข้ากันยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ส่วนประกอบของสูตรผลิตภัณฑ์ยางต่าง ๆ สามารถแบ่งเป็นกลุ่มสารหลักได้ดังต่อไปนี้ [9]

### 2.6.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent)

สารเชื่อมโยงทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง ทำให้ยางที่เป็นวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง สารเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 5 ชนิดคือ

1. กำมะถัน (Sulfur)
2. สารเปอร์ออกไซด์
3. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor)
4. ซีลีเนียม (selenium) และ เทลลูเรียม (Tellurium)
5. สารอื่น ๆ เช่น โลหะออกไซด์ ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins)

#### 2.6.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization)

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เป็นวิธีการที่นิยมที่สุดเนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นอย่างดีที่ไม่อึดตัว มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBS) และยางบิวตะไดอีน (BR) ฯลฯ จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activator) กำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงมี 2 ชนิด

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปผลึกรวมบิก (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม ( $S_8$ ) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถันในปริมาณ 1-3 phr ถ้าใส่กำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการ “บลูม” (Bloom) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำมะถันเกิดการแพร่จากภายในออกมาสะสมเป็นผลึกที่ผิวของผลิตภัณฑ์เห็นเป็นรอยคราบสีเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่าง ๆ ในกราฟการเชื่อมโยงดังนี้

$M_L$	=	ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
$M_{HF}$	=	ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่สูงสุดแล้วลดลง (Plateau torque)
$M_{HR}$	=	ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงที่สุดแล้วลดลง (Reversion)
$M_H$	=	ค่าแรงบิดสูงสุดของกราฟในเวลาทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)
$t_{s2}$	=	เวลาเริ่มเชื่อมโยง หรือ เวลาสกอร์ช (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนกระทั่งแรงบิด เพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว (ib-in) เทียบกับแรงบิดต่ำสุด ( $M_L$ )
$M_{90}$	=	ค่าแรงบิดที่ 90% ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก $M_{90} = M_L + 0.9(M_{HF} - M_L)$
$t_{c(90)}$	=	เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90% ( $M_{90}$ ) นิยามเท่ากับเวลาเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเชื่อมโยง (Optimum cure time)
CRI	=	ดัชนีอัตราเร็วเชื่อมโยง (Cure rate index) คำนวณได้จากสมการ $\text{Cure rate index (CRI)} = 100/(t_{c(90)} - t_{s2})$

### 2.6.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง คือสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งการเชื่อมโยงปฏิกิริยาเชื่อมโยง ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันน้อยลง [9,16-18]

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM เป็น 6 กลุ่มดังนี้

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

ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่า 1 ชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าจะเป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerators) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันทำให้เกิดอัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

CBS เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มซัลเฟนาไมด์ ซึ่งเป็นสารเร่งที่มีเวลาการเชื่อมโยงยาวกว่าไทเอโซล การใส่ซัลเฟนาไมด์เพิ่มขึ้นทำให้ Scorch time สั้นลงบ้าง แต่ทำให้มีเวลาเชื่อมโยง (Cure rate) สั้นลงมากและมอดูลัสสูงชันมากด้วย เนื่องจากซัลเฟนาไมด์มี Scorch time ยาว ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในแม่แบบดี เพราะมีเวลาให้ยางไหลได้เต็มแม่แบบและไม่เหมาะต่อการเชื่อมโยงแบบใช้อากาศร้อน แต่เมื่อนำซัลเฟนาไมด์ผสมกับเตตระเมทิลไทยูแรมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram monosulfide, TMTM) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TMTD เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มไทยแรมไดซัลไฟด์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดและนิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มนี้ ยางที่ใช้ไทยแรมเป็นสารเร่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้หลายวิธี เช่น ใช้เครื่องอบไอน้ำและอากาศร้อน ซึ่งทำให้ยางเกิดการจัดตัวก่อนที่จะเสีรูปร่างในขณะที่เชื่อมโยงในบางครั้งอาจใช้ไทยแรมเป็นสารเร่งทุติยภูมิร่วมกับสารเร่งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์

### 2.6.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดนอกอุตสาหกรรมยางในปัจจุบันได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่เป็นอนินทรีย์ที่สำคัญและนิยมใช้ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มอดุลัสจะเพิ่มขึ้นและปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่มาก ให้มอดุลัสสูงสุดคือมากกว่า 3 phr โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีอนุภาคเล็ก สามารถใช้ในปริมาณ 1 phr ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีมอดุลัสและมีสีใส

กรดไขมันเป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ สำหรับสารเร่งการเชื่อมโยงบางตัว เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิดิก กรดลอริก เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดอะลิฟาติกอิ่มตัว ที่มีคาร์บอน 12 ถึง 18 ต่อม ปริมาณการใช้กรดไขมันในยางขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ในปริมาณที่น้อย สำหรับยางธรรมชาติมีกรดไขมันอยู่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งอยู่ในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่อยู่ในยางธรรมชาติมีปริมาณต่างกันมาก ซึ่งทำให้เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ในยางธรรมชาติจะใช้ปริมาณ 1-4 phr เพื่อลด Cure time ที่ต่างกัน

### 2.6.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradation)

สารป้องกันออกซิเดชันเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสภาพได้ เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ซึ่งออกซิเจนเป็นตัวการสำคัญของการเสื่อมสลายของยาง โดยที่โลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยาง เป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสลายเร็วขึ้น

สารป้องกันออกซิเดชัน สามารถแบ่งตามสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น 3 ชนิด

1. สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์
2. สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์
3. Imidazyl derivative

สารป้องกันโอโซนเป็นสารที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ตั้งยาง เมื่อนำยางไปยึดไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง ยางชนิดไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ จะเกิดการแตกของยางเนื่องจากโอโซนมากกว่ายางชนิดอิ่มตัว เช่น ยางบิวทิล (IIR) หรือยางอีพ็อกไซด์ (EPR) สารป้องกันโอโซนที่ดีคือ P-Phenylenediamine (PPD) นอกจากนี้ยังพบว่าซีผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax) ยังเป็นสารที่ใช้ป้องกันโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ด้วย โดยปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการใช้มากพอที่จะซึมออกมาที่ผิว ซึ่งซีเมนต์ที่ซึมออกมาที่ผิวจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ไอโซนทำปฏิกิริยากับผิวยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อไอโซน

### 2.6.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมเป็นสารที่มีราคาถูก เทียบกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีราคาแพง สามารถใช้ผสมในยางเพื่อเพิ่มปริมาณของยางผสมสูตรหรือผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดสามารถเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยางโดยทำให้พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมมีความแข็งแรงสูงขึ้น

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ

2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่ลดปริมาณหรือลดต้นทุนเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรงได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ดินขาว (Clay) ฯลฯ

#### 2.6.5.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดสามารถเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติของการเสริมแรงได้แก่

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

2. โครงสร้าง (Structure) ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่อยาง ส่วนใหญ่จะมีผลทางด้านการแปรรูปเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะผสมกระจายในยางได้ดีทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีด (Extrusion) มีผิวเรียบ แต่ผสมในยางได้ปริมาณน้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ

3. เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 90-99% ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณน้อยปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะให้ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน ซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เขม่าดำที่มีความเป็นด่างจะเกิดการเชื่อมโยงเร็วกว่าเขม่าดำที่เป็นกรด

4. ความเป็นรูพรุน ความเป็นรูพรุนในเขม่าดำจะมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เพราะรูพรุนนี้จะดูดสารเร่งเข้าไปทำให้การเชื่อมโยงช้าลง

ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยางมีดังนี้

1. ความแข็งแรงดึง เขม่าดำเกือบทุกตัวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่เขม่าดำปริมาณ 40-50 phr จะทำให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด
2. ความทนทานต่อการขีดถู ขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีผลอย่างมากต่อความทนทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการขีดถูจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคเขม่าดำเล็กลง โดยที่ปริมาณเขม่าดำ 60 phr จะความทนทานต่อการขีดถูสูงสุด
3. ความแข็งกด (Hardness) ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ และถ้าขนาดอนุภาคเขม่าดำลดลงความแข็งกดจะเพิ่มขึ้น เขม่าดำจะทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น จนถึงจุดหนึ่ง เมื่อใส่เขม่าดำเพิ่มขึ้นความทนทานต่อการฉีกขาดจะลดลง

### 2.6.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง ช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นทำให้วัสดุมีสมบัติยืดหยุ่นเป็นยางดีขึ้น นิ่มตัวขึ้น พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยางไม่แพร่ออกมาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ เช่น กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมัน (Oils) สารจำพวกเอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine) ฯลฯ

### 2.6.7 สารให้ฟอง (Blowing agent)

สารให้ฟอง คือ สารที่ใส่เข้าไปในยางเมื่อให้ความร้อนแก่ยางขณะเชื่อมโยง โมเลกุลของสารให้ฟองจะสลายตัวให้ก๊าซออกมา ซึ่งทำใหยางเกิดรูพรุนในรูปของฟองน้ำ (Sponge) หรือยางรูพรุนขนาดเล็ก (Micro cellular rubber)

สารให้ฟองที่ดีมีลักษณะดังนี้

- ควรปล่อยก๊าซ ออกมาในช่วงอุณหภูมิแคบและแน่นอน เพื่อสามารถควบคุมได้ง่าย และรวดเร็วพอสมควร
- ก๊าซที่ออกมาไม่ควรกัดกร่อนโลหะ เช่น ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ควรเป็นก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- สามารถกระจายและละลายในยางได้ดี
- มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง
- ไม่มีผลต่ออัตราการเชื่อมโยงยาง
- ไม่ควรทำใหยางหดตัวหรือยุบตัวภายหลังการเชื่อมโยง
- ราคาถูก

สารให้ฟองสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ โซเดียมโบคาร์บอเนต-แอมโมเนียมโบคาร์บอเนต และ แอมโมเนียมคาร์บอเนต ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดนี้จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันนิยมใช้โซเดียมโบคาร์บอเนตมากที่สุด เนื่องจากแอมโมเนียมโบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต่างและกรดตามลำดับ ก๊าซเหล่านี้ถ้าเก็บในยางจะรวมตัวกันได้ ดังนั้นโอกาสของยางที่ขยายตัวจะยุบตัวกลับเล็กลงอีกได้ นอกจากนี้ความเป็นต่างทำใหยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารให้ฟองชนิดอินทรีย์ ปัจจุบันใช้สารชนิดอินทรีย์เกือบทั้งหมด เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถละลายในยางได้ดี ทำให้การกระจายของสารให้ฟองเป็นไปได้อย่างสม่ำเสมอฟองอากาศในยางก็จะกระจายทั่วถึงกันตลอด สามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามโครงสร้างดังนี้

- 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-Toluene sulfonic acid hydrazide
- สารประกอบไนโตรโซ (N-N'-Dinitrosophthalamide)

### 2.6.7.1 Dinitro pentamethylene tetramine (DNPT หรือ DPT)

DNPT มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอ่อน สลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 205°C เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอร์มัลดีไฮด์ และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน แสดงดังรูป 2.6 อย่างไรก็ตามฟอร์มัลดีไฮด์และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่น DNPT สามารถทำให้เจือจางได้โดยไม่เกิดอันตราย ที่ความเข้มข้น 80 % จะให้ก๊าซมาเป็นพิเศษ (ประมาณ 260 cm<sup>3</sup>/g ภายใต้สภาวะปกติ) เนื่องจาก DNPT เมื่อสลายตัวให้ก๊าซปริมาณมากจึงนิยมใช้กันแพร่หลาย สำหรับผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ DNPT ได้แก่ ฟันรองเท้าฟองน้ำ (Porous soles) และ Micro cellular rubber แต่ไม่เหมาะกับการทำ Sponge rubber เนื่องจาก DNPT สลายตัวที่อุณหภูมิสูง [16]



รูปที่ 2.6 กลไกปฏิกิริยาการสลายตัวของ DNPT [19]

### 2.6.8 คิกเกอร์ (Kicker)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) หรือ คิกเกอร์ (Kicker) เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาของสารให้ฟอง และทำให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง คิกเกอร์มีหลายชนิด การเลือกคิกเกอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานมีความสำคัญมาก ปัจจัยที่พิจารณาในการเลือก ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง สภาพะของการใช้งาน ความสามารถการผสมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ หรือความเข้ากันได้ กระตุ้นปฏิกิริยาที่ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้สามารถใช้สารให้ฟองได้ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้าง และสามารถใช้งานร่วมกับสารให้ฟองหลายชนิด

คิกเกอร์ที่ใช้งานกับ DNPT มีหลายชนิดได้แก่

1. สารที่เป็นกรด เช่น กรดซาลิไซลิก และกรดพาทาลิก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกลิ่นและกรดทำให้เกิดการเชื่อมโยงช้าลง
2. สารที่เป็นด่าง เช่น ยูเรีย (Urea) และสารผสมที่มียูเรีย ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น
3. สารที่เป็นกลาง เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล การใช้สารที่เป็นกลางทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกลิ่น และเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

### 2.6.9 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG)

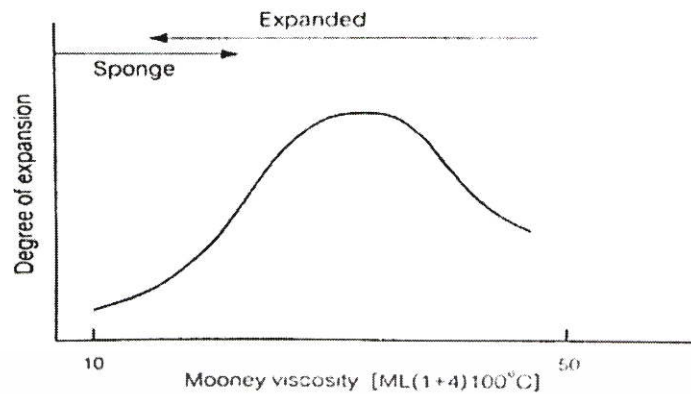
พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจาก เอทิลีนไกลคอลที่ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลีนไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนไกลคอล มีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น จุดเดือดสูง นิยมใช้เพิ่มความหนืดในสารต่าง ๆ เช่น ครีมทาผิว ยาสระผม ในอุตสาหกรรมยางใช้ PEG เคลือบบนพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อป้องกันสารตัวเติมดูดสารเคมีที่มีขี้ เช่น ซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง [18]

## 2.7 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular rubber)

ผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุน แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

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 จะติดต่อกันส่วน Expanded rubber มีโครงสร้างเซลล์ไม่ติดต่อกัน (Closed cellular structure) ในการทำให้เกิดรูพรุนภายใน Sponge rubber และ Expanded rubber [20] จะทำโดยสารให้ฟองซึ่งแตกตัวให้ก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อน การขยายตัวของ Sponge rubber และ Expanded rubber จะขึ้นกับความหนืด (Viscosity) ของยาง สูตรยางที่ใช้ในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber จะต้องมีความหนืดต่ำ ความหนืดที่เหมาะสมจะทำให้การขยายตัวของก๊าซสมบูรณ์ และเมื่อเวลาผ่านไปความหนืดของยางจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ความหนืดต่ำ ยางมีความแข็งแรงต่ำทำให้ฟองก๊าซเกิดการรวมตัวกันหลุดออกจากยางและเกิดการสลายตัวในที่สุด ทำให้ยางมีโครงสร้างแบบเปิดและความหนาแน่นสูงขึ้น ที่ความหนืดสูง ยางมีความแข็งแรงพอที่จะรักษาโครงสร้างของฟองก๊าซ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างแบบปิด แต่ถ้ายางมีความหนืดสูงมาก ฟองก๊าซจะถูกควบคุมให้อยู่ในยางซึ่งทำให้การขยายตัวของก๊าซลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ แสดงดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ [20]

สิ่งสำคัญในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber คือชนิดของสารให้ฟองโดย Sponge rubber จะใช้โซเดียมโบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารที่ให้ไนโตรเจน ส่วน Expanded rubber จะใช้สารที่ให้ไนโตรเจนเท่านั้น อุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองและอุณหภูมิการเชื่อมโยงจะต้องสมดุลกัน นอกจากนี้สภาวะการผสมก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งขึ้นกับ ชนิดของพอลิเมอร์ ความหนืดของพอลิเมอร์ ปริมาณสารทำให้นิม ปริมาณสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยง และชนิดสารให้ฟอง

## 2.8 คอมโพสิต (Composites)

โดยนิยาม คอมโพสิต คือวัสดุประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกันโดยเมื่อทั้งสองส่วนอยู่ด้วยกันแล้วทำให้เกิดสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ดีขึ้น โดยเฉพาะการทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นหรือเกิดการเสริมแรง (Reinforcing effect) องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิตมีดังนี้ [21]

1) ส่วนเสริมแรง (Reinforcement หรือ Reinforcing component) คือส่วนที่เป็นโครงสร้าง ที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ส่วนเสริมแรงจะเป็นส่วนเสริมแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงได้แก่ เส้นใย (Fibers) เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคพลาร์ (Kevlar® fiber) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว หรือเส้นใยสั้น นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่างๆ

2) เมตริกซ์ (Matrix) เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงและเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นส่วนยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียหายเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดุลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์

### 2.8.1 อินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ (Fiber-matrix interfaces)

อินเตอร์เฟซ (Interfaces) คือ เส้นรอยต่อ (Boundary) ที่เห็นแยกเด่นชัดระหว่างวัฏภาคหรือเฟส (Phase) ที่แตกต่างกัน เช่น เส้นใยกับเมตริกซ์ ลักษณะและสมบัติของอินเตอร์เฟซระหว่างเส้นใยและเมตริกซ์มีความสำคัญต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เนื่องจากในการใช้งานเมื่อวัสดุคอมโพสิตได้รับแรง เมตริกซ์จะทำหน้าที่ส่งผ่านแรง (Stress transfer) ที่ได้รับไปยังเส้นใยที่ทำหน้าที่รับแรง (Load bearing) ข้ามผ่านอินเตอร์เฟซ แสดงความสำคัญของความแข็งแรงของการยึดเกาะที่อินเตอร์เฟซ

### 2.8.2 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of adhesion)

ในวัสดุคอมโพสิต เมตริกซ์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยที่อินเตอร์เฟซได้หลายวิธี กลไกการยึดเกาะหลัก ๆ ที่อินเตอร์เฟซของวัสดุคอมโพสิตมี 5 กลไก ซึ่งอาจเกิดอย่างใดอย่างหนึ่งหรือเกิดร่วมกันดังนี้

1) การดูดซับและการเปียก (Adsorption and wetting) เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอจะเกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” เช่น การเปียกของเหลวบนพื้นผิวของแข็งในกรณีของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้ชิดกันมากถึงระดับจุลภาค (ไมครอน) หรือระดับอะตอม ความขรุขระของพื้นผิวจะเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถสัมผัสกันได้ ในกรณีของเหลวบนพื้นผิวของแข็งสามารถเกิดการเปียกได้ง่าย การเปียกจะเกิดได้มากหรือน้อยแสดงได้โดยใช้ “มุมสัมผัส” (Contact angle,  $\theta$ ) ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียกบนพื้นผิวของแข็งดี ของเหลวชอบที่สัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีมุมสัมผัส  $\theta$  น้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกต่ำ ของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับของแข็งเป็นผลให้มุมสัมผัส  $\theta$  มาก สมบัติการเปียกของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สามารถแสดงได้ในรูปสมการง่าย ๆ ของดูปรี (Dupre equation) แสดงการยึดเกาะ (Work of adhesion,  $W_a$ ) ของเหลวบนของแข็งดังนี้

$$W_a = Y_1 + Y_2 - Y_{12} \quad (2.1)$$

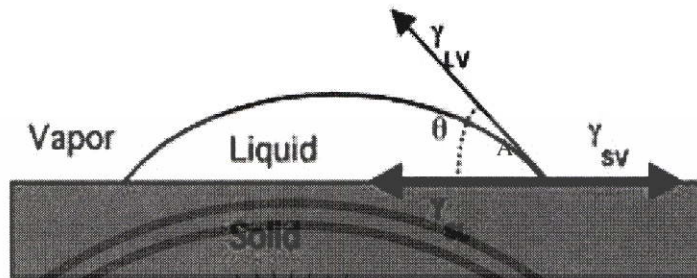
เมื่อ  $Y_1$  และ  $Y_2$  คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) ของของเหลวและของแข็งตามลำดับ  $Y_{12}$  คือ พลังงานพื้นผิวอิสระของอินเตอร์เฟซระหว่างของเหลวและของแข็ง สมการนี้สามารถโยงให้สัมพันธ์กับกรณีของหยดของเหลวบนผิวของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยใช้สมการของยัง (Young equation) ทำสมดุลกระทำที่จุด “A” ตามแนวระนาบ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Y_{sv} = Y_{sl} + Y_{lv}\cos\theta \quad (2.2)$$

เมื่อ  $Y_{sv}$ ,  $Y_{sl}$  และ  $Y_{lv}$  คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) หรือแรงตึงผิว (Surface tension) ของอินเตอร์เฟซระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซตามลำดับ และ  $\theta$  คือมุมสัมผัส พื้นผิวของแข็งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวได้ยาก ในขณะที่เราสามารถทำการทดลองวัดค่าแรงตึงผิวของเหลวได้ง่าย การหาค่าแรงตึงผิวพื้นของของแข็งสามารถทำได้โดยใช้ของเหลวที่ทราบค่าแรงตึงผิวเปียกบนผิวของแข็ง โดยมีการนิยามค่า “แรงตึงผิววิกฤต”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Critical surface tension,  $Y_c$ ) กล่าวคือของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิววิกฤตของของแข็ง ( $Y_{LV} < Y_c$ ) เท่านั้นที่สามารถเกิดการเปียกทันทีทันใด (Spontaneous wetting) ทำให้ค่า  $\theta = 0$  ค่าแรงตึงผิววิกฤตนี้จึงเป็นค่าที่สำคัญที่สามารถใช้ในการพิจารณาการเปียกของเรซินบนเส้นใยเสริมแรง



รูปที่ 2.8 มุมสัมผัส และแรงตึงผิวของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง [21]

ค่างานการยึดเกาะ ( $W_A$ ) แสดงหรือพันธะทางกายภาพที่เกิดเนื่องจากแรงกระจายตัวระหว่างโมเลกุล (Intermolecular dispersion forces) ที่สัมพันธ์กับและเกิดการเปียกหรือยึดเกาะกันตามทฤษฎีแรงยึดเกาะนี้มีความแข็งแรงสูงแต่ในทางปฏิบัติจะมีแรงเชิงกลนี้ต่ำเนื่องจาก

- พื้นผิวเส้นใยมีความสกปรก เกิดเป็นชั้นของสิ่งสกปรกที่มีค่าพลังงานพื้นผิวอิสระหรือแรงตึงผิวต่ำ
- ในขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตเกิดฟองอากาศของฟองก๊าซถูกขังอยู่บนพื้นผิวเส้นใยทำให้พื้นผิวสัมผัสน้อยลง
- เกิดการหดตัวของเรซินเมตริกซ์หลังการเชื่อมโยง ทำให้เกิดแรงเค้น (Stresses) และ เกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์

2) การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion) การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่ (Diffusion) เข้าหาซึ่งกันและกัน ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) ว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นกับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการพันกันเนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำละลาย (Solvent) ทาที่พื้นผิวหรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับเส้นที่มีการเคลือบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมตริกซ์ แต่ไม่เกิดกับคอมโพสิตที่มีพื้นผิวเส้นใยแข็ง ไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว ฯลฯ

3) แรงดึงดูดประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้ามีพื้นผิวหนึ่งมีประจุบวก (Net positive charge) และอีกพื้นผิวเป็นประจุลบ (Net negative charge) ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยากรด-เบส และพันธะไอออนิก ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ (Charge density) แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์จะไม่ใช่แรงยึดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์

ในคอมโพสิต แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น เช่น การยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทไซเลน (Silane coupling agent) ที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภทประจุบวก (Cationic function groups) มีการยึดติดที่ติดกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) บนพื้นผิวเป็นต้น

4) พันธะเคมี (Chemical bonding) เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญชนิดหนึ่ง เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิว และเมตริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะเคมีได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมตริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสถียรภาพของคอมโพสิตที่อินเตอร์เฟสจะเกี่ยวข้องกับการแตกหักของพันธะเคมีนี้ ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะเคมีได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบ (Coupling agent) กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใย และเมตริกซ์เป็นต้น

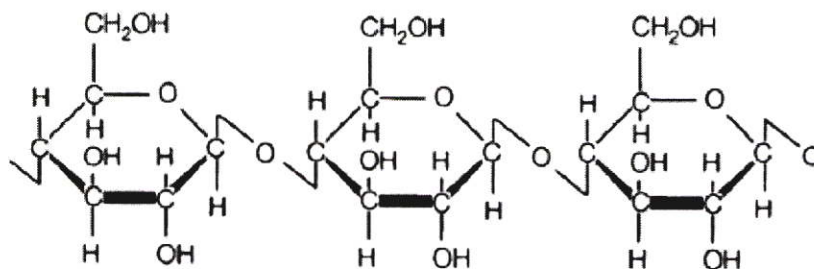
5) การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking) การยึดเกาะเชิงกลเกิดเมื่อในกระบวนการผลิตขึ้นรูปคอมโพสิต เรซินเมตริกซ์เปียกบนพื้นผิว เส้นใยในขณะที่เป็นของไหลสามารถที่จะแทรกตัวไปตามพื้นผิวขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอกร่องรู และช่องว่างอื่น ๆ บนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงทำให้เกิดการขัดตัวของเมตริกซ์ เป็นเหตุให้เมตริกซ์ถูก ล็อคแข็งติดอยู่กับพื้นผิวเส้นใย ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เกิดการแทรกตัวของเรซินรวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสามารถของเรซินในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวเส้นใย เช่น ความหนืดเรซิน พื้นผิวเส้นใยที่เรียบจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือไม่เกิดเลย

## 2.9 เส้นใยเสริมแรง

### 2.9.1 เส้นใยจากธรรมชาติ (Natural fibers)

เส้นใยธรรมชาติเป็นอินทรีย์วัสดุที่สำคัญหาได้ง่ายจากธรรมชาติมีปริมาณมาก และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ด้วยเหตุนี้เส้นใยธรรมชาติจึงสามารถใช้ เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์โดยอาจเป็นทั้งสารตัวเติมชนิดเสริมแรงและไม่เสริมแรงขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของเส้นใยที่นำมาใช้ โครงสร้างทั่วไปของเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนใหญ่องค์ประกอบที่เหลือเป็นเฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) และสารประกอบ อื่น ๆ [22]

เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ ๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืชส่วนมากพบรวมกับลิกนิน เพนโตแซน แทนนิน ไชมัน เซลลูโลสจะมีหน่วยโมเลกุลยาว และแข็งโดยเซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [22]

### 2.9.2 เส้นใยอะรามิด

เส้นใยอะรามิด (Aramid) คือ พอลิเอไมด์ ที่มีโครงสร้างแบบวงแหวน (Aromatic polyamide) โครงสร้างของเส้นใยอะรามิดแบ่งเป็น 2 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่ meta-aramid และ para-aramid ชื่อทางการค้าของเส้นใยอะรามิดที่มีโครงสร้างแบบเมตา (Meta-aramid) เช่น Nomex ผลิตโดยบริษัท Dupont ส่วนชื่อทางการค้าของเส้นใยอะรามิดที่มีโครงสร้างแบบพารา (Para-aramid) เช่น Kevlar ผลิตโดยบริษัท Dupont และ Twaron, Technora, Sulfron ผลิตโดยบริษัท Teijin Aramid



รูปที่ 2.10 ลักษณะโมเลกุลของพารา-อะรามิด (ซ้าย) เมตา-อะรามิด (ขวา) [22]

ความแข็งแรงของเส้นใยอะรามิดเป็นผลสืบเนื่องจากการที่พอลิเมอร์มีความ เป็นผลึก (Crystallinity) สูง ซึ่งความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ เกี่ยวข้องกับลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ของพอลิเมอร์ โดยหากโมเลกุลส่วนใหญ่ของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวสามารถยึดเป็น เส้นตรง ไม่พันกัน และจัดเรียงตัวได้เป็นระเบียบแล้ว ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ก็จะสูง แต่ขณะเดียวกันความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ที่มากก็มีผลให้พอลิเมอร์แสดง สมบัติแข็ง แต่เปราะ (Brittle)

### 2.9.3 เส้นใยไนลอน

ไนลอน (Nylons) ไนลอนหรือพอลิเอไมด์ (Polyamide) คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดแรก ของโลก ปัจจุบันไนลอนมีหลายชนิดแต่ที่มีความสำคัญในด้านสิ่งทอคือไนลอน 66 ไนลอน 6 และ ไซคลิกไนลอน ไนลอนเป็นเส้นใยที่มีโมเลกุลยาว และเป็นสายตรงของ Polyamide โพลิเมอร์ที่จะทำ เป็น เส้นใยได้จะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 12,000-20,000 ถ้าต่ำกว่า 6,000 จะทำเป็นเส้นไม่ได้ เพราะ เส้นใยจะเปราะแต่ถ้าสูงกว่า 20,000 ก็จะไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็น

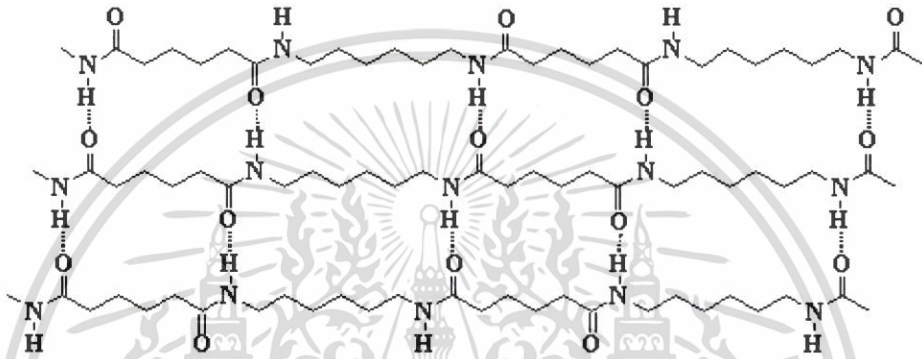
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใย จากโครงสร้างของไนลอนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้เส้นใยไนลอนมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังรูปที่ 2.11

สมบัติของเส้นใยไนลอน ดังนี้

1) รูปร่างและโครงสร้างทางเคมี ไนลอนจึงมีคุณสมบัติดูดความชื้นได้แต่ค่อนข้างต่ำ การเรียงตัวของพอลิเมอร์ค่อนข้างเป็นระเบียบ แต่เนื่องจากพอลิเมอร์จัดเรียงตัวแบบฟันเลื่อย จึงทำให้ไนลอนมีสมบัติยืดหยุ่นที่ดี ความทนทานต่อการเสียดสีค่อนข้างดี

2) สมบัติทางกายภาพ ความเหนียว 4.6-5.8 กรัม/เดนิเยอร์ เมื่อเปียกความเหนียวจะลดลงเป็น 4.1-5.1 กรัม/เดนิเยอร์



รูปที่ 2.11 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ Nylon 6,6 [22]

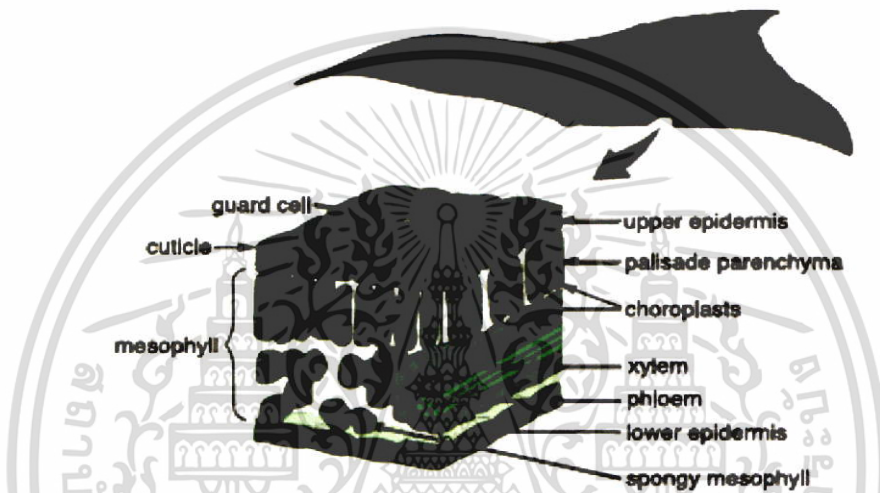
## 2.10 การใช้น้ำของพืช

ปริมาณการใช้น้ำของพืชเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียจากพื้นที่เพาะปลูกสู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำ จากกระบวนการที่สำคัญคือ การคายน้ำของพืช และการระเหย การคายน้ำของพืชเป็นการที่พืชดูดน้ำไปจากดินเข้าสู่ลำต้นไปสู่ใบ และสูญเสียไปในบรรยากาศในรูปของไอน้ำทางรูเปิดปากใบ โดยเซลล์ใบของพืชบริเวณรูเปิดปากใบอยู่ติดกับท่อลำเลียงน้ำ [23] ดังรูปที่ 2.12 เมื่อน้ำจากเซลล์ใบถูกคายออกไป ทำให้เซลล์ใบเหี่ยวและมีแรงดูดน้ำจากท่อลำเลียงน้ำมากขึ้น เป็นผลให้น้ำเคลื่อนย้ายจากลำต้นเข้าสู่ใบ เมื่อน้ำในลำต้นน้อย ทำให้รากพืชต้องดูดน้ำจากดินเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าดินมีความชื้นอย่างเพียงพออยู่ตลอดเวลา อัตราที่พืชดูดน้ำจากดินจะขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำ (Transpiration rate) แต่ถ้าความชื้นในดินลดลงจนไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช อัตราการคายน้ำก็จะขึ้นอยู่กับอัตราที่พืชดูดน้ำได้จากดิน การคายน้ำของพืชเป็นการระเหยของน้ำในช่องอากาศระหว่างเซลล์ของใบ (Intercellular space) และแพร่กระจาย (Diffuse) ออกจากรูเปิดปากใบสู่บรรยากาศช่องอากาศในใบจะมีไอน้ำอยู่เกือบอิ่มตัว การคายน้ำของพืชจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของไอน้ำในใบกับบริเวณรอบ ๆ ใบ ดังนั้นถ้าอากาศแห้ง หรือความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ไอน้ำในบรรยากาศมีน้อย พืชก็ยิ่งมีการคายน้ำมากขึ้น และเมื่อใบของพืชได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ จะทำให้ใบมีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศที่อยู่รอบ ๆ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้ง 2 บริเวณนี้ อาจจะมีมากถึง 3-6 °C เมื่ออุณหภูมิของบรรยากาศสูงขึ้นทำให้ความชื้นที่จุดอิ่มตัวสูงขึ้น ดังนั้นใบพืชซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีความเข้มข้นของไอน้ำในช่องอากาศในใบมากกว่าบริเวณรอบ ๆ ซึ่งทำให้การแพร่กระจายของไอน้ำจากรูเปิดปากใบสูงขึ้นและพืชจะมีการคายน้ำเพิ่มขึ้น การคายน้ำ

ของพืชเมื่อเกิดขึ้นติดต่อกันทำให้ไอน้ำในบรรยากาศรอบ ๆ ต้นพืชมีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นผลให้

ไม่อาจระเหยได้ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการคายน้ำลดลง แต่ถ้าหากมีลมพัดมาพัดพาไอน้ำรอบ ๆ ต้นพืชไป อัตราการคายน้ำของพืชก็จะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระดับความชื้นในดินลดลง หรืออัตราการคายน้ำของพืชสูงกว่าอัตราที่พืชดูดน้ำได้จากดิน พืชก็จะเหี่ยว รูเปิดปากใบจะปิด การคายน้ำของพืชจะลดลงหรือหยุดการคายน้ำ กลไกดังกล่าวเป็นการป้องกันไม่ให้พืชต้องได้รับความเสียหายมาก เพราะการที่พืชไม่มีการคายน้ำจะทำให้เซลล์เหี่ยว และลดการสังเคราะห์แสงลง เป็นผลให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง ดังนั้นในทางปฏิบัติดูแลรักษาพืชปลูก จึงมีทางป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายแก่พืช โดยพยายามจัดให้พืชนั้นมีน้ำใช้อย่างพอเพียงตลอดเวลา และทำให้ดินมีคุณสมบัติที่จะทำให้อากาศสามารถแพร่กระจายออกไปได้อย่างกว้างขวางและลึก ซึ่งจะทำให้พืชดูดน้ำไปใช้อย่างเพียงพออยู่ตลอดเวลา



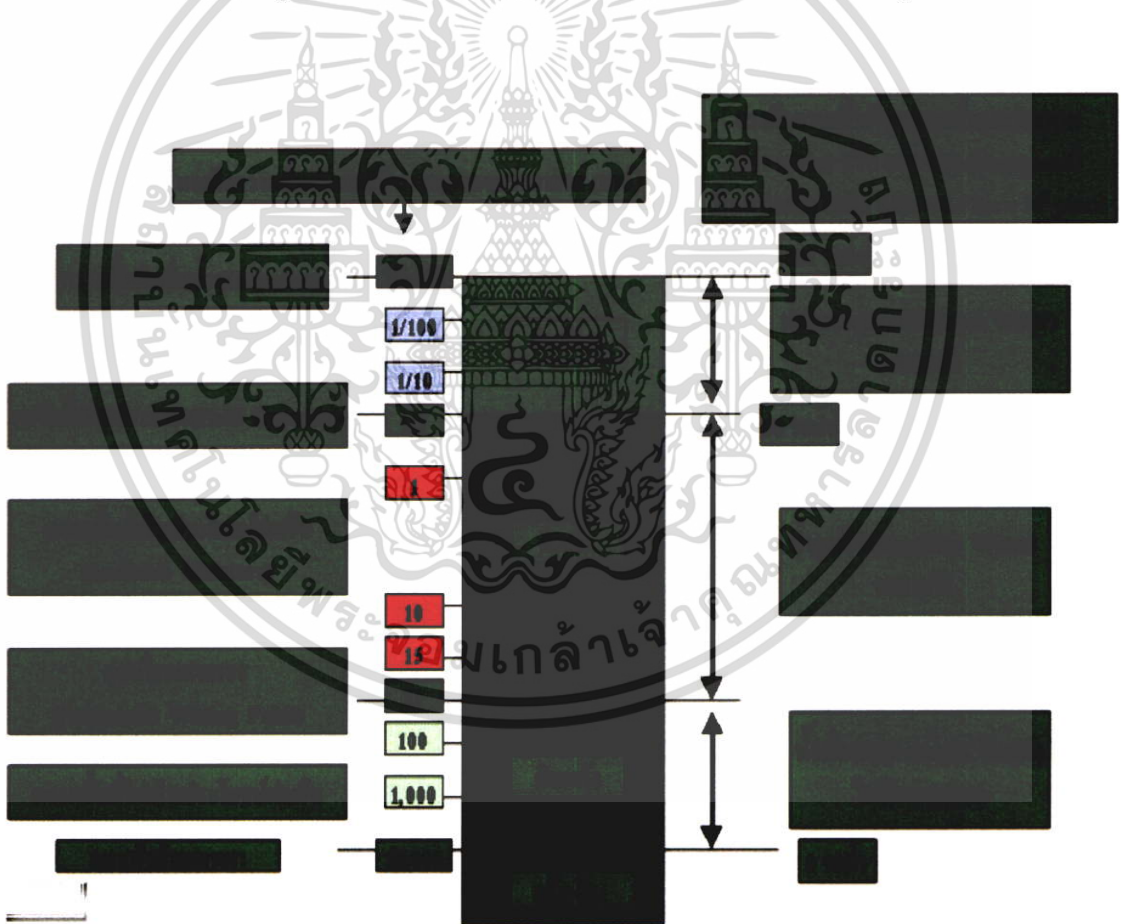
รูปที่ 2.12 เซลล์ใบของพืชที่มีรูเปิดปากใบ [23]

การระเหยน้ำ เป็นการแพร่กระจาย ของน้ำในรูปของไอน้ำจากผิวดินสู่บรรยากาศ อัตราการระเหยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวดินที่มีการระเหย ความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ลม แสงแดด ความเร็วของลมและความกดดันของบรรยากาศ ฯลฯ นอกจากนั้นการเกษตรกรรม เช่น วิธีการให้น้ำ การจัดการดิน หรือวิธีการเพาะปลูกพืชล้วนมีผลต่อการระเหยน้ำ การให้น้ำแก่พืชครั้งละน้อย ๆ แต่ให้บ่อยครั้งจะทำให้มีการสูญเสียน้ำโดยการระเหยมากขึ้น ถ้าหากให้น้ำแก่พืชในปริมาณเท่ากัน แต่ให้น้อยครั้งลงจะช่วยลดการระเหยได้มาก เพราะผิวดินมีการเปียกน้อยครั้ง และน้ำซึมลงไปเก็บไว้ในดินได้ลึกกว่า ซึ่งเป็นผลให้น้ำที่พืชจะดูดไปใช้ได้มากกว่า การให้น้ำแก่พืชโดยวิธีให้น้ำท่วมผิวดิน โอกาสการระเหยน้ำจากผิวดินและผิวน้ำโดยตรงเกิดขึ้นได้มาก ส่วนการให้น้ำแบบฉีดฝอย ซึ่งมีระยะเวลาการให้น้ำยาวนาน จะมีการสูญเสียน้ำเนื่องจากการระเหยมากกว่าการให้น้ำแบบอื่น อย่างไรก็ตามการระเหยจากผิวดินผิวน้ำและจากที่เกาะอยู่ตามใบและต้นพืช ก่อให้เกิดประโยชน์กับพืชโดยการที่พลังงานความร้อนส่วนนั้นไม่ถูกใช้ไปในการทำให้เกิดการคายน้ำของพืชเพิ่มขึ้น ในพื้นที่ที่ปลูกพืชต้นชิดกัน เช่น พวกข้าว หรือหญ้าเลี้ยงสัตว์ การระเหยน้ำจากผิวดินจะลดลง ทั้งนี้เพราะนอกจากพืชจะใช้ความชื้นในดินไปในการคายน้ำเป็นจำนวนมากแล้ว ใบของพืชยังปกคลุมมิให้แดดส่องไปถึงผิวดิน และความหนาแน่นของต้นพืชจะช่วยป้องกันมิให้ลมพัดพาเอาอากาศรอบต้นพืชซึ่งมีไอน้ำมากไปจากพื้นที่เพาะปลูกอย่างรวดเร็วอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างดินและน้ำ

ดินประกอบด้วยสสาร 3 สถานะ คือของแข็งทั้งอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุ ของเหลวซึ่งส่วนใหญ่คือน้ำ และแก๊ส [24] เนื้อดินและโครงสร้างของดินจะกำหนดขนาดช่องว่างของเม็ดดินให้เป็นที่อยู่ของน้ำและแก๊ส ดินที่มีเนื้อหยาบ เช่นดินทรายมีคุณสมบัติให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย แต่อุ่มน้ำไว้ได้น้อย ในทางตรงกันข้ามดินเนื้อละเอียดเช่นดินเหนียว มีคุณสมบัติให้น้ำซึมผ่านได้ยากจึงอุ้มน้ำไว้ได้มาก ทั้งดินเนื้อหยาบและละเอียดเกินไป จึงมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำและระบายน้ำไม่เหมาะสมตามความต้องการของพืช ดินที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชและสามารถจัดการชลประทานได้เหมาะสมควรเป็นดินเนื้อปานกลางที่สามารถเก็บกักและระบายน้ำได้ดี ช่วยให้น้ำที่ถูกส่งเข้ามายังบริเวณรากพืชจะถูกดูดยึดเก็บกักเอาไว้ใช้ได้มากและหากน้ำมากเกินความต้องการดินก็สามารถระบายออกไปได้ดี น้ำในดินหรือความชื้นที่พืชดูดไปใช้ได้ (Available moisture) เป็นน้ำดูดซึม (Capillary water) ตั้งแต่ระดับความชื้นชลประทาน (Field capacity) คือความชื้นในดินหลังจากน้ำอิสระถูก ระบายออกไปแล้ว จนถึงความชื้นที่จุดเหี่ยวถาวร (Permanent wilting point) คือความชื้นในดินที่มีน้อยจนกระทั่งพืชไม่สามารถดูดมาใช้ทดแทนการคายน้ำจนพืชเหี่ยวเฉาอย่างถาวร ดังรูปที่ 2.13



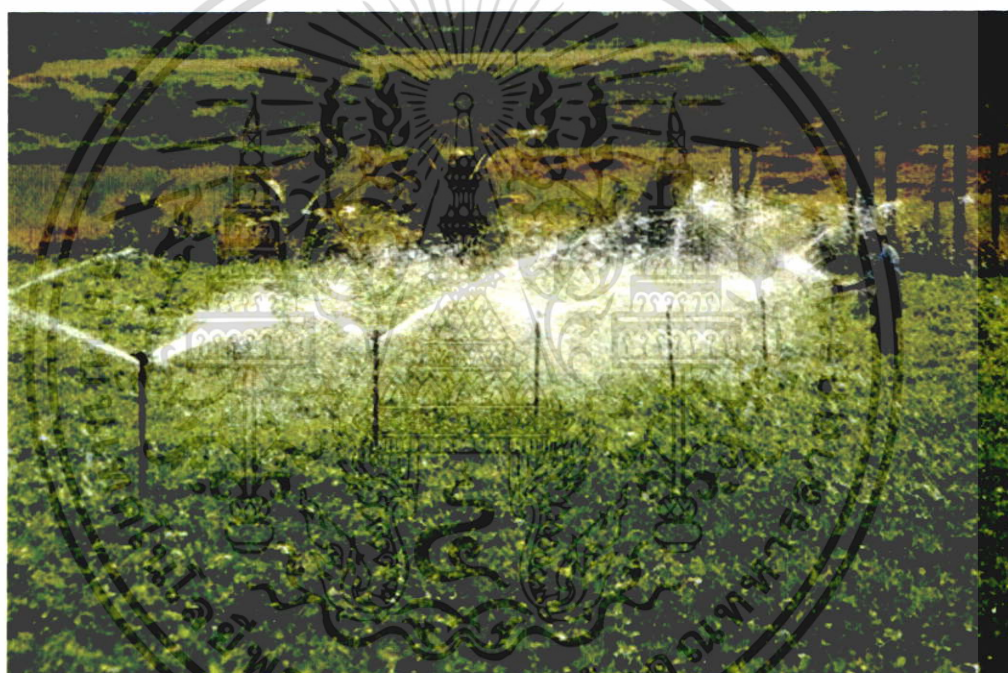
รูปที่ 2.13 การจำแนกความชื้นในดินและความชื้นที่พืชนำไปใช้ได้และไม่ได้ [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 เทคนิคการให้น้ำพืชของเกษตรกร

### 2.12.1 ระบบน้ำต้น

การให้น้ำแบบชนิดมีแรงดันน้ำสูงเพื่อให้เกิดการไหลของน้ำออกจากท่อไปสู่พืชเป็นวิธีที่ต้องมีการใช้เครื่องจักรในการสูบน้ำเข้ามาเพิ่มแรงดันให้กับการรดน้ำทางการเกษตรตลอดเวลา การให้น้ำพืชวิธีนี้ต้องมีการลงทุนสูงในการซื้อเครื่องจักร รวมถึงน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับเครื่องจักรและอุปกรณ์ท่อที่สามารทนแรงดันน้ำได้วิธีที่เกษตรกรนิยมคือ การให้น้ำแบบฉีดฝอย (Sprinkler irrigation) การให้น้ำโดยการฉีดน้ำออกจากหัวขึ้นไปบนอากาศแล้วให้เมล็ดน้ำ ตกลงมาบนแปลงเพาะปลูก โดยมีรูปทรงการแผ่กระจายของเมล็ดน้ำสม่ำเสมอ โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับฝน บางครั้งเรียกว่า การให้น้ำแบบฝนโปรย ดังรูปที่ 2.14 วิธีการให้น้ำชนิดนี้เป็นการให้น้ำทั่วบริเวณรวมถึงศัตรูพืชรอบต้นไม้ที่เราปลูกเป็นวิธีที่ต้องดูแลในเรื่องของศัตรูพืชรอบข้างมากเป็นพิเศษ [25]



รูปที่ 2.14 การให้น้ำแบบฉีดฝอย (Sprinkler irrigation) [25]

#### ความเหมาะสม

- เหมาะกับพืชทุกชนิด ยกเว้น ข้าว
- เหมาะกับดินทุกชนิดที่มีอัตราการดูดซึ่ม สูงกว่า อัตราที่ทำการให้น้ำ
- เหมาะพิเศษสำหรับดินทรายที่มีการดูดซึ่มสูง
- พื้นที่ลาดชัน ไม่สม่ำเสมอ ปรับพื้นที่ไม่ได้

#### ลักษณะที่สำคัญ

- ให้อายุยาปราบศัตรูพืช ยารักษาโรคพร้อมให้น้ำได้
- ป้องกันความเสียหายของพืชที่เกิดจากความเย็นและความร้อน
- ใช้แรงงานน้อยกว่าวิธีอื่น

เอกสารนี้ **ข้อจำกัด** การที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสลมที่พัดจะทำให้ฝอยน้ำที่พ่นออกมาไม่สม่ำเสมอ
- น้ำจะต้องสะอาด มีระบบกรองอย่างดี
- ต้องใช้น้ำในปริมาณมากในการให้น้ำพืช
- เป็นระบบน้ำต้นต้องใช้เครื่องสูบน้ำเพิ่มแรงดันให้เกิดฝอยน้ำออกมาในการให้น้ำต้นไม้

### 2.12.2 ระบบน้ำหยด (Drip irrigation)

ระบบน้ำหยดเป็นการให้น้ำกับพืชที่ละน้อย ๆ ความดันน้ำต่ำน้ำในท่อหรืออุปกรณ์การให้น้ำจะไหลออกมาอย่างช้า ๆ การให้น้ำด้วยวิธีนี้จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบน้ำเพื่อเพิ่มแรงดันแค่เพียงให้น้ำอยู่สูงกว่าอุปกรณ์การให้น้ำเพื่อใช้แรงดึงดูดของโลกให้น้ำไหลลงมาสู่พื้นที่ต่ำก็เพียงพอต่อการใช้งานด้วยวิธีนี้

#### 2.12.2.1 ท่อน้ำหยด (Drip pipe)

การให้น้ำแก่พืชที่จุดใดจุดหนึ่งหรือหลาย ๆ จุดบนผิวดินหรือในเขตรากพืช โดยอัตราการให้น้ำนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ดินในเขตรากเปียกชุ่มเป็นบริเวณกว้าง แต่จะทำให้ดินมีแรงดึงความชื้นต่ำอยู่ ดังรูปที่ 2.15 เป็นวิธีที่ต้องดูแลในเรื่องของการอุดตันของหัวให้น้ำหยดเป็นพิเศษถ้าเกิดการอุดตันแล้วขาดการดูแลพืชบริเวณนั้นอาจตายได้

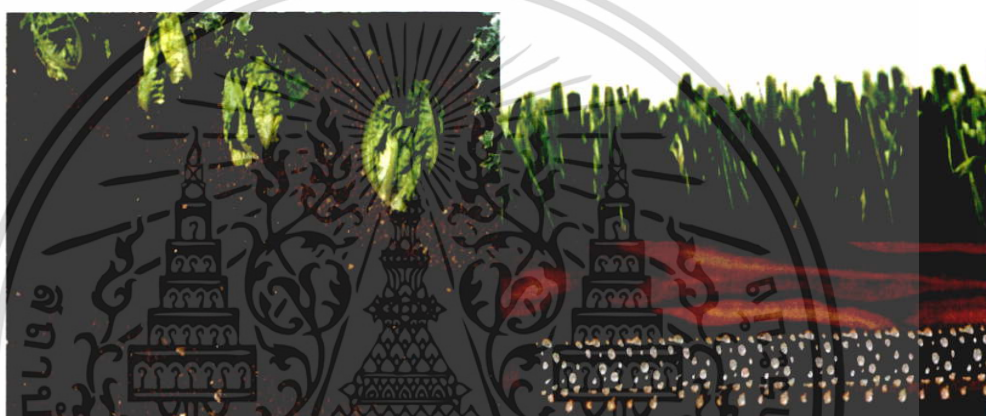


รูปที่ 2.15 การให้น้ำพืชด้วยท่อน้ำหยด (Drip pipe) [24]

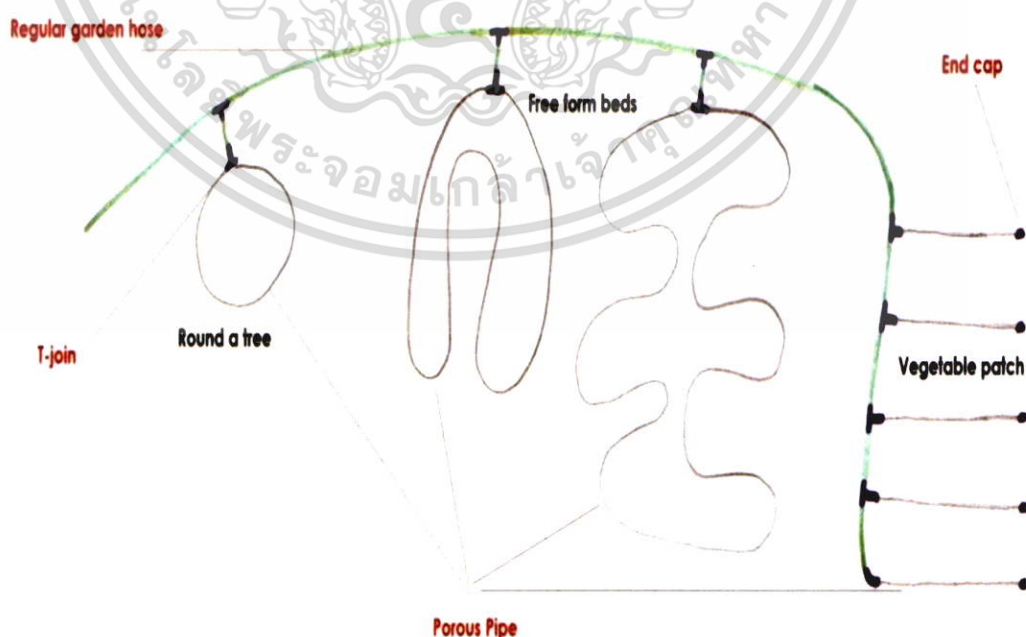
#### 2.12.2.2 ท่อน้ำซึม (Porous pipe)

ท่อน้ำซึม คือ ท่อที่มีลักษณะเป็นรูพรุนรอบท่อโดยมีผงยางรถยนต์เป็นองค์ประกอบหลักแล้วใช้ยางหรือพลาสติกทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือกาวให้เข้ากันกับผงยางรถยนต์และใช้สารให้ฟอง (Blowing agent) เป็นสารที่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผงยางรถยนต์ทำให้มีโครงสร้างของท่อน้ำซึมเป็นเซลล์เปิด ท่อน้ำซึมเมื่อมีน้ำไหลผ่านน้ำจะค่อย ๆ ซึมออกจากท่อเป็นหยดน้ำเป็นวิธีการให้น้ำคล้ายระบบน้ำหยดแต่มีการไหลของน้ำในบริเวณที่กว้างกว่าระบบน้ำหยด วิธีนี้เป็นการให้น้ำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบไหลอย่างช้า ๆ เพียงแค่น้ำอยู่ที่สูงไหลลงสู่ที่ต่ำโดยใช้แรงโน้มถ่วงโลกก็เพียงพอต่อการใช้งาน จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องสูบน้ำเพิ่มแรงดันในวิธีนี้ เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุน ค่าเครื่องสูบน้ำ และเชื้อเพลิง ท่อน้ำซึมสามารถใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน ดังรูปที่ 2.16 ปริมาณของน้ำสามารถควบคุมให้พอเหมาะในการให้แรงดันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้น้ำของพืชได้ทั้งนี้ยังสามารถออกแบบการวางท่อน้ำในแบบต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.17 ข้อดีของวิธีนี้การให้น้ำของท่อน้ำซึมเมื่อเทียบกับระบบน้ำต้นคือ ประหยัดน้ำและพลังงานเชื้อเพลิงกว่า และสามารถดูแลได้ง่ายม้วนเก็บได้สะดวกเป็นการให้น้ำเฉพาะบริเวณที่ต้องการศัตรูพืชจะน้อยกว่าระบบน้ำต้น แต่เมื่อเทียบกับระบบน้ำหยดท่อน้ำซึมใช้ปริมาณน้ำมากกว่าเพียงเล็กน้อยแต่สามารถให้ความชื้นในดินได้มากกว่ามีบริเวณของการให้น้ำได้มากจึงสามารถปลูกพืชรอบ ๆ ได้มากขึ้นและอีกทั้งยังสามารถใช้งานในพื้นที่บริเวณกว้าง เช่น สนามกอล์ฟ สนามหญ้า แสดงดังรูปที่ 2.18

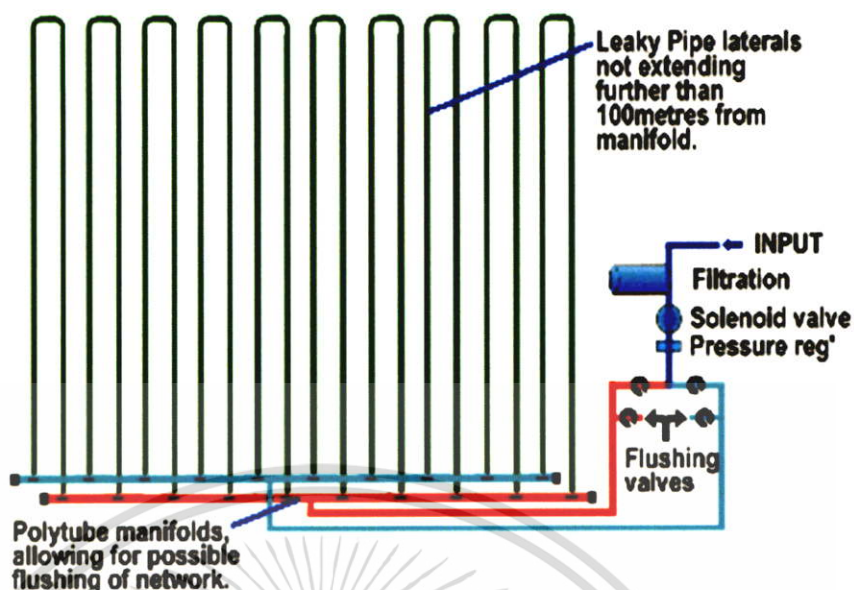


รูปที่ 2.16 การใช้งานท่อน้ำซึมบนดิน (ขวา) และ การใช้งานท่อน้ำซึมใต้ดิน (ซ้าย) [5]



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการใช้งานท่อน้ำซึมในการให้น้ำกับพืช [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 รูปแบบการใช้งานท่อน้ำซึมในพื้นที่บริเวณกว้าง เช่น สนามกอล์ฟ สนามหญ้า [5]

### 2.13 ท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า

Leaky pipe systems [26] ผลิตท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมคุณภาพสูง ใช้ในการให้น้ำพืชโดยมีน้ำซึมออกมารอบ ๆ ท่อน้ำซึมถูกนำมาใช้ในการให้น้ำในด้านการเกษตร สวนหย่อม การทำงานของท่อน้ำซึมเป็นการให้น้ำทีละน้อย ๆ ที่ความดันต่ำต่อกันจากก๊อกน้ำหรือถังน้ำที่ถูกวางไว้บนที่สูง สามารถให้น้ำโดยไม่จำกัดพื้นที่แต่ขึ้นกับความแรงของแหล่งน้ำที่ใช้ความดันที่ใช้ในการให้น้ำประมาณ 1-2 bar ต่อปริมาณน้ำที่ออกมา 1-4 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง รายละเอียดของท่อแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1 การทำงานของท่อน้ำซึมใช้ได้ยาวนานถึง 10 ปี

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky pipe systems [26]

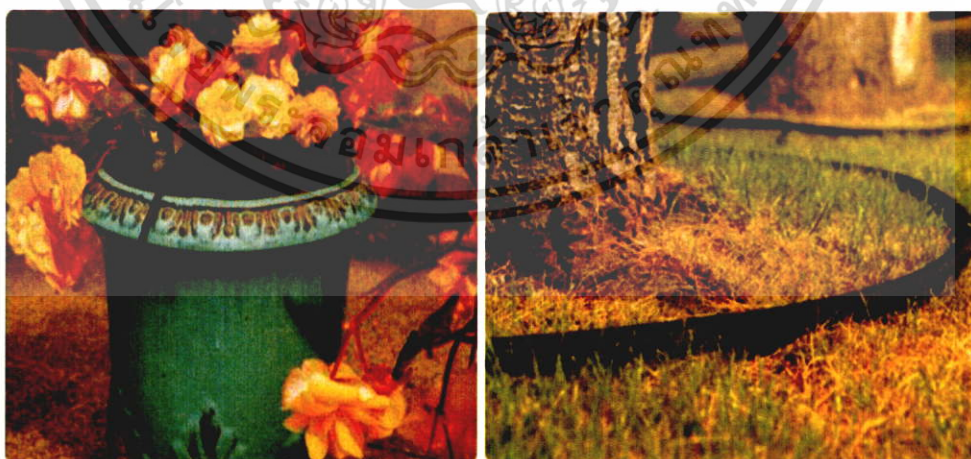
ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอก (มิลลิเมตร)	ความยาวท่อสูงสุดในการใช้งาน	ลักษณะการใช้งาน
LP12UH	9,14	20	ใช้สำหรับให้น้ำบนดิน ได้การให้น้ำในกระถางหรือภาชนะสวนยาง ชาและกาแฟ เป็นท่อที่มีความต้านทานต่อการท่อหุ้มของเกลือและอุณหภูมิสูง
LP12L	9,14	100	ใช้งานบริเวณใต้ดิน รื้อต้นไม้เตี้ย ๆ ที่มีการคดเคี้ยว สนามหญ้า บริเวณที่เป็นเนิน
LP12H	9,14	50	ใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน โดยทั่วไปใช้กับสวนหย่อม สามารถใช้ได้ทั้งโครงการใหญ่และเล็ก

บริษัท กสิพันธ์รัตน์ จำกัด [27] ผลิตท่อน้ำซึมเพื่อใช้ในการเกษตร และสวนหย่อม ให้น้ำอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ น้ำจะกระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของรากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่สิ้นเปลืองน้ำ ประหยัดน้ำมีความยืดหยุ่น สามารถปรับวางให้เหมาะสมกับลักษณะส่วนต่าง ๆ ได้อย่างลงตัว ท่อน้ำซึมมีขนาด 0.5 นิ้ว ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท กสิพันธ์รัตน์ จำกัด [27]

LBS global company [28] ผลิตท่อน้ำซึม 13 มิลลิเมตร เพื่อใช้งานในการเกษตรหรือสวนหย่อม ใช้ความดันน้ำในการใช้งานประมาณ 0.5 bar สามารถใช้ท่อน้ำซึมได้ยาวสุดถึง 50 เมตร ปริมาณน้ำที่ไหล 2-6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง และท่อขนาดเล็กสำหรับพืชขนาดเล็ก ท่อมีขนาด 5 มิลลิเมตร ความดันในการใช้งาน 1 bar ต่อปริมาณน้ำ 1-3 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึมแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม LBS global company ท่อน้ำซึมขนาด 5 มิลลิเมตร (รูปซ้าย) ท่อน้ำซึมขนาด 13 มิลลิเมตร (รูปขวา) [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลความดันในการใช้งาน ปริมาณน้ำ และราคาท่อน้ำซีเมนต์ที่ผลิตในเชิงการค้า

บริษัท	ความดัน (bar)	ปริมาณน้ำ (litre/metre/hour)	บาท/เมตร
LBS global company	0.5-1	2-6	41
บริษัท กสิพันธ์รัตน์ จำกัด	-	-	52
Leaky pipe	1-1.5	1-4	69

## 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุมนา แจ่มเหมือน [7] ศึกษาท่อน้ำซีเมนต์จาก NR โดยใช้ GRT เป็นองค์ประกอบหลักและใช้สารไดไนโตรโซเพนตะเมทิลินเตตระมีน (N,N'-Dinitroso-pentamethylene tetramine, DNPT) เป็นสารให้ฟองและยูเรียเป็นคิกเกอร์ทำการผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดเกลียวหอนเดี่ยว โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อท่อน้ำซีเมนต์ อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง ปริมาณเขม่าดำ ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรถยนต์ ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์และความยาวท่อน้ำซีเมนต์ จากการศึกษาอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อน (Hot air oven) 150°C และ 160°C พบว่าอุณหภูมิ 160°C ที่เวลา 20 นาที เป็นอุณหภูมิการเชื่อมโยงที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำพบว่าสมบัติบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่งที่ปริมาณเขม่าดำ 50 phr จากนั้นสมบัติเหล่านั้นมีค่าลดลง แต่ค่าความหนืดมูนี้ มอดูลัส ความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณเขม่าดำส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นและมีอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง เนื่องจากสารให้ฟองเกิดการสลายตัวแล้วเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กลงเพราะมีความหนืดที่เพิ่มจากการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้นพบว่าสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงและเมื่อใช้ผงยางรถยนต์ขนาดอนุภาคเล็กลงสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มสูงขึ้นและอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง จากการศึกษาความยาวของท่อน้ำซีเมนต์เมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้นอัตราการซึมของน้ำแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษาพบว่าท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:Carbon black ในอัตราส่วน 40:60:3:50 มีสมบัติเชิงกลที่ดี อัตราการซึมผ่านของน้ำเหมาะสมกับการให้น้ำทางการเกษตร

วศิน จีรไพศาลกุล และคณะ [8] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซีเมนต์จาก RR โดยใช้ GRT 30 เมช และสารให้ฟอง DNPT และยูเรียเป็นสารกระตุ้น ผสมโดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้ง และขึ้นรูปท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนเดี่ยว และเชื่อมโยงท่อด้วยเตาอบลมร้อนร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำและปริมาณสารให้ฟอง จากการศึกษาปริมาณเขม่าดำรวมพบว่า ปริมาณที่เหมาะสม คือ 70 phr จากเดิมที่ยางรีเคลมมีเขม่าดำอยู่แล้ว 50 phr พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด อย่างไรก็ตามปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไปส่งผลให้มีค่าสมบัติเชิงกลที่ต่ำ เนื่องจากเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีของเขม่าดำ และเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อสารให้ฟองสลายตัวเกิดเป็นก๊าซแทรกระหว่างกลุ่มก้อนเขม่าดำ ส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก จากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองพบว่าปริมาณสารให้ฟอง DNPT ร้อยละที่เหมาะสมคือ 3 ต่อเวลาการเชื่อมโยงท่อ 20 นาที ให้ค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์ และคณะ [29] ศึกษาสมบัติของท่อน้ำซึมเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์การให้น้ำทางการเกษตร ทำจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และผงยางรถยนต์ (GRT) ใช้สารให้ฟองเอโซโดคาร์โบนาไมด์ (AZ) โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อท่อน้ำซึม ได้แก่ อัตราส่วน GRT:LDPE และปริมาณสารให้ฟอง ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวแล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบชนิดอัด พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ GRT และ AZ มีแนวโน้มทำให้ความหนาแน่นลดลงและมีอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น แต่ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุพบว่า การเพิ่ม GRT ไม่มีผลต่อการทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิตกผลึกเปลี่ยนแปลง แต่มีผลทำให้ปริมาณองศาความเป็นผลึกลดลง จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพพบว่า LDPE และ GRT สามารถยึดเกาะกันได้ดี และรูพรุนที่เกิดภายในท่อน้ำซึมเกิดระหว่างก้อนผงยางและสารให้ฟองที่สลายออกไป

สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล [30] ศึกษาสมบัติของท่อน้ำซึมที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และผงยางรถยนต์ โดยใช้สารให้ฟองเอโซโดคาร์โบนาไมด์ (AZ) สภาวะขึ้นรูปที่เหมาะสมใช้เวลา 5 นาที อุณหภูมิที่ใช้ 230°C จากการศึกษาเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง อัตราส่วน GRT:HDPE ที่เหมาะสมของท่อน้ำซึมคือ 60:40 เมื่อสารให้ฟอง (AZ) เพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง มอดูลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น แต่จะทำให้สมบัติบางประการเพิ่มขึ้นเช่น ร้อยละการยืด ณ จุดขาดและอัตราการซึมผ่านของน้ำ และเมื่ออุณหภูมิผงยางรถยนต์มีขนาดเล็กลง พบว่าสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่มีอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า GRT และ HDPE สามารถผสมเข้ากันได้ดี มีลักษณะเป็นรูพรุนเนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดการสลายตัวของสารให้ฟอง AZ และช่องว่างระหว่างอนุภาค GRT อัตราการซึมผ่านของน้ำ 24-25 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร

สมบัติ ธนวัน และคณะ [31] ศึกษาเปรียบเทียบยางธรรมชาติและยางอะครีโลไนไตรล์โดยใช้เส้นใยอะรามิตและเขม่าดำในการเสริมแรง โดยเส้นใยอะรามิตที่ใช้มีความยาว 1.5 มิลลิเมตร โดยเตรียมเป็นมาสเตอร์แบทช์ (Master batches) 40 %wt ปริมาณเส้นใยที่ใช้ศึกษา 2, 5, และ 10 phr พบว่า ชิ้นงานตามแนวเครื่องจักรมีความเค้นมากกว่าชิ้นงานที่ทดสอบตามแนวขวางเครื่องจักร และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยอะรามิตพบว่ากราฟมีความชันของค่าความเค้นเพิ่มขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าต่ำลง และความชันของกราฟความเค้นสูงสุดของยางอะครีโลไนไตรล์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิตมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติเสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิตเนื่องจากความเป็นขั้วของยางอะครีโลไนไตรล์ที่มีมากกว่ายางธรรมชาติ จากการศึกษาปริมาณเขม่าดำและเส้นใยอะรามิต พบว่าเมื่อมีปริมาณเส้นใยอะรามิตต่ำความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำความเครียด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นและความเค้นที่เพิ่มขึ้นนั้นเนื่องจากการเพิ่มเขม่าดำในยางทำให้ยางมีความแข็งแรงและกระจายแรงที่ได้รับจากเส้นใยได้ดีขึ้น

จุฑาทิพย์ ตรีทศรัตน์ และคณะ [32] ศึกษาเส้นใยเคฟลาร์และเส้นใยสับปะรดเป็นสารเสริมแรงในยางถอนขนไก่ จากการใช้เส้นใยเคฟลาร์มาสเตอร์แบทช์ (40% w/w) ปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 phr พบว่ามีแนวโน้มค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างวัฏภาคยางกับเส้นใยอาจไม่ดี เพราะเส้นใยเคฟลาร์มีขั้วแต่ยางไม่มีขั้ว อาจทำให้เกิดจุดบกพร่องได้ (Defects) ระหว่างวัฏภาค แต่ทั้งนี้ค่าความแข็งกดและค่ามอดูลัสของยางที่ 10 และ 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่ามอดูลัสของยางที่ 10 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นถึง 12 เท่า จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนที่ 8 phr จึงมีการศึกษาสารช่วยเอกสารเป็นเอกสารที่สังวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่นับญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายตัว 2 ชนิดคือ Ultralube และ Struktol พบว่าไม่ได้ส่งผลให้สมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ทั้งนี้ อาจเพราะสารช่วยกระจายตัวไม่สามารถแทรกเข้าไปในเส้นใยได้หรือสารช่วยกระจายตัวมีจุด หลอมเหลวที่สูงเกินไปทำให้ไม่สามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลเล็กพอจึงไม่สามารถแทรกเข้าไปใน โครงสร้างเส้นใย เนื่องจากเส้นใยเคพลาร์มีโครงสร้างเป็นเอไมด์ซึ่งมีพันธะไฮโดรเจนเป็นจำนวนมากจึง ทำให้สารช่วยกระจายตัวแทรกเข้าไปได้ยาก

T.D. Sreeja และคณะ [33] ศึกษาพฤติกรรมกรรมการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ ผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม โดยมีเส้นใยไนลอนเป็นสารเสริมแรง ปริมาณเส้นใยที่ใช้ใน การศึกษา 10 20 และ 30 phr พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยง ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สมบัติเชิงกล ความแข็งแรงดึงตามแนวเครื่องจักรมีค่าสูงกว่าค่าแนวขวาง เครื่องจักร ส่วนค่าความแข็งแรงฉีกขาด และการยืดตัว ณ จุดขาด ในแนวขวางเครื่องจักรมีค่าสูงกว่า แนวเครื่องจักร ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีการถ่ายเทแรง

อุกฤษฏ์ วิสิฐธนวรรธ และคณะ [34] ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยจากไบสับปะรดและสารคู่ ควบ (Coupling agent) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างยางไนไตรล์และเส้นใยจากไบ สับปะรดชนิดเส้นใยสั้นที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยทำการใส่ปริมาณเส้นใยจากไบสับปะรด 0, 10, และ 30 phr ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง และการเติมสารคู่ควบที่มีผลต่อความสามารถในการยึด ติดกันระหว่างยางกับเส้นใย พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) สั้น ลงเล็กน้อย ส่วนค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแต่เมื่อมีการเติมสารคู่ ควบ ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงสั้นลงมากขึ้นเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่เติมสารคู่ควบ จากการทดสอบ แรงดึง (Tensile tests) พบว่าพฤติกรรมแรงดึงในสองทิศทางแตกต่างกันอย่างมาก ทำให้สังเกตได้ว่า เส้นใยจากไบสับปะรดในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ เส้นใย พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารคู่ควบให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น มากกว่าเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ได้มีการเติมสารคู่ควบ ส่วนค่ามอดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การยืด 10 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งแรงฉีกขาด และค่าความแข็งแรงกมมีแนวโน้มเดียวกับค่าความแข็งแรงดึงและจาก การทดสอบการแตกหักบริเวณพื้นผิวชิ้นงาน (Fracture surfaces) พบว่าเมื่อนำไปส่องทดสอบด้วย SEM คอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบจะมีผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ได้มีการเติม สารคู่ควบ ซึ่งพบว่าจะมีความขรุขระบริเวณผิวมากกว่า รวมไปถึงมองเห็นส่วนของเส้นใยที่ยื่นออกมา ยาวกว่า

S. Sotani และคณะ [35] ศึกษาผลของเส้นใยและปริมาณสารยึดเกาะต่อสมบัติเชิงกลและ การไหลของวัสดุเชิงประกอบ โดยใช้ยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน ผสมเส้นใยสั้นไนลอน 66 ยาว 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18 มิลลิเมตร และเส้นใยสั้นจากของเสียระหว่าง กระบวนการผลิตยางรีเคลม ยาว 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 มิลลิเมตร ผสมด้วยเครื่อง ผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง และศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะระหว่างยางกับเส้นใย 3 ชนิด ได้แก่ Resorcinol, Hexamethylenetetramine และ Hydrated silica (HRH) พบว่าเมื่อใช้สาร ช่วยยึดเกาะทำให้มีเวลาเชื่อมโยงที่สั้นลง และมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น จากการศึกษาปริมาณเส้นใย ไนลอน 66 ที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 phr พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นมีความหนืด และค่า ความแข็งแรงดึงมีค่ามากขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงตามแนวเครื่องจักรมีค่ามากกว่าตามแนวขวาง เครื่องจักร จากการศึกษาเส้นใยพบว่า เส้นใยไนลอน 66 มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าเส้นใยของเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้ระหว่างการผลิตยางรีเคลม จากการศึกษาการบวมตัวพบว่าสูตรยางที่ใส่สารช่วยยึดเกาะมีการบวมตัวน้อยกว่าสูตรที่ไม่ใส่สารช่วยยึดเกาะ และเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นการบวมตัวน้อยลง

### สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) การผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติโดยมีองค์ประกอบหลักเป็นผงยางรถยนต์โดยใช้สารให้ฟอง DNPT และยูเรียเป็นคิกเกอร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการเชื่อมโยง คือ อุณหภูมิ 160°C ที่เวลา 20 นาที ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด และการใช้เขม่าดำในการเสริมแรง พบว่าที่เขม่าดำ 50 phr ให้ค่าสมบัติเชิงกลมากที่สุด จากการศึกษาอัตราส่วนยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ (40 เมช) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางผสมสูตร คือ NR:GRT-40:60

2) การผลิตท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมผสมผงยางรถยนต์ 30 เมช ในอัตราส่วน RR:GRT-50:50 พบว่าสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสมคือ 160°C ที่เวลา 20 นาที และเขม่าดำที่เหมาะสมต่อการผลิตท่อน้ำซึมคือ 70 phr ให้ค่าสมบัติเชิงกลดีที่สุด สารให้ฟอง DNPT ที่เหมาะสมต่อการผลิตท่อน้ำซึมคือ 3% (เทียบกับ RR)

3) การผลิตท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงผสมผงยางรถยนต์โดยใช้ AZ เป็นสารให้ฟองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป คือ 5 นาที ที่อุณหภูมิ 230°C และอัตราส่วน HDPE:GRT ที่เหมาะสมคือ 60:40

4) จากการศึกษาเส้นใยจากสับปะรดและสารคู้ควบในยางไนไตรล์ พบว่าสารคู้ควบมีผลต่อการยึดติดเส้นใยกับยางส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดูลัสที่ 10 เปอร์เซ็นต์มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 12 เท่า และการใช้สารคู้ควบส่งผลให้เวลาการเชื่อมโยงสั้นลงเล็กน้อย

5) การศึกษาผลของเส้นใยไนลอน 66 และปริมาณสารยึดเกาะหรือสารคู้ควบในยางรีเคลม พบว่าเมื่อเพิ่มสารยึดเกาะ Resorcinol, Hexamethylenetetramine และ Silica (HRH) ส่งผลให้เวลาการเชื่อมโยงสั้นลง และมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาท่อน้ำซึมที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลมและผงยางรถยนต์ ซึ่งทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติผสมยางรีเคลม ปริมาณสารเสริมแรง ปริมาณสารให้ฟอง มีแผนการดำเนินการดังนี้

ตอนที่ 1 ทหาสถานะการเชื่อมโยงที่เหมาะสมของท่อน้ำซึม

ตอนที่ 2 ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม

ตอนที่ 3 พัฒนাসสมบัติเชิงกลจากอัตราส่วน NR:RR ที่เหมาะสมด้วย สารเสริมแรง เช่น เขม่าดำ และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์

ตอนที่ 4 ศึกษาปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสม

ตอนที่ 5 ศึกษาผลของความยาวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมต่ออัตราการซึมผ่านน้ำ และความดัน

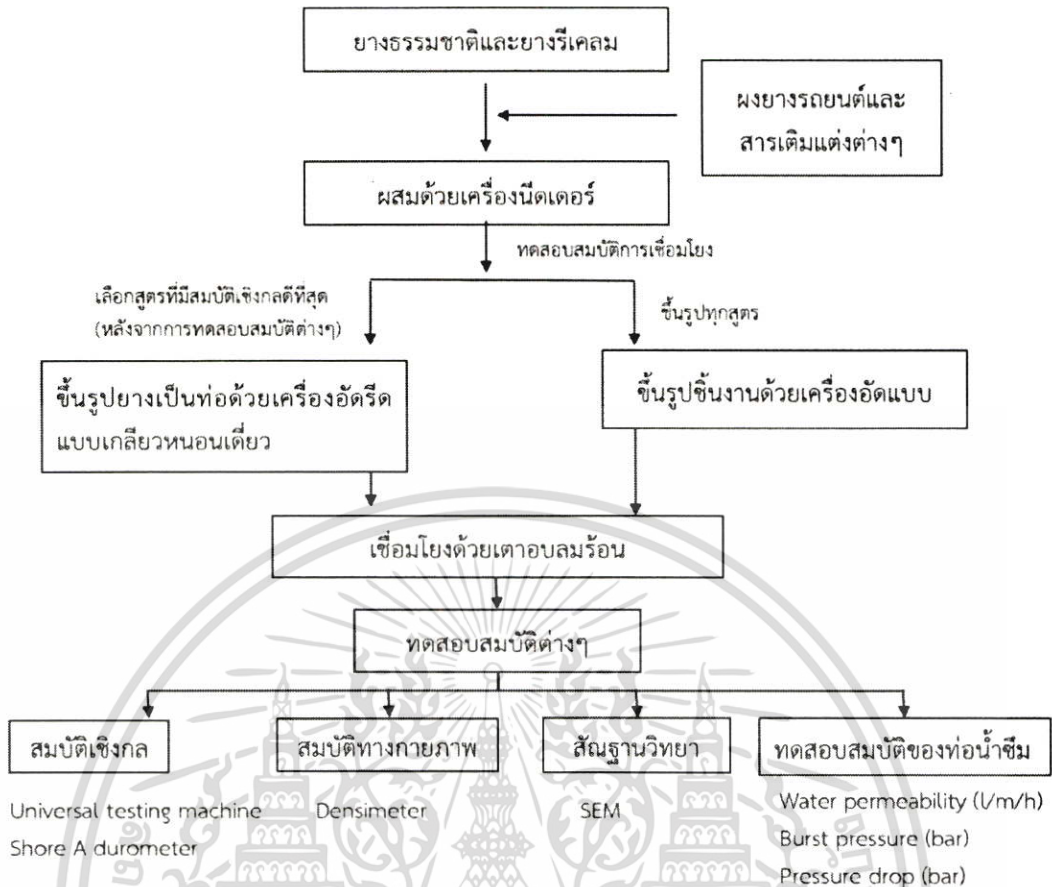
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.1 โดยขึ้นรูปชิ้นงานทุกสูตรด้วยเครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine) จากนั้นศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) เพื่อทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง โมดูลัสที่ 100% เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด นอกจากนี้ใช้ดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A (Shore A durometer) เพื่อทดสอบค่าความแข็งกด
- การศึกษาสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter) เพื่อหาความหนาแน่นของชิ้นงาน
- การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษา ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฟองอากาศ

หลังจากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ เลือกยางผสมสูตรที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดของการศึกษาในแต่ละตอนจากแผนดำเนินการ นำมาขึ้นรูปท่อน้ำซึมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมดังนี้

- ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) ที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.5, 0.8, 1.1 และ 1.4 bar
- ทดสอบความดันระเบิด (Burst pressure)
- ทดสอบความดันลด (Pressure drop) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความยาวท่อน้ำซึม 50 เมตร เช่น 25 และ 50 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบ

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ยางธรรมชาติ (NR) STR20 หจก. โฉวจินเฮ็งฮั่ว สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

- ยางรีเคลม (RR) เกรด UCD-105 บริษัท Union Commercial Development Co., Ltd สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.2

- ผงยางรถยนต์ (GRT) ขนาด 30 เมช ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด

- เส้นใยจากผ้าใบยางรถยนต์ (WTF) บริษัท Union Commercial Development Co., Ltd

- สารเชื่อมโยงกำมะถัน เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินตัสทรี จำกัด

- กรดสเตียริก เกรดการค้า บริษัท ไทยบำรุงเคมีคอล จำกัด

- ซิงค์ออกไซด์ เกรดการค้า บริษัท อีสเทิร์น อีลาสโตเมอร์ จำกัด

- สารเร่ง N-Cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide (CBS) เกรดการค้า บริษัท ไทยบำรุง เคมีคอล จำกัด

- สารเร่ง Tetramethylthiuram disulfide (TMTD) เกรดการค้า บริษัท ไทยบำรุงเคมีคอล จำกัด

- สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) น้ำมันแนพทานิก (Naphthanic oil) เกรด เอกสารการค้า บริษัท พี.เอส.พี สเปเชียลตีง จำกัด การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene diamine (6PPD) บริษัท โคซัน (ประเทศไทย) จำกัด
- สารคู่ควบ (Coupling agent) Mercapto silane Si-69 เกรดการค้า บริษัท ไทยบำรุงเคมีคอล จำกัด
- พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) เกรดการค้า บริษัท ไทยบำรุงเคมีคอล จำกัด
- สารให้ฟอง DNPT ชื่อทางการค้า Supercell<sup>®</sup> DPT บริษัท เอ.เอฟ.ซูเปอร์เซลล์ จำกัด สมบัติบางประการของสารให้ฟอง DNPT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 3.3
- สารกระตุ้นสารให้ฟอง ยูเรีย ชื่อทางการค้า Promotor<sup>®</sup> บริษัท เอ.เอฟ.ซูเปอร์เซลล์ จำกัด สมบัติบางประการของสารกระตุ้นสารให้ฟอง ยูเรีย ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ เกรด STR20

สมบัติ	ค่าที่ได้
สิ่งสกปรก (%wt)	0.16
เถ้า (%wt)	0.80
ไนโตรเจน (%wt)	0.06
สารระเหย (%wt)	0.80
ความหนืดมูนี่ [ML 1+4 (100 °C)]	91.2

\*หมายเหตุ : ข้อมูลสมบัติบางประการของยางธรรมชาติ เกรด STR20 มาจาก หจก. โฉวจินเฮ็งฮั่ว

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของยางรีเคลม เกรด UCD-105 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ลักษณะ	แผ่นสีดำ
วัตถุตั้ง	ยางทั้งเส้น
การสกัดด้วย อะซิโตน (%wt)	17
เถ้า (%wt)	3
เขม่าดำ (%wt)	30
ปริมาณเนื้อยาง (%wt)	50

\*หมายเหตุ : ข้อมูลสมบัติบางประการของยางรีเคลม เกรด UCD105 มาจากบริษัท Union Commercial Development Co., Ltd

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ DNPT ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ชื่อทางการค้า	Supercell <sup>®</sup> - DPT
สูตรเคมี	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> N <sub>6</sub> O <sub>2</sub>
ลักษณะ	ผงสีเหลือง
อุณหภูมิที่สลายตัว (°C)	197-203

\*หมายเหตุ : ข้อมูลสมบัติบางประการของสารให้ฟอง DNPT มาจาก บริษัท เอ.เอฟ.ซูเปอร์เซลล์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.4 สมบัติบางประการของ Urea ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ชื่อทางการค้า	Promotor <sup>®</sup>
สูตรเคมี	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>
ลักษณะ	ผงสีขาว
อุณหภูมิที่ละลายตัว (°C)	132-130

\*หมายเหตุ : ข้อมูลสมบัติบางประการของสารกระตุ้นสารให้ฟอง Urea มาจาก บริษัท เอ.เอฟ. ซุปเปอร์เซลล์ จำกัด

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมนืดเตอร์ (Kneader) รุ่น SK-6 บริษัท ยงพง แมชชีรี่ จำกัด
2. เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) รุ่น LRM 200 บริษัท แล็บ เทคโนโลยี เอนจิเนียริง จำกัด
3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น HT-8752 บริษัท สิทธิพร แอชโซซิเอต จำกัด
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) รุ่น GT-M2000, บริษัท สิทธิพร แอชโซซิเอต จำกัด
5. เครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine) : รุ่น 25-12H บริษัท แคลเซียร์ฟ (ไทยแลนด์) จำกัด
6. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder) บริษัท บริษัท เอ็กซ์ทราเดอร์ เฟอเรล จำกัด
7. เตาอบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น F400 บริษัท ไบน์เดอร์ จำกัด
8. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) : รุ่น TCS-2000 บริษัท สิทธิพร แอชโซซิเอต จำกัด
9. เครื่องตัดตัวอย่างรูปดัมเบลล์ : รุ่น KS-5010 บริษัท จินัน กาสอน เทสติ้ง จำกัด
10. เครื่องวัดความแข็ง (Hardness) Shore A : รุ่น GS-712N บริษัทเจทีซี ทูล จำกัด
11. เครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter) รุ่น MH-300T บริษัท เมริทเทค จำกัด
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : รุ่น EVO MA 10 บริษัท คาร์ล ไชซ์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)				
	ศึกษาอัตราส่วน NR:RR	ศึกษาปริมาณ เขม่าดำ	ศึกษาปริมาณเส้นใย	ศึกษาปริมาณเขม่าดำ และเส้นใย	ศึกษาปริมาณสารให้ฟอง
ยางธรรมชาติ STR20	0, 25, 50, 75, 100	50	50	50	50
ยางรีเคลมเกรด 105	200, 150, 100, 50, 0	100	100	100	100
การใช้เส้นใยโดยตรง	-	-	3, 6, 9, 12	-	-
มาสเตอร์แบทช์เส้นใย 40 %wt	-	-	7.5, 15, 22.5, 30	5, 10, 15	10
เขม่าดำ N550	-	20, 40	20	20	20
DNPT : Urea	1:1	1:1	1:1	1:1	0.5:0.5, 1:1, 1.5:1.5
สารเติมแต่งอื่น ๆ : ผงยางรถยนต์ 30 เมช 150, กรดสเตียริก 2, ซิงค์ออกไซด์ 5, น้ำมันแชนพทานิก 3, 6PPD 1, CBS 1, TMTD 0.5 และกำมะถัน 2.5					

ตารางที่ 3.6 สูตรการผลิตท่อน้ำซีม

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)					
	C30F0D1	C50F0D1	C30F6D1	C50F4D0.5	C50F4D1	C50F4D1.5
ยางธรรมชาติ STR20	50	50	50	50	50	50
ยางรีโคลม เกรด 105	100	100	100	100	100	100
มาสเตอร์แบทช์เส้นใย 40 %wt	0	-	15	10	10	10
เขม่าดำ N550	-	20	-	20	20	20
DNPT : Urea	1:1	1:1	1:1	0.5:0.5	1:1	1.5:1.5
สารเติมแต่งอื่น ๆ : ผงยางรถยนต์ 30 เมช 150, กรดสเตียริก 2, ซิงค์ออกไซด์ 5, น้ำมันแชนพทานิก 3, 6PPD 1, CBS 1, TMTD 0.5 และกำมะถัน 2.5						

- C : Carbon black
- F : Fiber
- D : DTPT (Blowing agent)

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียม WTF

1. นำเส้นใยมาร้อนเศษผงยางหรือเส้นใยขนาดใหญ่ออกด้วยตะแกรงขนาด 30 Mesh
2. ชั่งน้ำหนักเส้นใยแล้วนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักจนกว่าน้ำหนักของเส้นใยจากยางรถยนต์ไม่เปลี่ยนแปลง
3. เตรียมเส้นใยจากยางรถยนต์ 40 %wt ผสมกับยางธรรมชาติ และสารเคมีต่าง ๆ เช่น PEG 3 %wt และ Mercapto silane 3 %wt (ผลของการใส่ Mercapto silane แสดงดังภาคผนวก ง) ผสมด้วยเครื่องนิตเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 4 นาที

#### 3.4.2 การผสมยางและการเตรียมมาสเตอร์แบทช์

1. ชั่งยางและสารเคมี ตามตารางที่ 3.5
2. ทำการบดยางรีเคลมและยางธรรมชาติด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์เป็นเวลา 2 นาที ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 70°C เติมผงยางรถยนต์และสารเสริมแรงครั้งละประมาณ 1 ใน 4 ของทั้งหมดสลับกับน้ำมันแพทานิกที่ใช้เวลาประมาณ 6 นาที ในขั้นตอนนี้จะได้ Compound A
3. นำมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมไว้เติม Stearic acid และ ZnO (ใช้เวลา 2 นาที) จากนั้นเติม 6PPD, CBS, และ TMTD (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)
4. เติม DNPT และยูเรีย (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติมกำมะถัน (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที) แล้วรีดยางให้เป็นแผ่น ทั้งให้เย็นก่อนนำไปใช้งานต่อไป

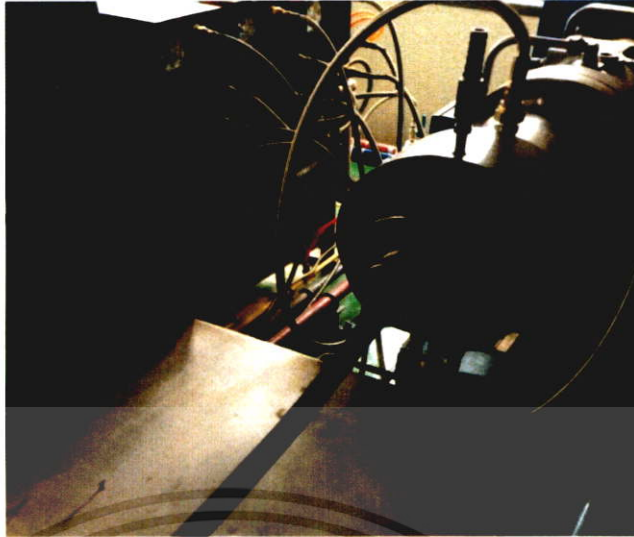
#### 3.4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานและเวลาการเชื่อมโยง

ชั่งยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.6 โดยทำการผสมยางตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4.2 โดยการขึ้นรูปชิ้นงาน 2 วิธี คือ การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ และการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว

1. การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ นำยางผสมสูตรมารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งให้มีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอัดในแม่พิมพ์ 4 เหลี่ยม ขนาด 150 x 150 x 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 60°C โดยทำการอัดย้ำ 3 ครั้ง แล้วนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที
2. การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว นำยางผสมสูตรที่ตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 2 นิ้ว ใส่เข้าไปในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวโดยมีอุณหภูมิของสกรู (Screw) กระบอกลใส่สกรู (Barrel) และอุณหภูมิของตาย (Die) 60 °C ปรับความเร็วสกรู (Screw speed) 30 รอบต่อนาที ยางที่ออกจากตายจะมีลักษณะเป็นท่อน แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวดังนี้
  - ความยาว : เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L:D) = 12:1
  - เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diametrical screw clearance) = 0.13-0.20 มิลลิเมตร
  - ตาย (Die) มีลักษณะเป็นวงกลม 2 อันซ้อนกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 และ 18 มิลลิเมตร

เมื่อได้ท่อน้ำซึมจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวแล้วทำการเชื่อมโยงท่อยางด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การขึ้นรูปท่อน้ำซึม

### 3.4.4 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม

#### 3.4.4.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน NR:RR-50:50 มีเขม่าดำจากยางรีเคลม 30 phr ใช้สารให้ฟอง 1 phr และสารตัวเติมอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์และขึ้นรูปท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงดังนี้

- อุณหภูมิการเชื่อมโยง 160°C
- เวลาการเชื่อมโยงแบ่งเป็น 5 ช่วง 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา

#### 3.4.4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยยางและผงยางรถยนต์ในอัตราส่วน 40:60 โดยใช้สารให้ฟอง 1 phr และศึกษาผลของปริมาณยางธรรมชาติและยางรีเคลมที่แตกต่างกันในอัตราส่วน (0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0) ตามลำดับ และสารตัวเติมอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์ และขึ้นรูปท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา

#### 3.4.4.3 ผลของปริมาณเขม่าดำ

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน NR:RR-50:50 โดยใช้สารให้ฟอง 1 phr และปริมาณเขม่าดำที่แตกต่างกัน คือ 30, 50 และ 70 phr และสารเติมแต่งอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์ และขึ้นรูปท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา

#### 3.4.4.4 ผลของเส้นใยจากยางรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน NR:RR-50:50 โดยใช้สารให้ฟอง 1 phr และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ 2 วิธี การนำมาใช้โดยตรง และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ในปริมาณเส้นใยจากยางรถยนต์ที่แตกต่างกัน คือ 3, 6, 9 และ 12 phr และสารเติมแต่งอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์และขึ้นรูปท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา

#### 3.4.4.5 ผลของเส้นใยจากยางรถยนต์และเขม่าดำ

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน NR:RR-50:50 โดยใช้สารให้ฟอง 1 phr โดยควบคุมปริมาณเขม่าดำ 50 phr และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่เตรียมด้วยวิธีมาสเตอร์แบทช์มาใช้ในปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน คือ 2, 4 และ 6 phr และสารเติมแต่งอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์ และขึ้นรูปท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา

#### 3.4.4.6 ผลของปริมาณสารให้ฟอง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่อัตราส่วน NR:RR-50:50 โดยมีเขม่าดำ 50 phr และเส้นใย 4 phr และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่แตกต่างกัน คือ 0.5, 1 และ 1.5 phr และสารเติมแต่งอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์ และขึ้นรูปท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา

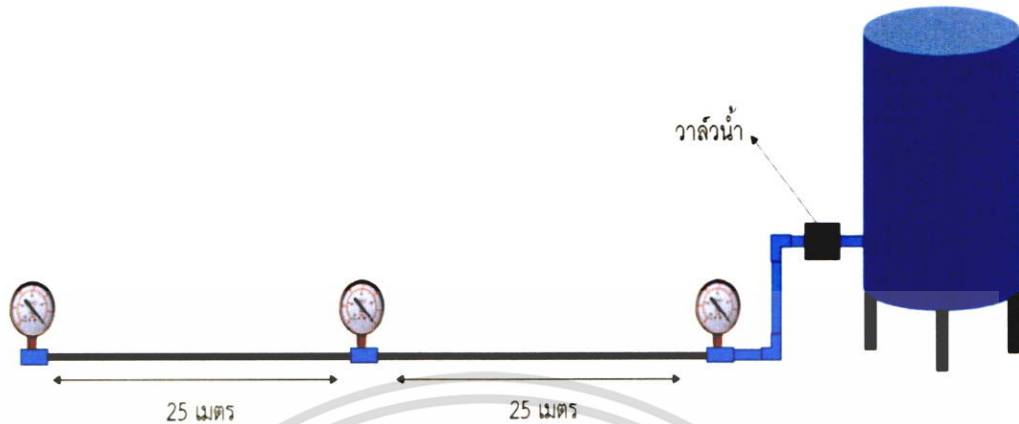
#### 3.4.4.7 การเปรียบเทียบอิทธิพลของสารเสริมแรงในท่อน้ำซึมต่ออัตราการซึมผ่านน้ำและการทนความดันสูงสุด

ขั้นตอนที่ 1 บดผสมยางตามตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องนิตเตอร์ และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นนำชิ้นงานเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา อัตราการซึมผ่านของน้ำ และการทดสอบความดันสูงสุดของท่อน้ำซึม

#### 3.4.4.8 ผลของความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อและผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

นำท่อน้ำซึมที่มีส่วนประกอบอัตราส่วน NR:RR-50:50 โดยมีเขม่าดำ 50 phr และเส้นใย 4 phr และปริมาณสารให้ฟอง DNPT 1 phr และสารเคมีอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.6 โดยนำท่อน้ำซึมในสูตร C50F4D1 ทดสอบความดันท่อน้ำซึมที่ความยาว 50 เมตร โดยวัดความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น ก่อนเข้าท่อน้ำซึม, 25 และ 50 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 พร้อมทั้งวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันแตกต่างกัน 0.5, 0.8 และ 1.1 bar



รูปที่ 3.3 การทดสอบความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อและผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

### 3.4.5 การทดสอบ

#### 3.4.5.1 การทดสอบการเชื่อมโยงยาง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2084 [36] วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบอย่างผสมสูตรด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงไม่มีงานหมุน (MDR ใช้อุณหภูมิการทดสอบ 160°C หาค่าเวลาการเชื่อมโยง (Cure time,  $t_{c(90)}$ )

#### 3.4.5.2 การทดสอบความหนืดมูนนี่

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1646 [37] วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบอย่างผสมสูตรด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) โดยใช้งานหมุนขนาดใหญ่ (L) ที่อุณหภูมิ 100 °C เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 4 นาที [ML 1+4 (100°C)]

#### 3.4.5.3 การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [38] การเตรียมชิ้นงานทดสอบทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงแล้วให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็น Die C คือเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ Load cell ขนาด 500 N และอัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

$$\text{Tensile strength} = F/A \quad (3.1)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบขาด  
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะยังไม่ยืด ( $\text{mm}^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$100\% \text{ Modulus} = F/A \quad (3.2)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบยืด 100%  
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะยังไม่ยืด ( $\text{mm}^2$ )

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times ((L-L_0) / L_0) \quad (3.3)$$

เมื่อ L คือ ระยะที่ชิ้นงานทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (cm)  
 $L_0$  คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (cm)

#### 3.4.5.4 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 624 [39] การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงแล้วให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็น Die C วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ Load cell ขนาด 500 N และอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงฉีกขาด

การคำนวณ

$$T_s = F/d \quad (3.4)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ ความแข็งแรงฉีกขาด ( $\text{kN/m}$ )  
F คือ แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด (kN)  
d คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

#### 3.4.5.5 การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [40] วิธีการทดสอบ ทดสอบด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A (Shore A durometer) โดยชิ้นงานทดสอบความแข็งกดจำนวน 5 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) วางซ้อนกันบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานข้างล่างให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 15 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด

#### 3.4.5.6 การทดสอบความหนาแน่น

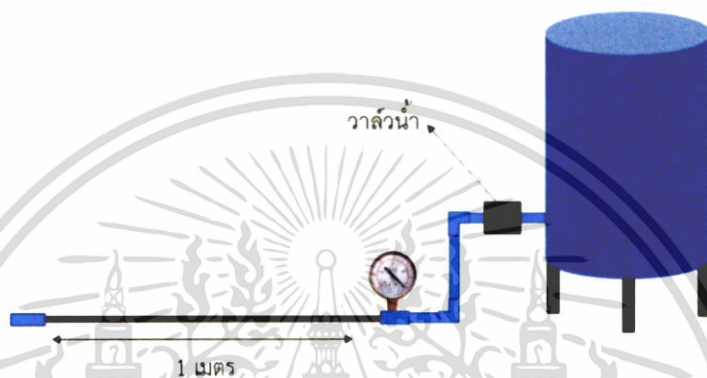
การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนแล้วให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter) จำนวน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่น

#### 3.4.5.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่มีการเชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก นำชิ้นงานทดสอบแช่ไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที จากนั้นหักชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานเรียบ ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบได้ชัดเจน วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่าง และการกระจายตัวของรูพรุน

### 3.4.5.8 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ

วิธีการทดสอบทำการสูดต่อน้ำซึมที่มีความยาว 1 เมตร จำนวน 5 เส้น ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) โดยติดตั้งเกจวัดความดัน (Pressure gauge) ก่อนน้ำเข้าสู่ท่อน้ำซึมที่มีความดันต่าง ๆ คือ 0.5, 0.8, 1.1 และ 1.4 bar โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที รายงานผลในรูปของปริมาณการซึมผ่านของน้ำต่อเวลาต่อความยาวท่อ (L/h/m) แสดงวิธีการทดสอบดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมเพื่อเป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางการเกษตรที่ผลิตจากผงยางรถยนต์ ยางรีเคลม และยางธรรมชาติ โดยวัตถุประสงค์หลัก คือ ขยะยางรถยนต์ที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มมูลค่า และลดปัญหาขยะยางรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นทุกวันโดยการนำขยะยางรถยนต์มาแปรรูป เช่น ผงยางรถยนต์ ยางรีเคลม และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ ซึ่งองค์ประกอบหลักของท่อน้ำซึม คือ ผงยางรถยนต์โดยมียางเป็นตัวเชื่อมประสาน (Binder) เพื่อขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมและทำให้เกิดรูพรุนที่ต่อเนื่อง (Open cell) ด้วยสารให้ฟอง โดยงานวิจัยนี้เน้นศึกษาพัฒนาความแข็งแรงของท่อน้ำซึมโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้่นจากเส้นใยหลาย (Ply) จากยางรถยนต์ใช้แล้ว เพื่อลดการบวมตัวของท่อน้ำซึม (Diameter swell) ให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มความดันน้ำ และทนต่อแรงดันน้ำทั่วไป เช่น น้ำประปาที่มีความดันประมาณ 0.5-1.6 bar โดยแบ่งขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

ตอนที่ 1 สภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสมของท่อน้ำซึม

ตอนที่ 2 ศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม

ตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง เช่น เหม่าดำ และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์

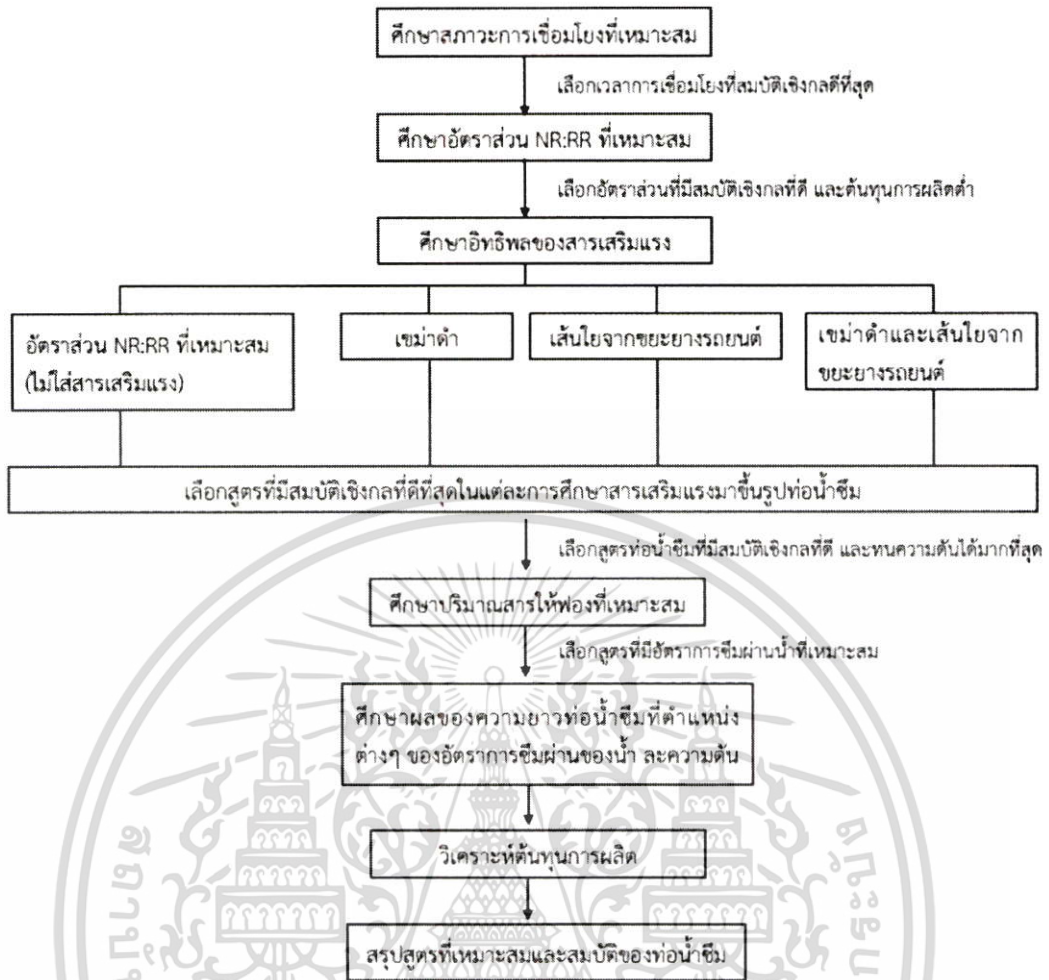
ตอนที่ 4 ศึกษาปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสม

ตอนที่ 5 ศึกษาผลของความยาวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมต่ออัตราการซึมผ่านน้ำ และความดัน

ตอนที่ 6 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึม

ตอนที่ 7 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของท่อน้ำซึม

ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา เพื่อวิเคราะห์ผลโดยเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีนำมาขึ้นรูปท่อน้ำซึมเพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม โดยสูตรการขึ้นรูปท่อน้ำซึมมีตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของท่อน้ำซึมได้แก่ เหม่าดำ : C, เส้นใย : F และสารให้ฟอง : D ตัวอย่าง เช่น C30F6D1 เท่ากับมีเหม่าดำ 30 phr เส้นใย 6 phr และสารให้ฟอง 1 phr ตามลำดับ แสดงลำดับขั้นตอนการศึกษาท่อน้ำซึมดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังลำดับขั้นตอนของการวิจัยศึกษาท่อน้ำซึม

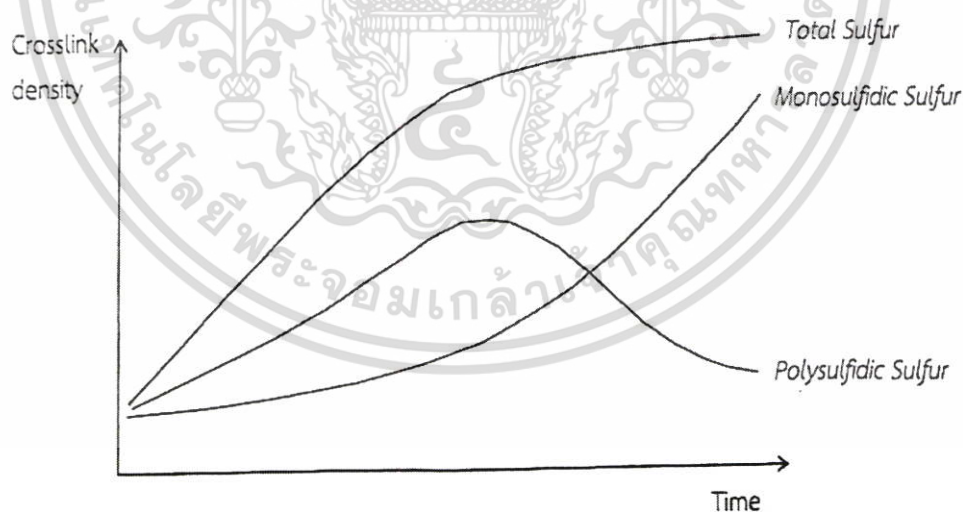
#### 4.1 สภาวะการเชื่อมโยง

กระบวนการเชื่อมโยงเป็นสิ่งที่สำคัญอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งผลิตภัณฑ์จะมีสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมสม่าเสมอได้นั้นต้องเลือกสภาวะการเชื่อมโยงให้เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์และใช้เวลาในการเชื่อมโยงน้อย การเชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับความเหมาะสมในการผลิตแต่ละผลิตภัณฑ์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการเชื่อมโยงโดยใช้เตาอบลมร้อน (Hot air oven) จึงไม่สามารถนำเวลาการเชื่อมโยงจากเครื่อง MDR มาใช้ได้ เนื่องจากเตาอบลมร้อนใช้อากาศร้อนในการเชื่อมโยงซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าเครื่องมือทดสอบ MDR ที่ถ่ายเทความร้อนสูงจากโลหะสู่ยางคอมปาวด์ งานวิจัยนี้จึงศึกษาเวลาการเชื่อมโยงที่  $160^{\circ}\text{C}$  โดยมีอัตราส่วน GRT (30 เมช) และยาง (NR, RR) เท่ากับ 60:40 (โดยน้ำหนักเทียบกับยาง) ในหัวข้อการหาสภาวะการเชื่อมโยงนี้เลือกสูตรยางที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม เท่ากับ 50:50 (โดยน้ำหนักของยาง) ซึ่งองค์ประกอบของยางรีเคลมเกรด UCD105 มีองค์ประกอบของเนื้อยางประมาณ 50% เขม่าดำ 30% และองค์ประกอบอื่น ๆ โดยไม่มีการเติมเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ในการเสริมแรง และใช้สารให้ฟอง DNPT 1 phr แสดงด้วยย่อของสูตรนี้ คือ C30F0D1 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมต่อการผลิตท่อน้ำซึม

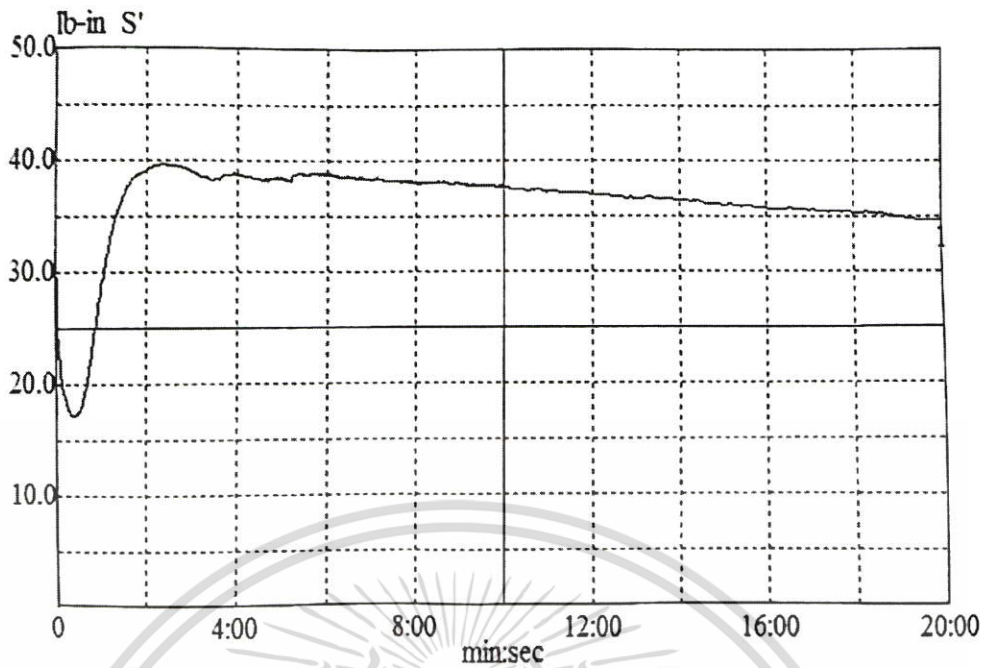
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ศึกษาเวลาการเชื่อมโยงซึ่งมีปริมาณสารเชื่อมโยงกำมะถันคงที่ เมื่อเวลาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นกำมะถันเกิดการเชื่อมโยงทำให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงเพิ่มมากขึ้น และเมื่อกำมะถันเกิดการเชื่อมโยงจนหมดค่าความหนาแน่นการเชื่อมโยงเริ่มมีค่าคงที่ แสดงดังรูปที่ 4.2 สอดคล้องกับกราฟการเชื่อมโยงในช่วง 2 นาทีแรกของกราฟรูปที่ 4.3 ความหนาแน่นเชื่อมโยงของยางส่งผลโดยตรงต่อสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง เพอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด เนื่องจากยางเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติเมื่อได้รับแรงสายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ผ่านกันยากขึ้นจึงทำให้ค่าสมบัติเชิงกลดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง (Optimum point) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์เรียกว่า จุดเกิดเจล (Gel point) โครงสร้างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ที่สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 4.4

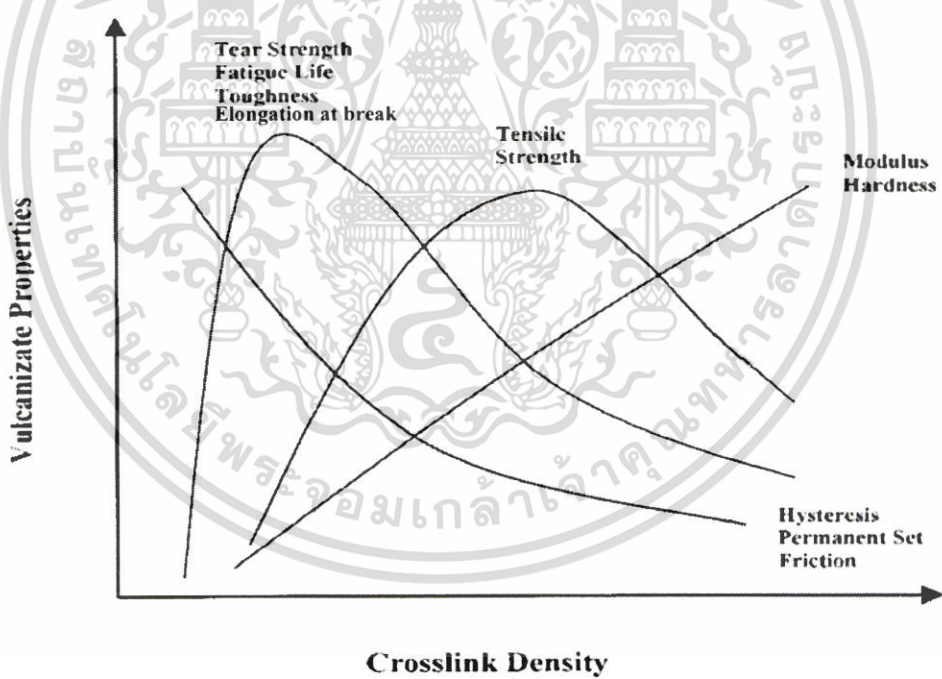
อย่างไรก็ดีเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้เวลาการเชื่อมโยงที่มากเกินไปเกิดการเปลี่ยนแปลงหลายประการ เช่น การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงย้อนกลับ (Reversion) หรือ สายโซ่ยางเกิดการเสื่อมสลาย (Degradation) จากกราฟสมบัติเชิงกล ดังรูปที่ 4.5-4.7 พบว่ายางผสมสูตรมีสมบัติเชิงกลลดลงหลังเวลาการเชื่อมโยง 20 นาที ทั้งนี้คาดว่ามาจากสาเหตุดังนี้ 1) การเกิดออกซิเดชันจากการใช้เตาอบลมร้อนเป็นเวลานานทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดออกซิเดชัน และยางผสมสูตรมียางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบจึงสามารถเกิดการออกซิเดชันแบบการตัดขาดสายโซ่โมเลกุล (Chain scission) ดังรูปที่ 4.8 2) จากกราฟการเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.3 พบว่าหลังจากเกิดการเชื่อมโยงที่สมบูรณ์แล้วบริเวณปลายเส้นกราฟการเชื่อมโยงค่าแรงบิดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงย้อนกลับ ทำให้พันธะการเชื่อมโยงของกำมะถันเกิดการแตกออกส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงที่ลดลง และมีการเกิดการเสียดสภาพของยางธรรมชาติทำให้มีสายโซ่โมเลกุลสั้นลง



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเชื่อมโยงกับปริมาณกำมะถันรวม (Total sulfur) ในยางซึ่งเกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงแบบมอนอซัลไฟดิก และพอลิซัลไฟดิก [6]

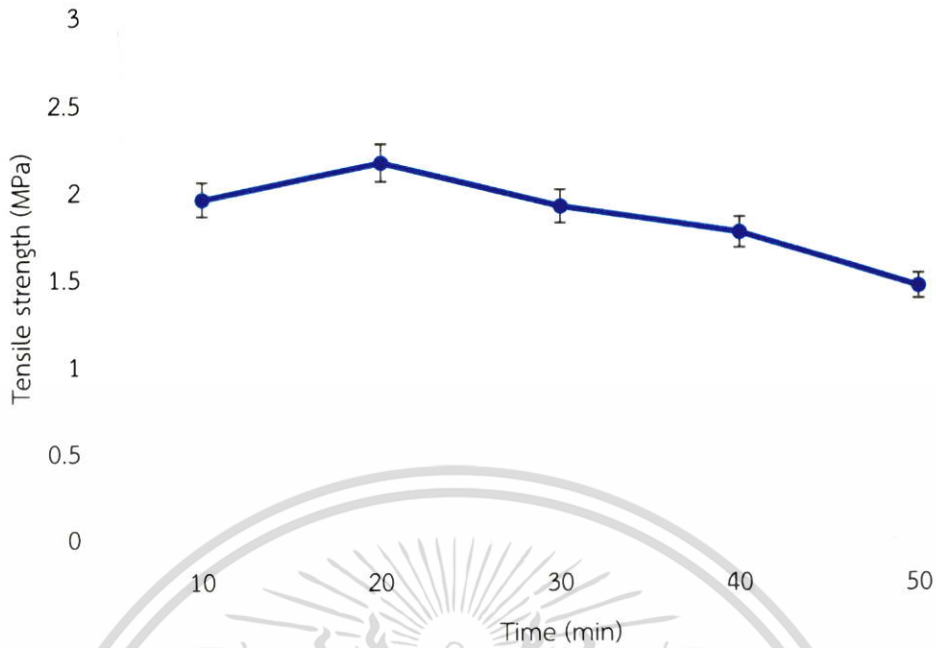


รูปที่ 4.3 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ของท่อน้ำซีม สูตร C30F0D1

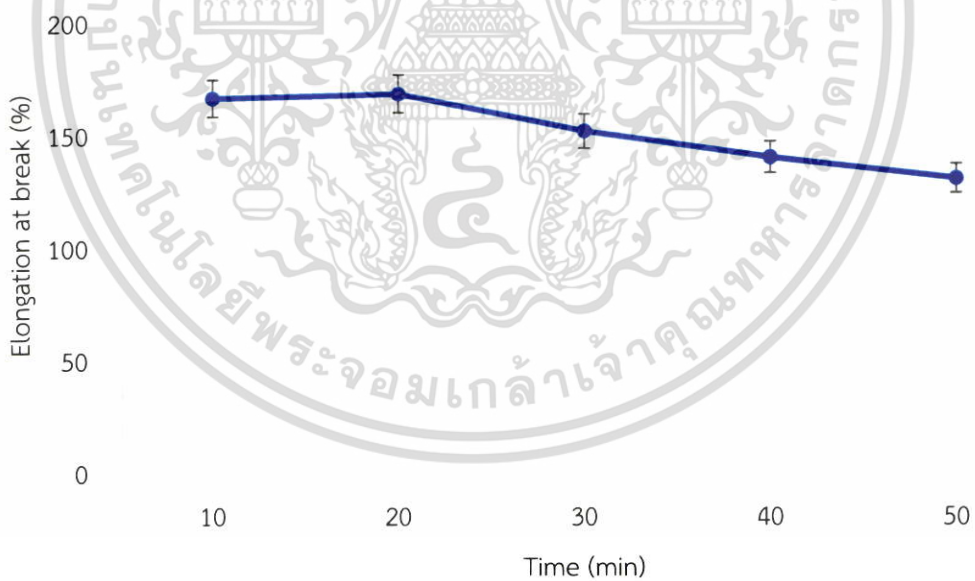


รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกล [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

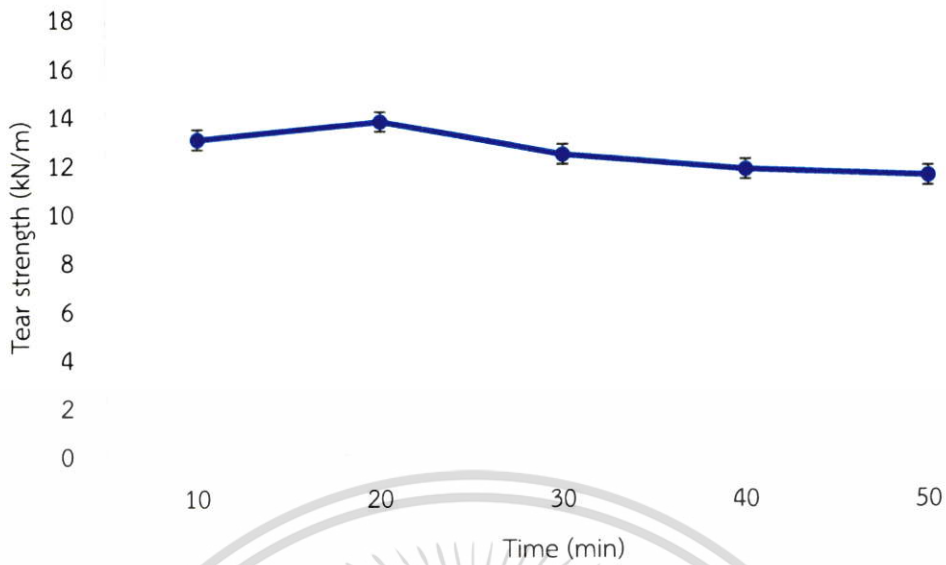


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน

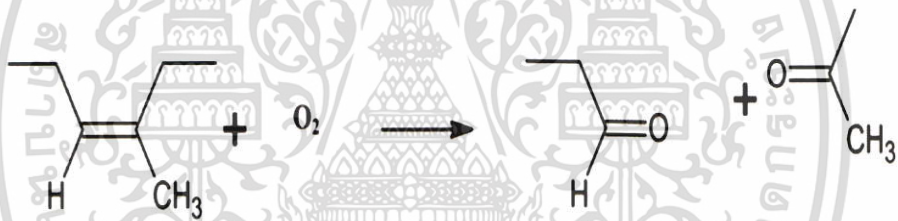


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน

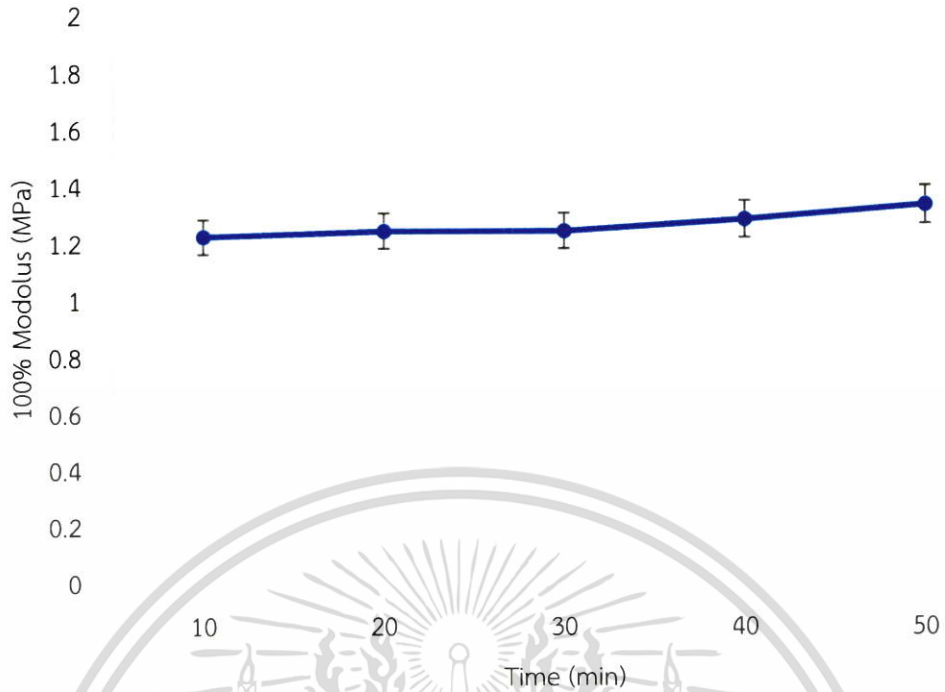


รูปที่ 4.8 การเกิดออกซิเดชันของยางธรรมชาติ [6]

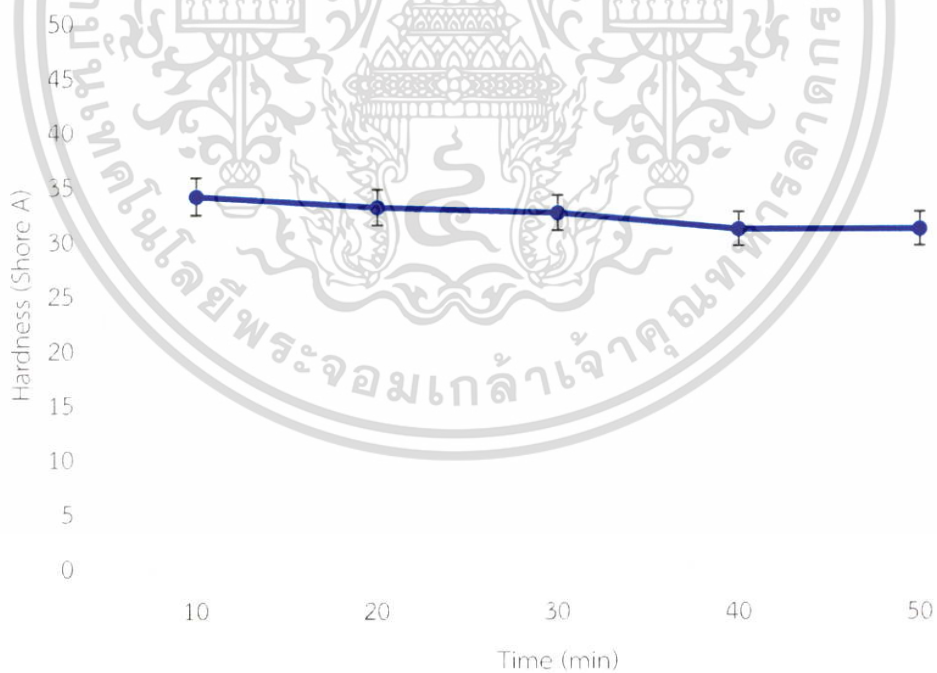
จากการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงพบว่าค่ามอดุลัสที่ 100% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.9 การแตกตัวของกำมะถันเพื่อเกิดการเชื่อมโยงทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติสายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ยากขึ้นทำให้ชิ้นงานแข็งขึ้น แต่งานวิจัยนี้ชิ้นงานมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุน และเกิดออกซิเดชันที่มาจากการใช้เตาอบลมร้อนที่มีออกซิเจนและความร้อนจึงเกิดการออกซิเดชันได้ง่าย จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงค่าของความแข็งแรงที่ชัดเจนเมื่อเพิ่มเวลาการเชื่อมโยง ผลของการเกิดออกซิเดชันเห็นได้ชัดว่าค่าความแข็งแรงกมมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.10 จากการสังเกตบริเวณพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะเหนียวเยิ้มเนื่องจากออกซิเจนสามารถเกิดการออกซิเดชันบริเวณพื้นผิวชิ้นงานได้ง่ายจึงทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลาการเชื่อมโยง ดังรูปที่ 4.11 เนื่องจากคอมปาวด์ได้รับความร้อนสารให้ฟองสามารถเกิดการสลายตัวเกิดเป็นรูพรุนในชิ้นงาน จากนั้นความหนาแน่นมีแนวโน้มคงที่เนื่องจากสารให้ฟองเกิดการสลายตัวจนหมด

จากการศึกษาเปรียบเทียบเวลาการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนพบว่าที่เวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 160°C ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเวลาอื่น ๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะนี้ในการเชื่อมโยงเพื่อศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ต่อไป (สภาวะการเชื่อมโยงที่เลือกใช้เฉพาะงานวิจัยนี้โดยใช้เครื่องมือการเชื่อมโยงนี้เท่านั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

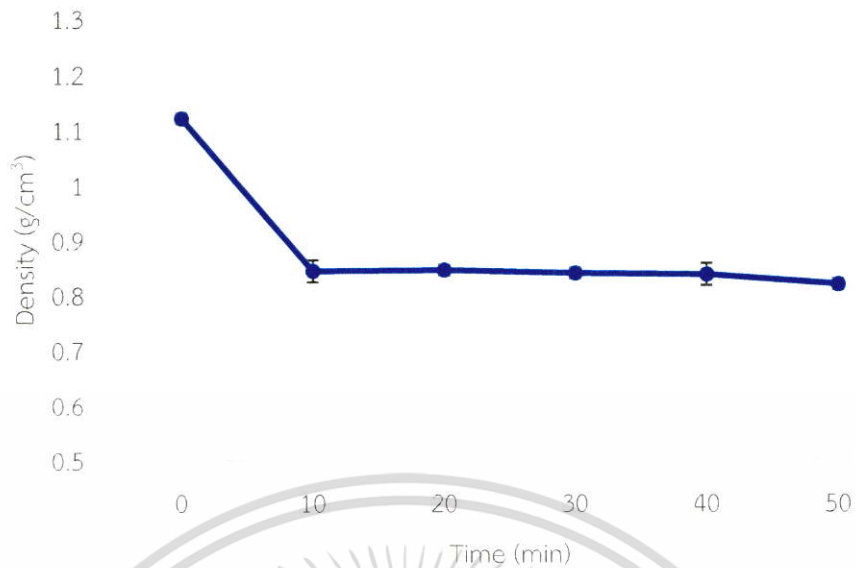


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

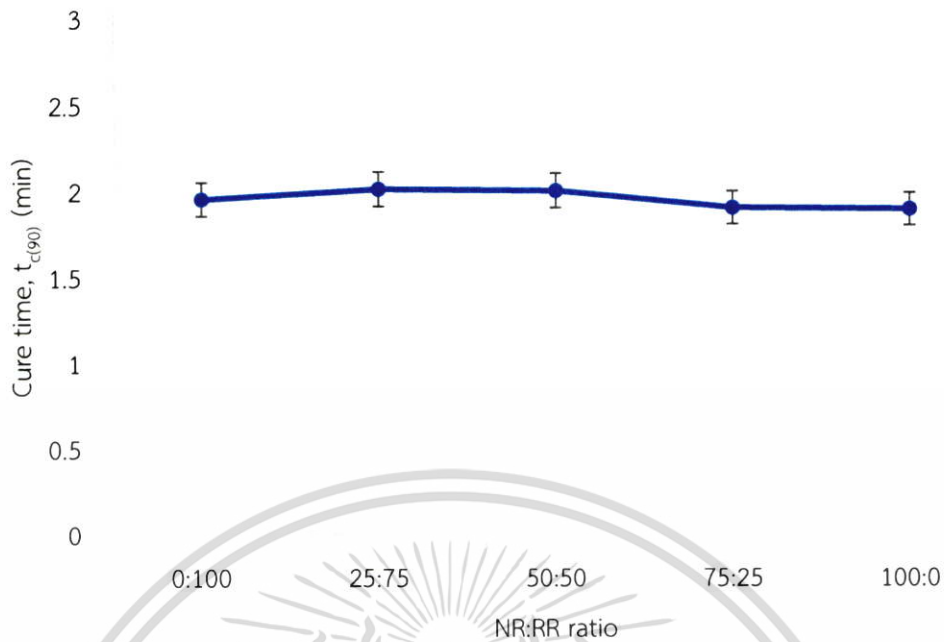


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR (50:50) สูตร C30F0D1 ที่เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน

#### 4.2 อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมต่อสมบัติเชิงกล

งานวิจัยนี้เป็นการนำขยะยางรถยนต์มาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตท่อน้ำซึมเป็นอุปกรณ์การให้น้ำทางการเกษตร โดยแปรรูปเป็นผงยางรถยนต์ ยางรีเคลม และเส้นใยเสริมแรง สำหรับในหัวข้อการศึกษาเป็นการศึกษาส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (Binder) ผงยางรถยนต์เพื่อขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึม ซึ่งตัวเชื่อมประสานเป็นยางที่ทำจากขยะยางรถยนต์ใช้แล้ว เรียกว่า ยางรีเคลม งานวิจัยนี้ใช้ยางรีเคลมเกรด UCD105 ซึ่งมีองค์ประกอบของเนื้อยางประมาณ 50% เขม่าดำ 30% และองค์ประกอบอื่น ๆ ตามตารางที่ 3.2 (แสดงผลการวิเคราะห์ทางความร้อนภาคผนวก ก อย่างไรก็ตามยางรีเคลมทำจากขยะยางรถยนต์ใช้แล้วและผ่านกระบวนการดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) ทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลสั้นลงจึงมีสมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่ายางที่ไม่เคยผ่านการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสมบัติเชิงกลที่ดี และเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายภายในประเทศมาผสมใช้งานกับยางรีเคลมเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม (NR:RR) เท่ากับ 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 และ 100:0 โดยมีอัตราส่วนยางและ ผงยางรถยนต์ (30 เมช) เท่ากับ 40:60 (โดยน้ำหนักเทียบกับยาง) โดยไม่มีการใส่สารเสริมแรงเพิ่มเติม และควบคุมการใช้สารให้ฟอง 1 phr โดยเลือกสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลมที่เหมาะสมจากสมบัติเชิงกลที่ดีเพื่อนำไปขึ้นรูปท่อน้ำซึม และคำนึงถึงการใช้ปริมาณยางรีเคลมเป็นหลักเพื่อลดต้นทุนการผลิตให้มีความเป็นไปได้ในการแข่งขันในเชิงพาณิชย์

จากกราฟการเชื่อมโยงด้วยเครื่อง MDR ของอัตราส่วน (NR:RR) ที่แตกต่างกัน พบว่าการเชื่อมโยงของอัตราส่วน NR:RR ในแต่ละอัตราส่วนไม่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.1 จากการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงในหัวข้อ 4.1 พบว่าเวลาการเชื่อมโยง 20 นาทีที่อุณหภูมิ 160°C มีค่าสมบัติเชิงกลที่ดี ดังนั้นจึงใช้สภาวะการเชื่อมโยงนี้เพื่อการศึกษาอัตราส่วน NR:RR ต่อไป

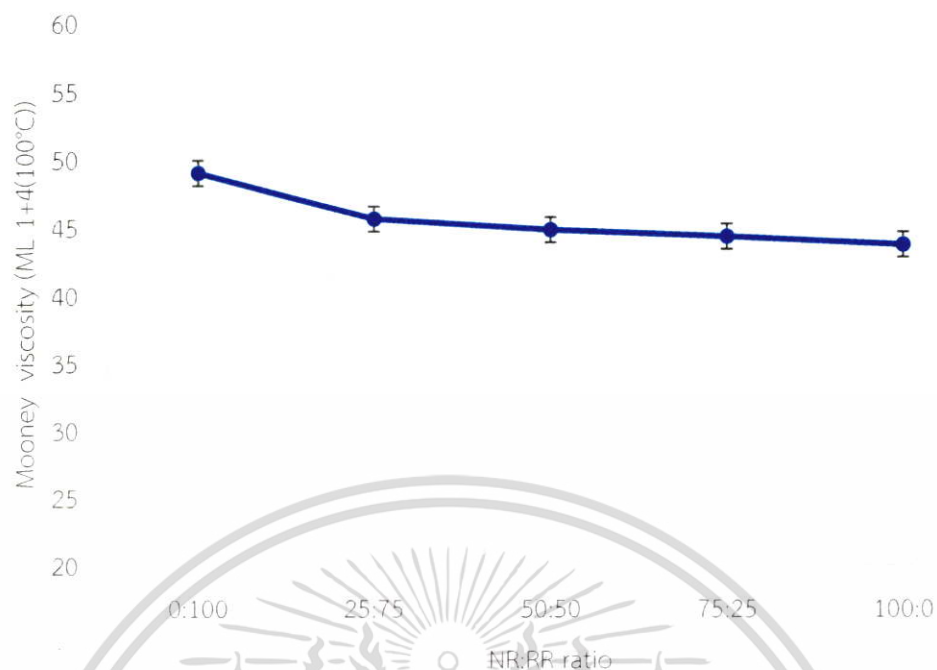


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงด้วยเครื่อง MDR ของยางผสมสูตรที่มีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน

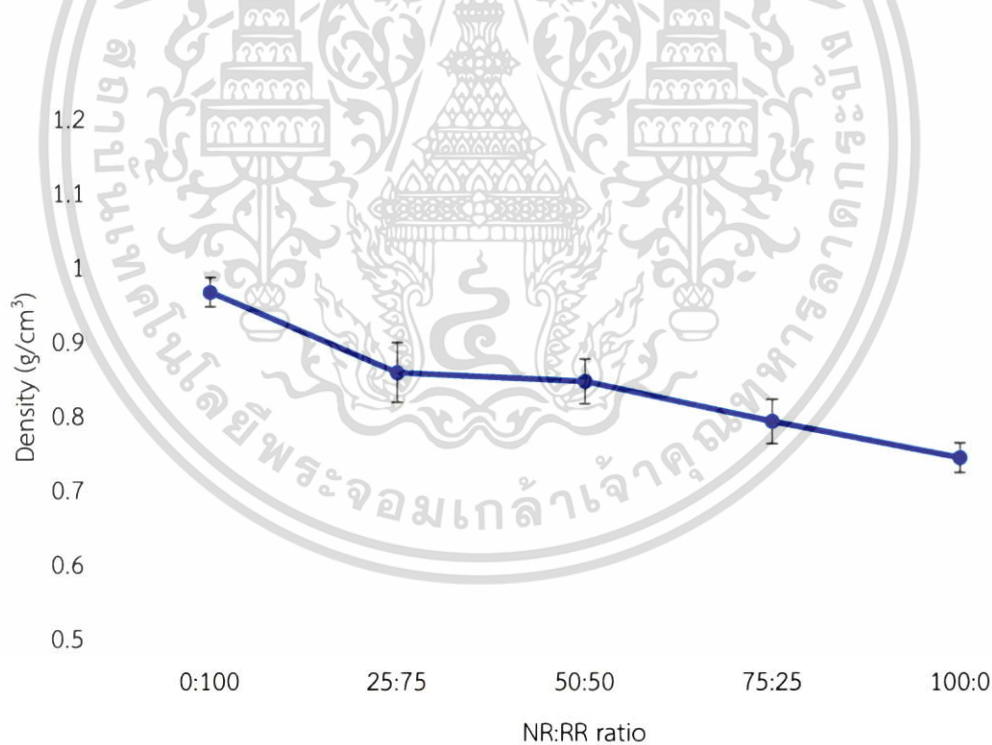
ตารางที่ 4.1 สมบัติการเชื่อมโยงของการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม

NR:RR ratio	$t_{s2}$ (min)	$t_{c(90)}$ (min)	CRI ( $\text{min}^{-1}$ )
0:100	1.10	2.02	108.69
25:75	1.11	2.01	106.38
50:50	1.11	2.00	105.26
75:25	1.12	1.91	105.26
100:0	1.13	1.90	104.16

การศึกษาอัตราส่วน NR:RR เป็นการศึกษาในส่วนที่เป็นยางหรือเมทริกซ์ ซึ่งงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนยางต่อผงยางรถยนต์ เท่ากับ 40:60 จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ NR:RR ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี้มีค่าลดลง แสดงดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากมีปริมาณสารตัวเติมที่เป็นส่วนประกอบจากอัตราส่วนของยางรีเคลมลดลง จึงทำให้ความหนืดของยางผสมสูตรมีแนวโน้มลดลง สารตัวเติมที่เป็นส่วนประกอบของยางรีเคลมลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน NR:RR ส่งผลให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.14 เนื่องจากสารตัวเติมมีความหนาแน่นสูงกว่าเมื่อเทียบกับยางผสมสูตร นอกจากนี้ความหนืดที่ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติทำให้สารให้ฟองมีโอกาสตายตัวแล้วมีจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้น แสดงลักษณะรูพรุนของชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.15

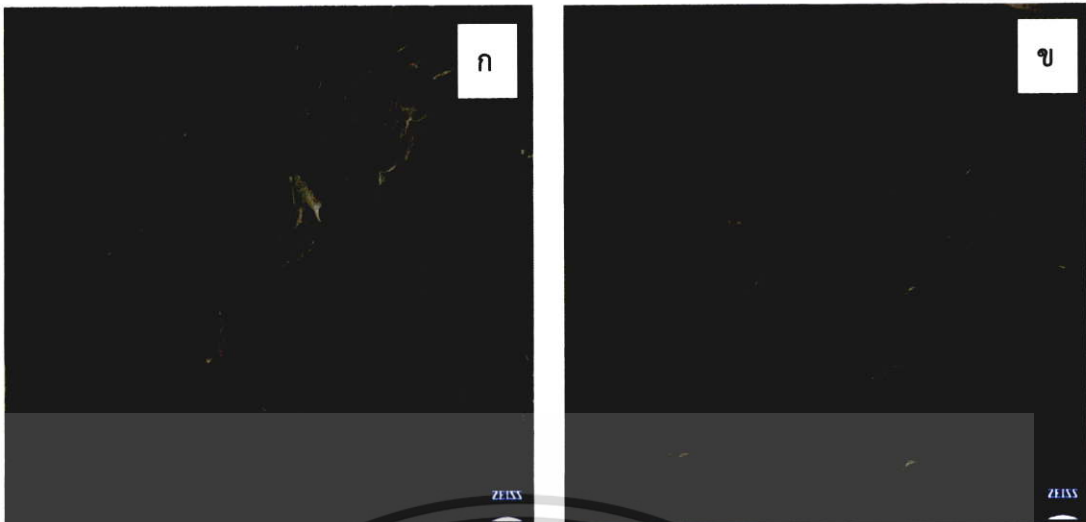


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าความหนืดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน

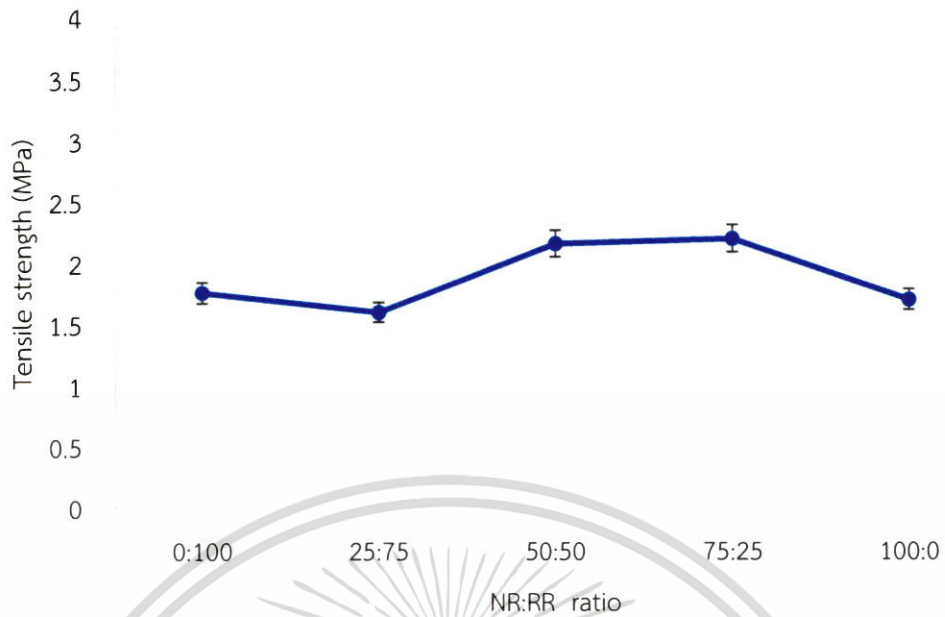
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



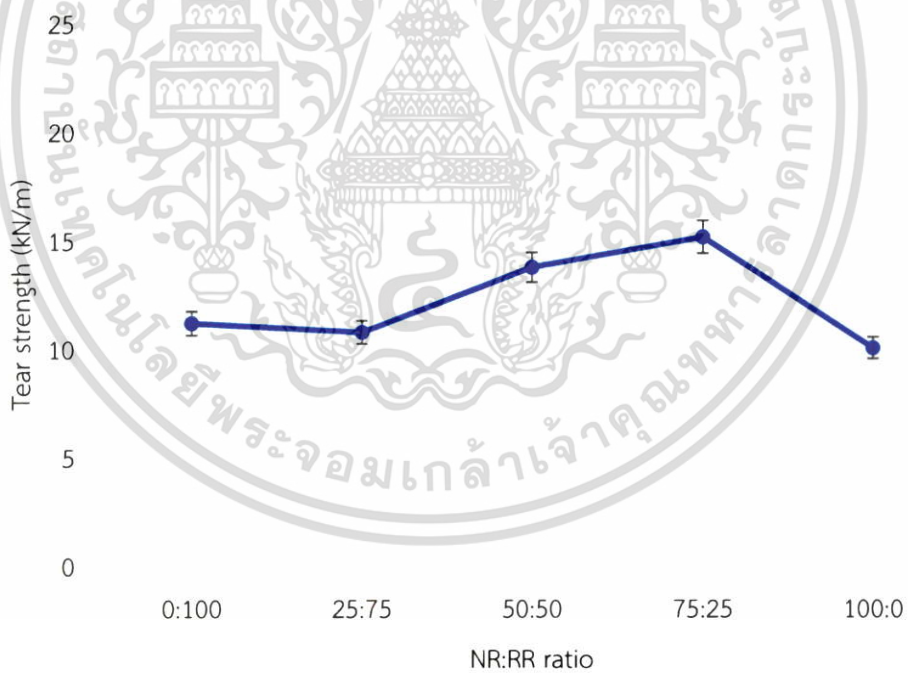
รูปที่ 4.15 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่กำลังขยาย 30 เท่า ก) NR:RR (25:75) และ ข) NR:RR (75:25)

จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มอัตราส่วน NR:RR ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 เนื่องจากในส่วนของยางหรือเมทริกซ์มีอัตราส่วน 40% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณผงยางรถยนต์ที่มีอัตราส่วน 60% โดยน้ำหนัก จึงไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน อย่างไรก็ตามการศึกษาอัตราส่วน NR:RR ในส่วนของเมทริกซ์นี้มีส่วนในการเปลี่ยนแปลงความหนืดของยางผสมสูตรเนื่องจากมีปริมาณสารตัวเติมจากอัตราส่วนของยางรีเคลม ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน NR:RR จึงทำให้ปริมาณสารตัวเติมในยางผสมสูตรมีน้อยลง ส่งผลให้สารให้ฟองสลายตัวแล้วมีโอกาสการเกิดรูพรุนที่มากขึ้นในชิ้นงาน กล่าวคือสมบัติเชิงกลเหล่านี้ขึ้นกับจุดบกพร่องในชิ้นงานเป็นหลัก เมื่อชิ้นงานได้รับแรงเกิดการกระจายแรงที่ไม่ดีทำให้สมบัติเชิงกลเหล่านี้ลดลง ดังนั้นการนำยางธรรมชาติที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมาใช้จึงอาจไม่เห็นผลการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แสดงสูตรยางที่มีอัตราส่วน NR:RR (100:0 และ 0:100) โดยไม่มีการใส่สารให้ฟอง ดังภาคผนวก จ อย่างไรก็ตามค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วน NR:RR เนื่องจากมีปริมาณสารตัวเติมโดยเฉพาะปริมาณเขม่าดำที่เป็นส่วนประกอบของอัตราส่วนยางรีเคลมลดลง จึงทำให้ปริมาณสารตัวเติมในชิ้นงานลดลง และยางธรรมชาติมีสมบัติการยืดหยุ่นที่ดีจึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.18

จากค่ามอดูลัสที่ 100% และค่าความแข็งแรงกตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วน NR:RR ดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วน NR:RR ทำให้อัตราส่วนยางรีเคลมลดลงยางรีเคลมที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มาจากขยะยางรถยนต์ซึ่งมีสารตัวเติมต่าง ๆ ในสูตรยาง สารตัวเติมเหล่านี้มีความแข็งแรงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยาง ดังนั้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมในชิ้นงานลดลงจึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ 100% และค่าความแข็งแรงกตมีแนวโน้มลดลง

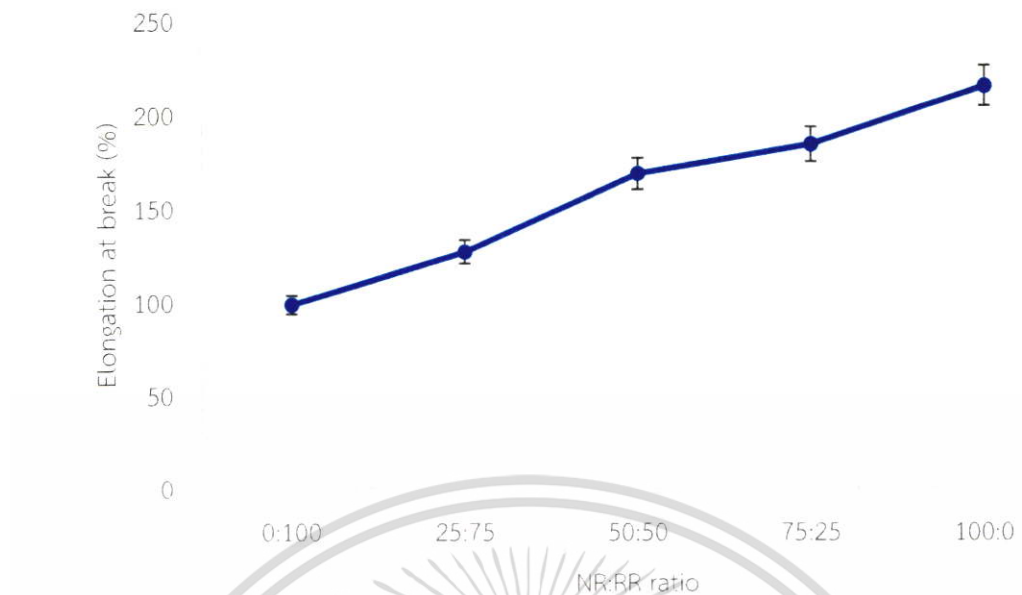


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน

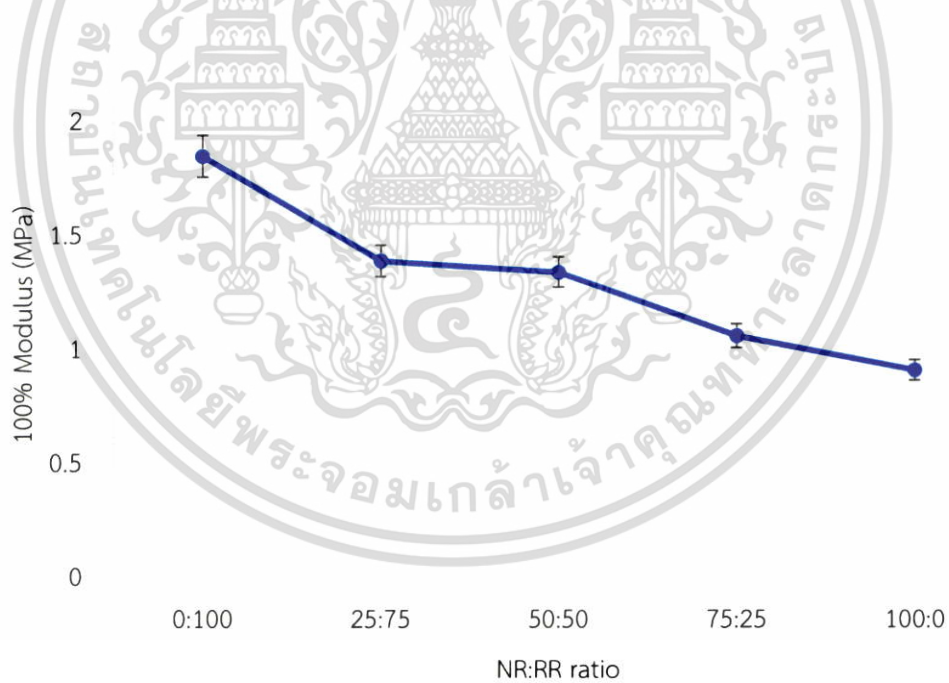


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

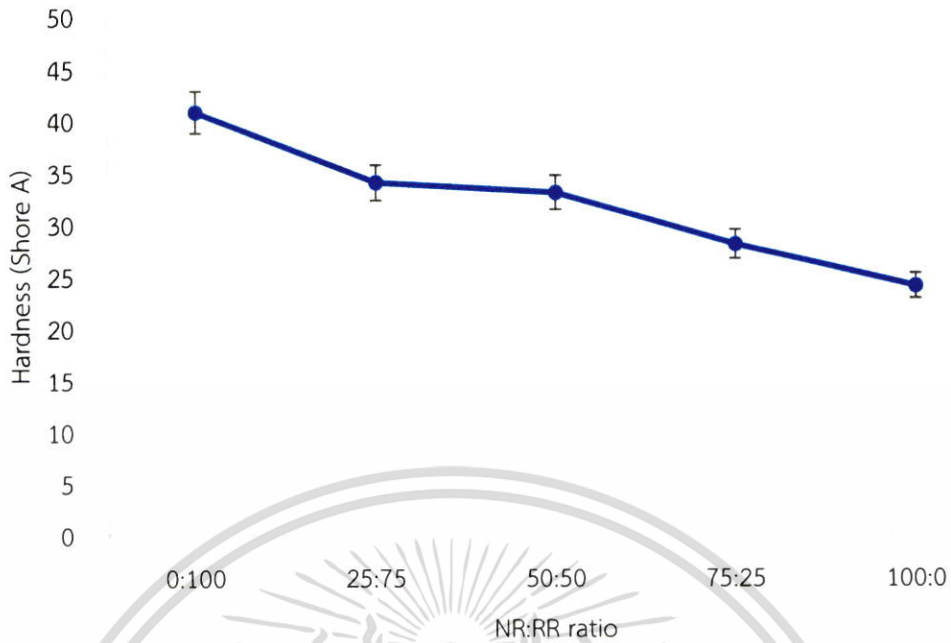


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100 % ของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

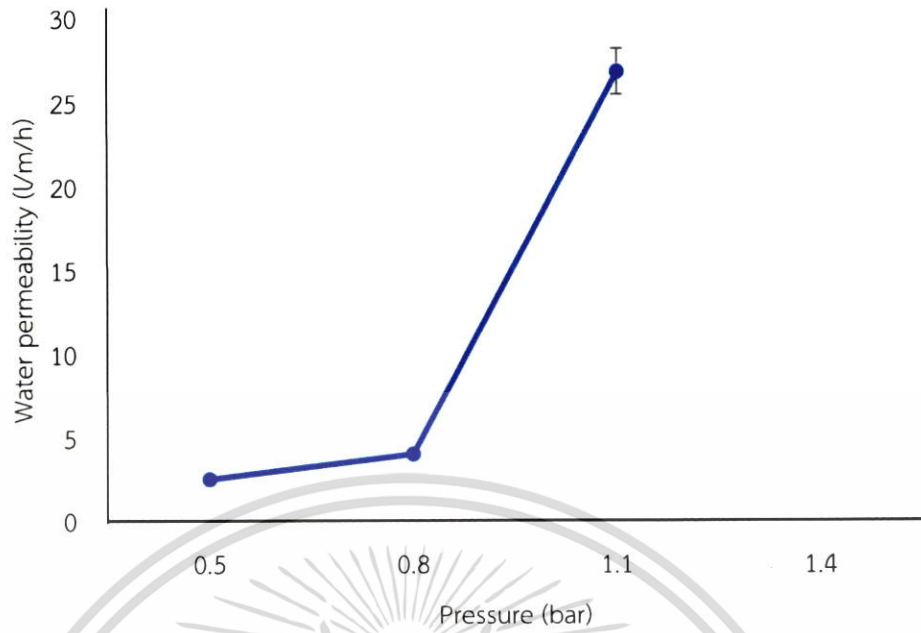


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรโดยมีอัตราส่วน NR:RR ที่แตกต่างกัน

จากค่าสมบัติเชิงกลของการศึกษาอัตราส่วน NR:RR โดยเลือกสูตรที่มีอัตราส่วน NR:RR-50:50 ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นใช้วัสดุจากขยะยางรถยนต์ใช้แล้วเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดได้ผลิตภัณฑ์ที่มีต้นทุนต่ำมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ และในสูตรนี้มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติเป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศเพื่อกระตุ้นเศรษฐกิจ โดยนำสูตรยางนี้ไปขึ้นรูปท่อน้ำซึมเพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำพร้อมทั้งวัดเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5, 0.8, 1.1 และ 1.4 bar

จากการศึกษาอัตราส่วน NR:RR โดยเลือกสูตรที่มีอัตราส่วน NR:RR- 50:50 โดยมีเขม่าดำจากยางรีเคลม 30 phr ไม่ใส่เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ และควบคุมสารให้พอง 1 phr มีสูตรย่อ คือ C30F0D1 นำมาขึ้นรูปท่อน้ำซึมเพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม แสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันท่อน้ำซึมมีแนวโน้มของอัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ความดัน 1.1 bar เนื่องจากท่อน้ำซึมได้รับความดันแล้วเกิดการขยายตัวของรูพรุนหรืออาจเกิดการฉีกขาดของโครงสร้างรูพรุน ส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และไม่สามารถทนแรงดันได้ที่ 1.4 bar เนื่องจากท่อน้ำซึมเกิดการบวมตัวแล้วเกิดการฉีกขาด ทั้งนี้ท่อน้ำซึมที่ใช้งานในเชิงการค้ามีความดันในการใช้งานอยู่ในช่วง 0.5-1.5 bar และอัตราการซึมผ่านน้ำ 3-6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง ดังนั้นจึงนำยางผสมสูตรอัตราส่วน NR:RR-50:50 พัฒนาเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ท่อน้ำซึมสามารถรับแรงดันน้ำได้มากขึ้น โดยใช้สารตัวเติมเพื่อเสริมแรง เช่น เขม่าดำ และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของสารตัวเติมต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดัน 0.5-1.4 bar ของท่อน้ำซึมสุตรอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม NR:RR-50:50 (C30F0D1)



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5-1.4 bar ของสุตรอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม NR:RR-50:50 (C30F0D1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

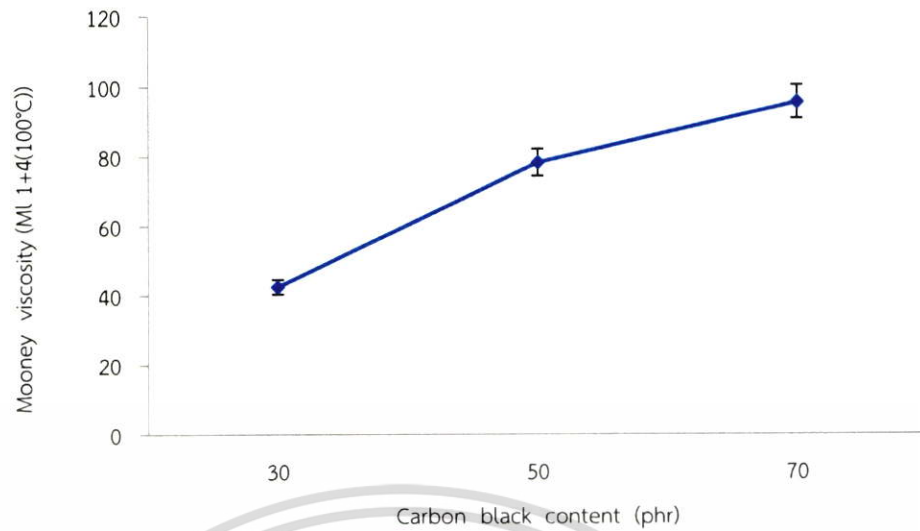
## 4.3 การศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง

### 4.3.1 การศึกษาปริมาณเขม่าดำ

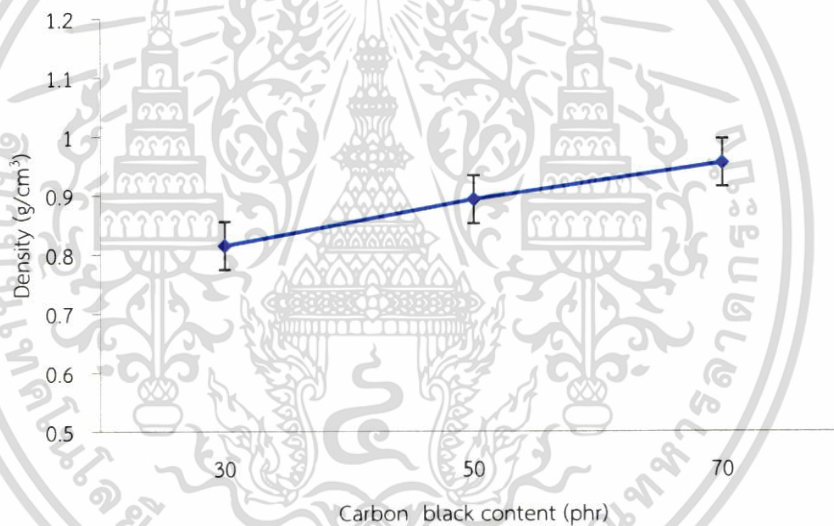
การหาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมในการเสริมให้กับท่อน้ำซีเมนนั้นเป็นสิ่งสำคัญเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงอนุภาคของเขม่าดำยึดเกาะกับสายโซโม่เลกุลของยาง ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น และอีกทั้งช่วยในเรื่องของความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้น เช่น ลดความยืดหยุ่นของไหล (Melt elasticity) ลดการบวมตัวที่หน้าหัวตาย (Die swell) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซีเมนต์หลังการขึ้นรูป นอกจากนี้เขม่าดำมีราคาถูกเป็นสารตัวเติมที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตามปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซีเมนต์ เนื่องจากเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีและอาจเกิดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่จากการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเขม่าดำเมื่อสารให้ฟองเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซ อาจเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซีเมนต์ที่ไม่เหมาะสม

จากการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางรีไซเคิลในสูตรที่มีอัตราส่วน NR:RR-50:50 นำมาศึกษาพัฒนาเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลโดยในหัวข้อนี้ใช้เขม่าดำในการเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล งานวิจัยนี้ใช้ยางรีไซเคิลเกรด UCD 105 ซึ่งทำจากยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว มีเนื้อยางประมาณร้อยละ 50 และเขม่าดำร้อยละ 30 ซึ่งในสูตร NR:RR-50:50 (โดยน้ำหนักของยาง) มีเขม่าดำจากยางรีไซเคิล 30 phr ในการศึกษาหาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมต่อการเสริมแรงให้ท่อน้ำซีเมนต์นั้นจะทำการเติมปริมาณเขม่าดำ 20 และ 40 phr ดังนั้นปริมาณเขม่าดำรวมเท่ากับ 50 และ 70 phr ตามลำดับ เพื่อหาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมต่อการเสริมแรงท่อน้ำซีเมนต์ และเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีนำมาขึ้นรูปท่อน้ำซีเมนต์เพื่อทดสอบสมบัติการซึมผ่านน้ำ

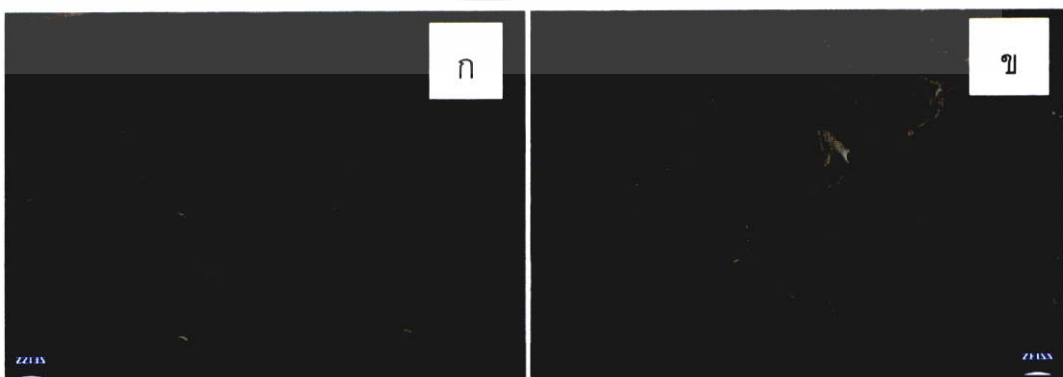
จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าความหนืดมูนีพบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำเกิดการยึดเกาะระหว่างสายโซโม่เลกุลของยางซึ่งเป็นการลดความสามารถการไหลหรือการเคลื่อนที่ของสายโซโม่เลกุลของยางส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น การใช้เขม่าดำในการเสริมแรงนั้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากเขม่าดำมีความหนาแน่นสูง ( $\rho_{cb} = 1.8 \text{ g/cm}^3$ ) เมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ ในยางผสมสูตรมีความหนาแน่นประมาณ  $\rho = 0.82 \text{ g/cm}^3$  ดังนั้นเมื่อเขม่าดำเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเขม่าดำนั้นส่งผลให้ความหนืดของยางเพิ่มขึ้นทำให้สารให้ฟองเกิดการสลายตัวเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กลง ดังรูปที่ 4.25 จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [7-8] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้นและมีอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง เนื่องจากมีความหนืดมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำทำให้สารให้ฟองเกิดการสลายตัวแล้วเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไปส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเขม่าดำเกาะตัวเป็นกลุ่มก้อน เมื่อสารให้ฟองสลายตัวเป็นก๊าซจึงทำให้เกิดการแทรกตัวระหว่างกลุ่มก้อน เขม่าดำเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน



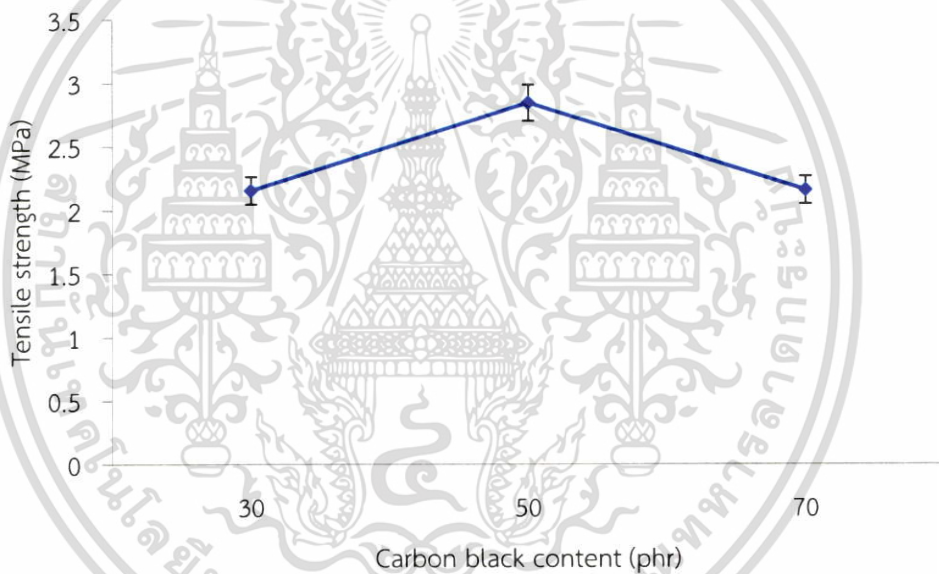
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน



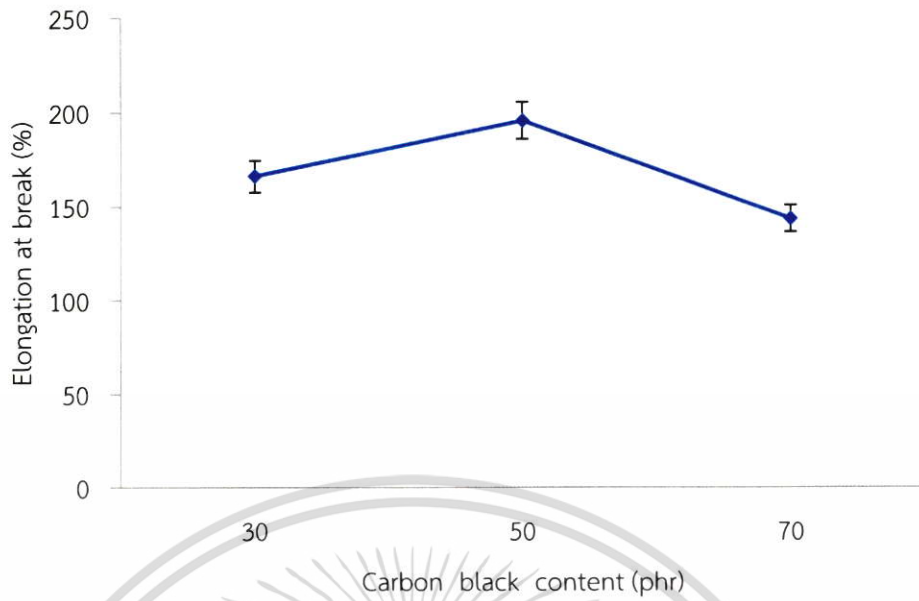
รูปที่ 4.25 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณของเขม่าดำที่แตกต่างกันที่กำลังขยาย 30 เท่า ก) เขม่าดำ 50 phr และ ข) เขม่าดำ 70 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

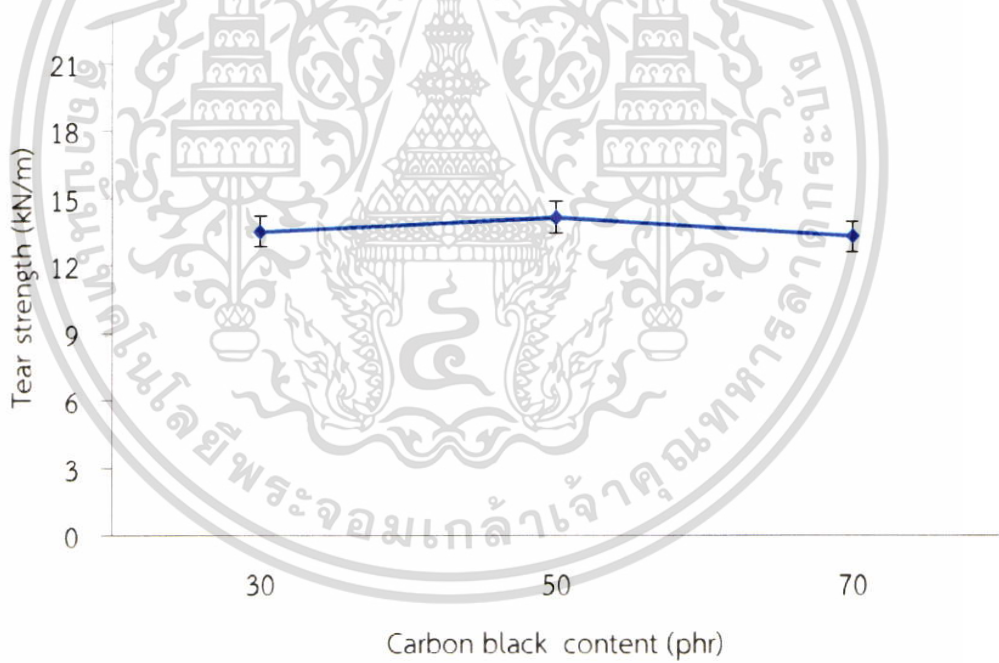
จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำที่ 50 phr ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.26-4.28 เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มมากขึ้นไปเสริมแรงให้กับยางจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเขม่าดำกับยาง โดยการยึดเกาะของยางกับพื้นผิวหรือช่องว่างของโครงสร้างเขม่าดำ (Bound rubber) เป็นผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไปที่ 70 phr ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไปเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ อาจเนื่องจากการผสมที่ไม่ดีเกิดเป็นกลุ่มก้อนของเขม่าดำขนาดใหญ่ (Agglomerates) บางส่วนในชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนสารให้ฟองเกิดการสลายตัวเกิดเป็นฟองก๊าซส่งผลให้เกิดช่องว่างที่บริเวณกลุ่มก้อนเขม่าดำเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงจึงเกิดการส่งผ่านแรงที่ไม่ดี สมบัติเชิงกลดังกล่าวจึงมีแนวโน้มลดลง แสดงภาพถ่ายดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน

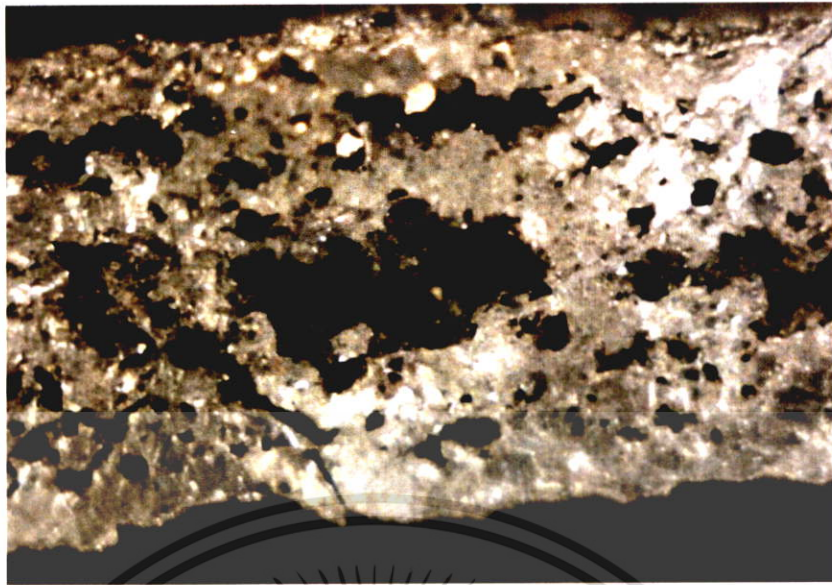


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน



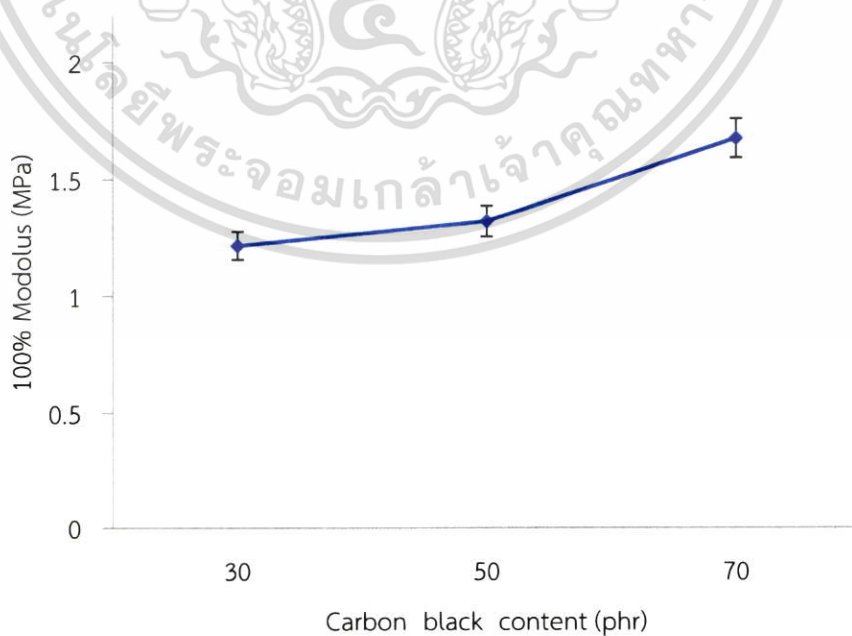
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

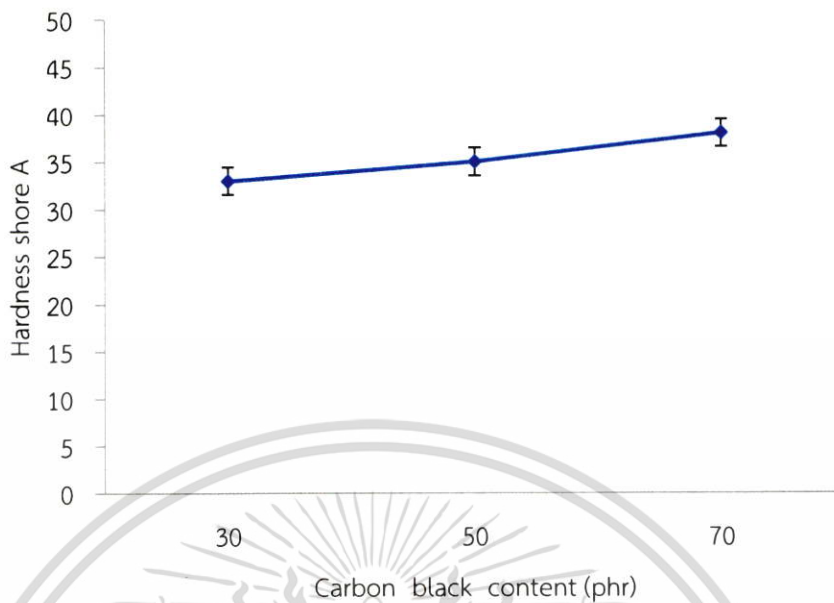


รูปที่ 2.29 ภาพถ่ายของยางผสมสูตรเมื่อเติมเขม่าดำ 70 phr แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของเขม่าดำที่ไม่ดีเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) ทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อมีการสลายตัวของก๊าซจากสารให้พอง

จากการศึกษาปริมาณเขม่าดำพบว่าค่ามอดูลัสที่ 100% และค่าความแข็งกตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ แสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 เนื่องจากเขม่าดำนั้นไปเสริมแรงให้กับยาง และเขม่าดำเป็นวัสดุที่มีความแข็งมากมอดูลัสที่มากกว่ายาง เขม่าดำจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อชิ้นงานได้รับแรงเปรียบเทียบกับยางที่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดและเปลี่ยนรูปได้ง่าย ดังนั้นปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งมากขึ้น



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

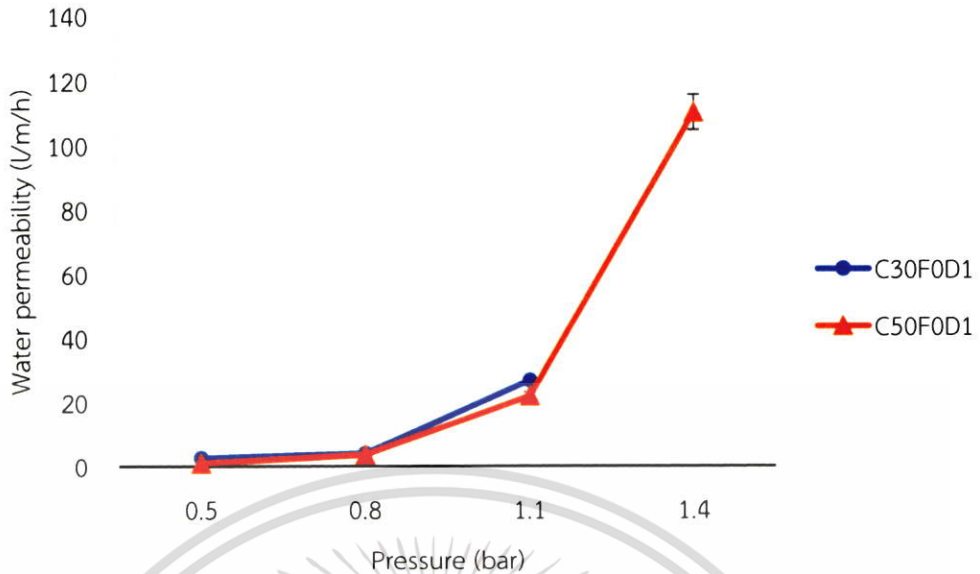


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรที่ปริมาณเขม่าดำแตกต่างกัน

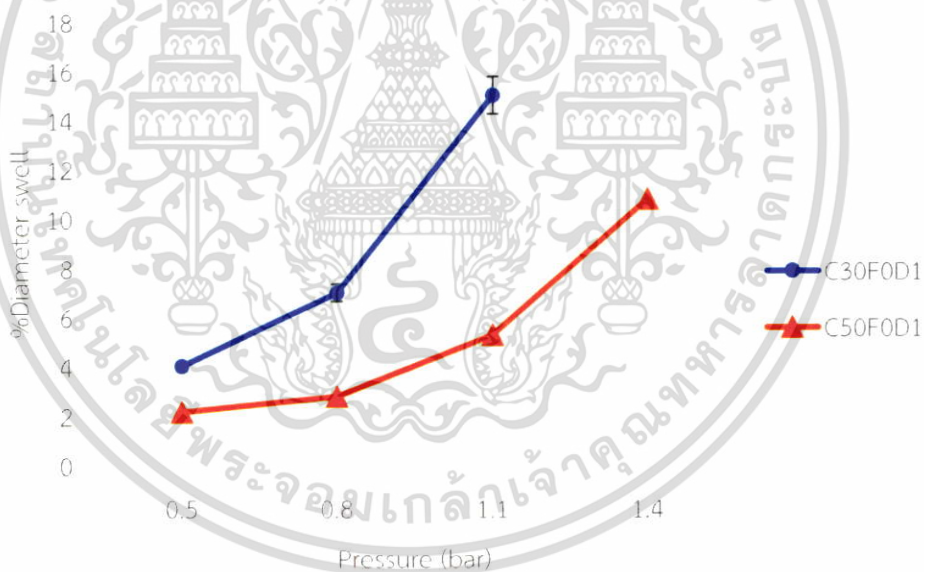
จากการศึกษาหาปริมาณเขม่าดำที่เหมาะสมเพื่อเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึม พบว่าสูตรที่ใช้ปริมาณเขม่าดำ 50 phr มีแนวโน้มสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ผนวดยืด และค่าความแข็งแรงฉีกขาดเหมาะสมต่อการนำมาขึ้นรูปท่อน้ำซึม โดยมีอัตราส่วนยางและผงยางรถยนต์ 40:60 และอัตราส่วนของยาง NR:RR-50:50 ใช้เขม่าดำในการเสริมแรง 50 phr โดยไม่ใส่เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ และควบคุมปริมาณสารให้ฟอง 1 phr มีสูตรย่อ คือ C50F0D1 เพื่อนำมาขึ้นรูปท่อน้ำซึม และนำมาทดสอบสมบัติการซึมผ่านน้ำที่ความดัน 0.5-1.4 bar และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำซึม

จากการขึ้นรูปท่อน้ำซึมโดยเลือกสูตรที่ใส่เขม่าดำเป็นสารเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึม 50 phr สูตร C50F0D1 พบว่า อัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำซึมมีความสัมพันธ์กันเมื่อเพิ่มความดันอัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำซึมมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.32 และ 4.33 เนื่องจากเมื่อเพิ่มความดันโครงสร้างรูปวงเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้น จึงทำให้น้ำสามารถซึมออกจากท่อได้มากขึ้น ที่ความดัน 0.5-0.8 bar อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 2-3 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง สาเหตุที่มีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการซึมผ่านน้ำน้อย เนื่องจากท่อขยายตัวเพียงเล็กน้อย (โครงสร้างรูปวงขยายตัวน้อย) สังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำซึม และที่ความดัน 1.1 bar มีอัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของท่อ อย่างไรก็ตามอัตราการซึมผ่านน้ำที่เพิ่มมากขึ้นถึง 20 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง ที่ความดัน 1.1 bar นั้นคาดว่าโครงสร้างรูปวงเกิดการขยายตัวและเริ่มฉีกขาด และเห็นได้ชัดที่ความดัน 1.4 bar อัตราการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้สูตรที่มีการเติมเขม่าดำ 50 phr (C50F0D1) มีอัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าสูตร C30F0D1 และทนความดันโดยที่ท่อไม่แตกที่ความดัน 1.4 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5-1.4 bar เมื่อเติมเขม่าดำ 50 phr ในสูตร C50F0D1



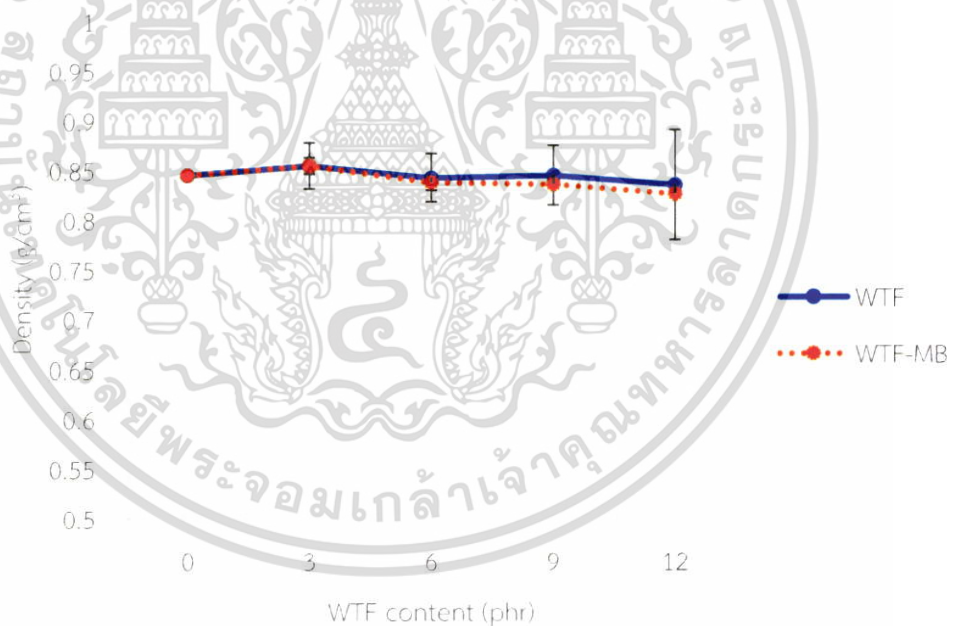
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่ความดัน 0.5-1.4 bar เมื่อเติมเขม่าดำ 50 phr ในสูตร C50F0D1

#### 4.3.2 การศึกษาปริมาณเส้นใยเสริมแรงจากยางรถยนต์

งานวิจัยนี้นำเส้นใยบดจากพลาซ (Ply) ในขณะยางรถยนต์มาใช้เพื่อเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึมโดยเส้นใยที่ใช้ในการทดลองเป็นเส้นใยสั้น มีความยาวประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และความกว้าง 0.014-0.017 มิลลิเมตร เป็นเส้นใยไนลอน 6 (Nylon6) ตรวจวิเคราะห์ลักษณะทางความร้อนด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) และ Differential scanning calorimeters (DSC) แสดงดังภาคผนวก ข ดังรูปที่ ข.1 และ ข.2 ตามลำดับ ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

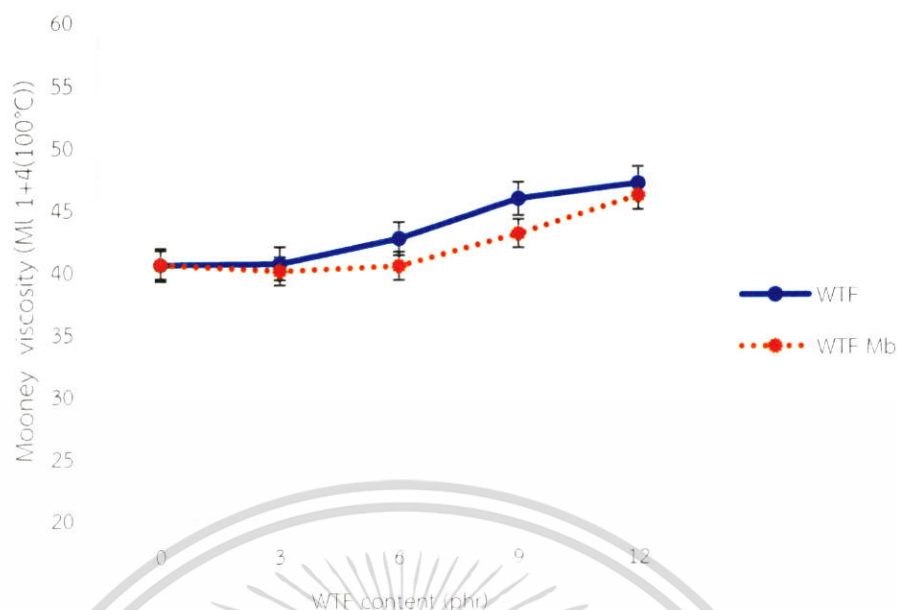
วิธีการใช้เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ (Waste tire fiber, WTF) เช่น การนำ WTF มาใช้โดยตรง เปรียบเทียบกับการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของเส้นใยและง่ายต่อการผสม และการใช้งาน โดยศึกษาปริมาณเส้นใย 0-12 phr เพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล โดยมีอัตราส่วนยางและผงยางรถยนต์ 30 เมช คือ 40:60 (โดยน้ำหนักเทียบกับยาง) และมีอัตราส่วน NR:RR-50:50 (โดยน้ำหนักของยาง) โดยมีเขม่าดำที่มาจากอัตราส่วนยางรีเคลม 30 phr และใส่สารให้ฟอง 1 phr จากนั้นวิเคราะห์สมบัติเชิงกลเพื่อเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลสูงนำไปขึ้นรูปที่น้ำซึ่มเพื่อทำการทดสอบ อัตราการซึ่มผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านจุดศูนย์กลางต่อไป

จากการใช้เส้นใยจากขยะยางรถยนต์เสริมแรงให้กับวัสดุพบว่าความหนาแน่นมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 4.34 เนื่องจากปริมาณการใช้เส้นใยในการทดลองมีการใส่ไปในยางผสม สูตรปริมาณน้อยและความหนาแน่นของเส้นใยมีค่า  $1.14 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เขม่าดำในการเสริมแรง (ความหนาแน่นเขม่าดำ  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) อย่างไรก็ตาม การเสริมแรงด้วยเส้นใยนั้นส่งผลให้ความหนืดของยางผสมสูตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยสามารถเสริมแรงให้กับยาง และเส้นใยนั้นมีความแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับยางเสมือนเป็นการต้านการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยาง จึงทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.35



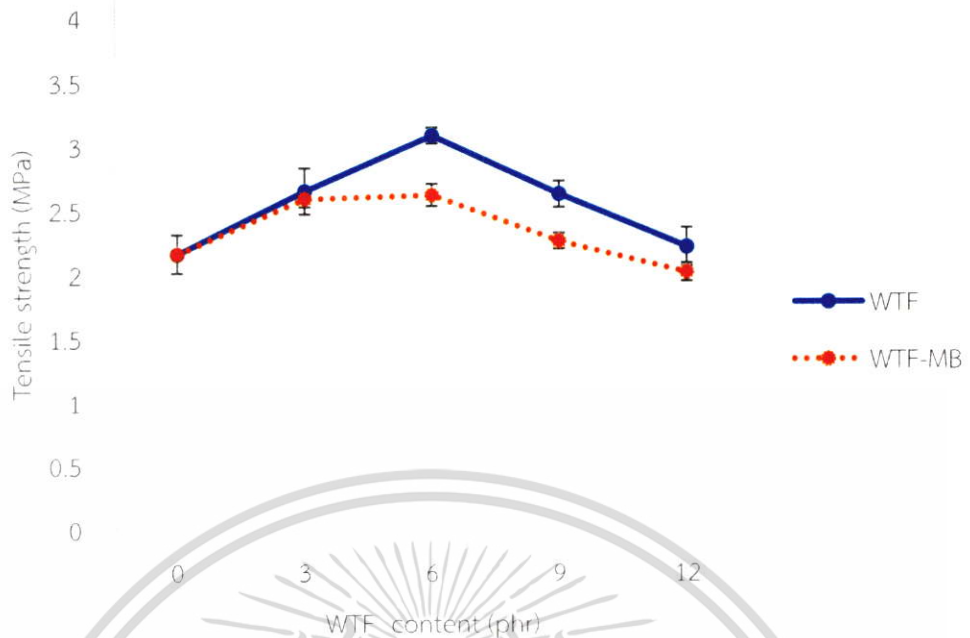
**รูปที่ 4.34** ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

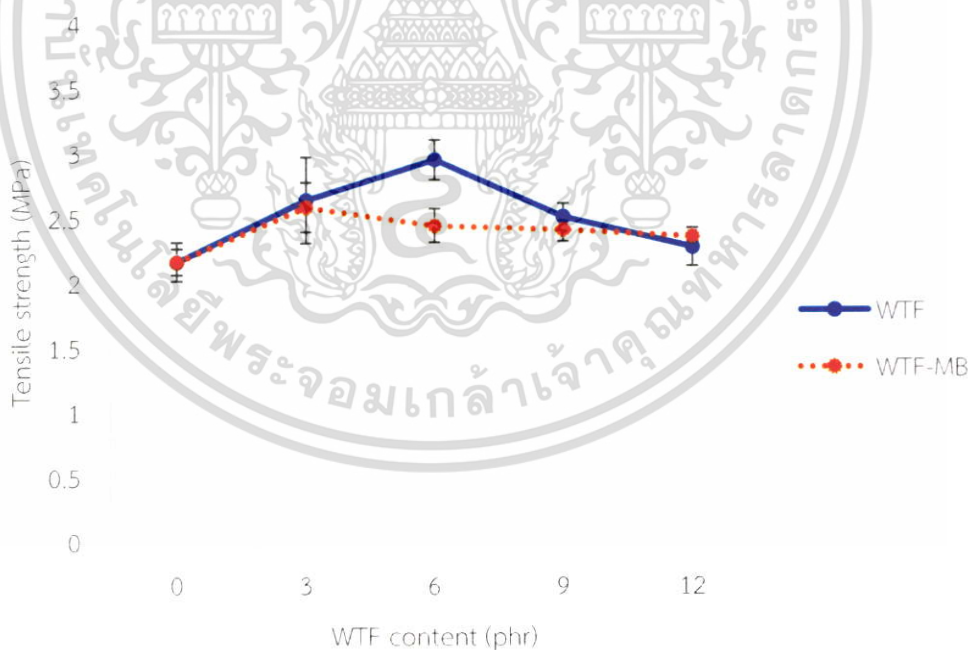


รูปที่ 4.35 ค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียม มาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาวิธีการนำเส้นใยจากขยะยางรถยนต์มาใช้เสริมแรงให้กับชิ้นงานพบว่าทั้งวิธีการ นำเส้นใยมาใช้โดยตรง และวิธีการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใยมีความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์ การยืด ๓ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึง 6 phr และลดลง แสดงดังรูป 4.36- 4.41 เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยในการเสริมแรงยางหรือเมทริกซ์สามารถส่งผ่านแรงมาที่เส้นใย ได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเส้นใยมากเกินไปอาจเกิดปัญหาการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่ดีเกิด การกระจุกตัวเป็นกลุ่มก้อน ส่งผลให้เมทริกซ์ไม่สามารถล้อมรอบเส้นใยได้ทั่วถึงเกิดเป็นช่องว่าง แสดง ลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยจากภาพถ่าย SEM ดังรูปที่ 4.42 และ 4.43 เมื่อชิ้นงานได้รับแรง ทำให้เกิดการส่งผ่านแรงที่ไม่ดีสมบัติเชิงกลดังที่กล่าวข้างต้นจึงมีแนวโน้มลดลง ทั้งการนำเส้นใยมาใช้ โดยตรง และวิธีการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย อย่างไรก็ตามวิธีการนำเส้นใยมาใช้ในการเสริมแรงทั้ง 2 วิธี มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอาจเนื่องมาจากงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยในปริมาณที่น้อย จึงไม่เห็น ความแตกต่างของวิธีการทำมาสเตอร์แบทช์เพื่อช่วยในการกระจายตัวของเส้นใยได้ชัดเจน และการใช้ เส้นใยในการเสริมแรงให้กับชิ้นงานพบว่าเกิดการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักรไม่แตกต่าง กันกับทิศทางขวางแนวเครื่องจักร

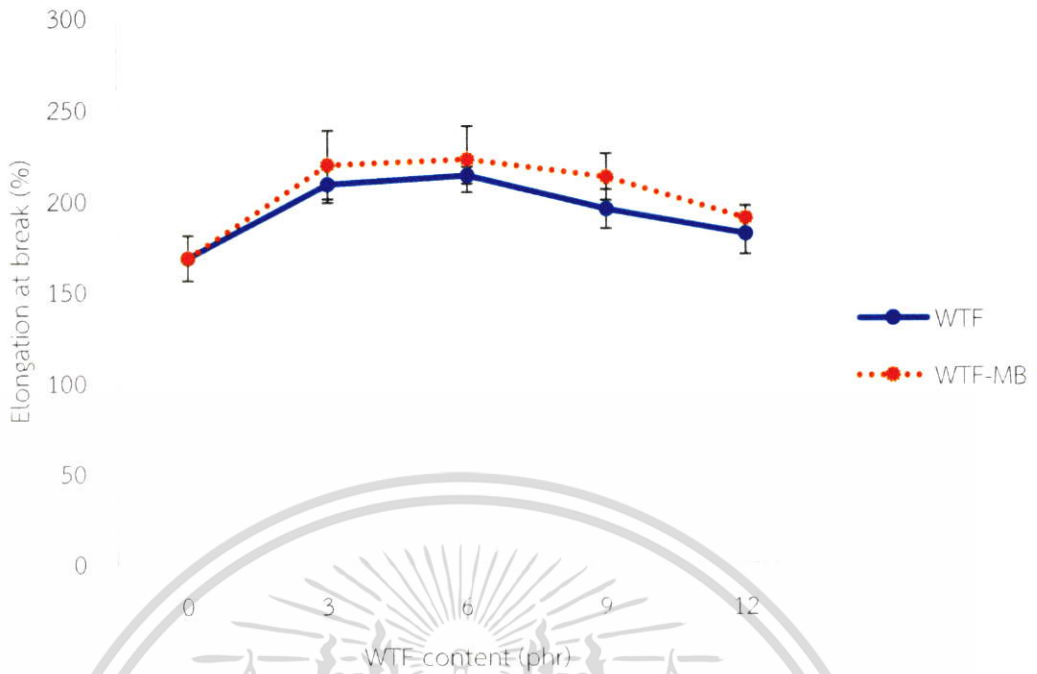


**รูปที่ 4.36** ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียม มาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางตาม แนวเครื่องจักร (Mechine direction)

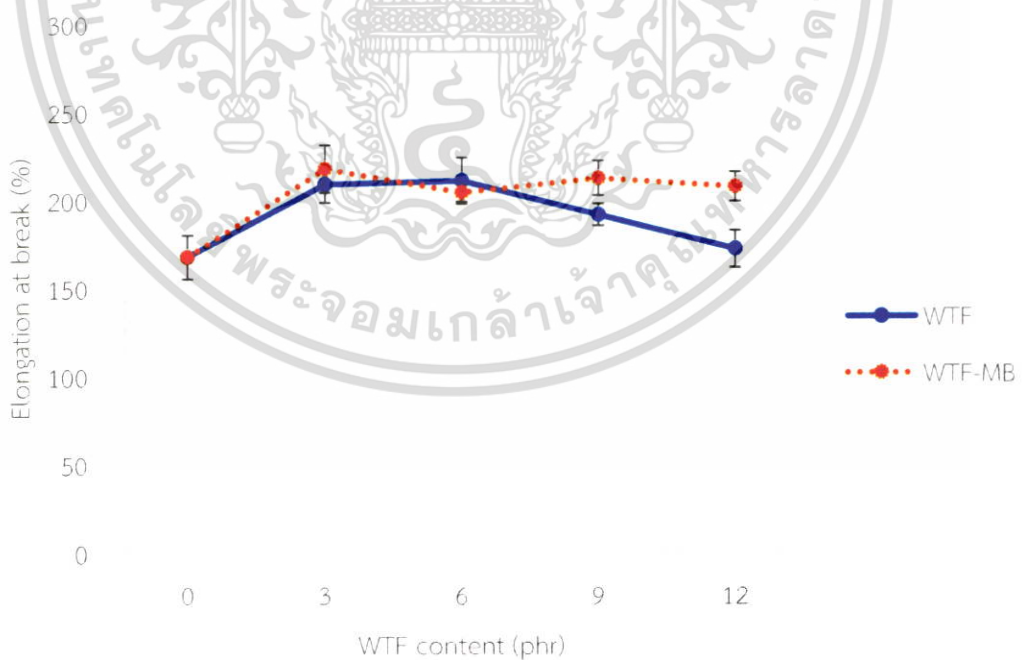


**รูปที่ 4.37** ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียม มาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางขวาง แนวเครื่องจักร (Tranverse direction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

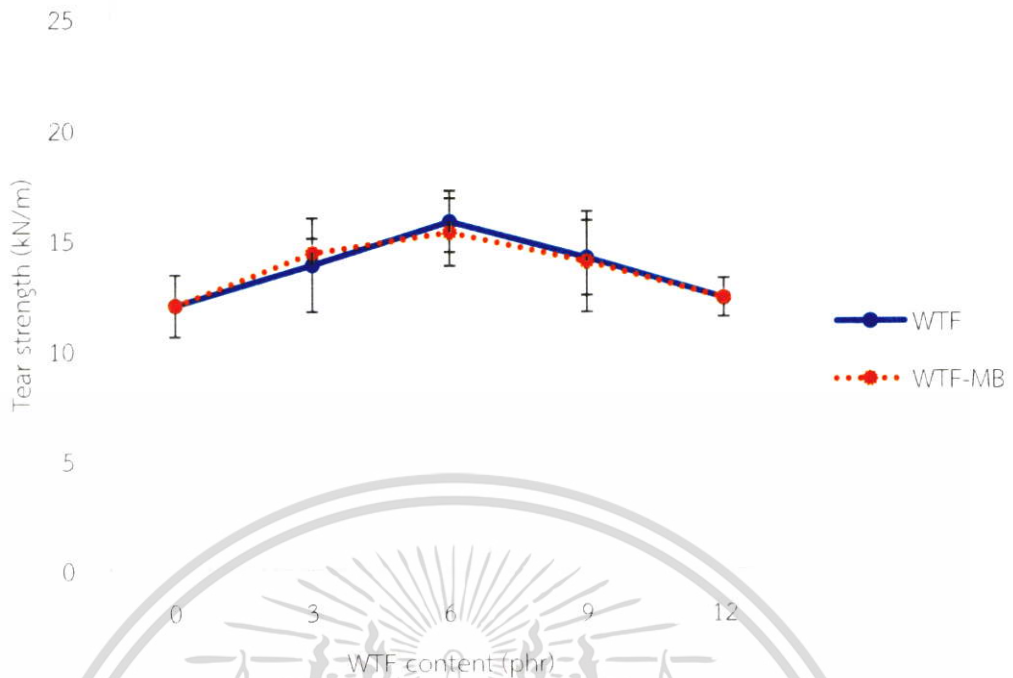


**รูปที่ 4.38** ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction)

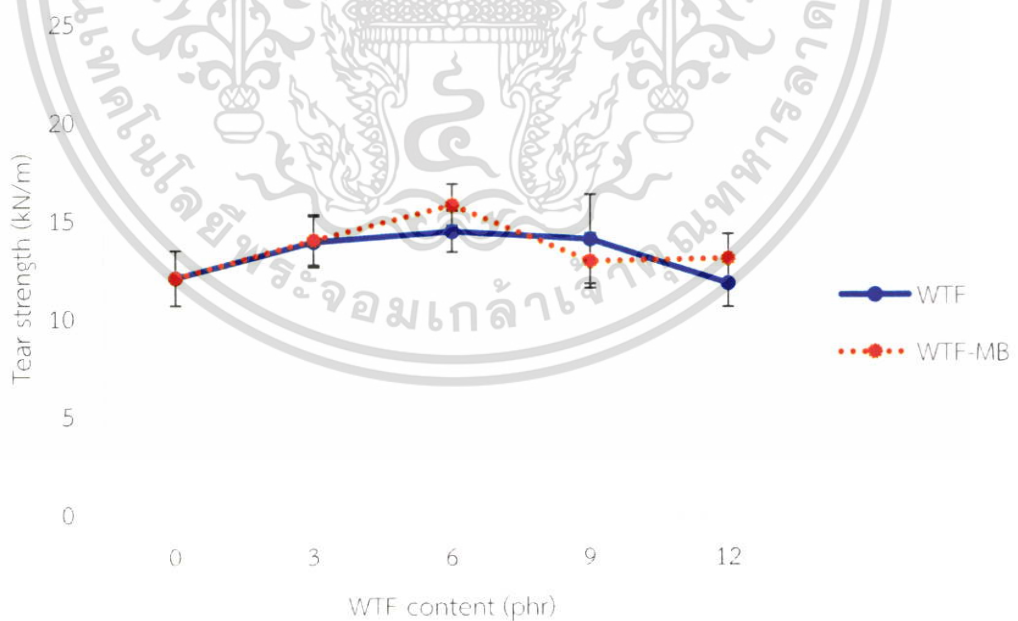


**รูปที่ 4.39** ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (Transverse direction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

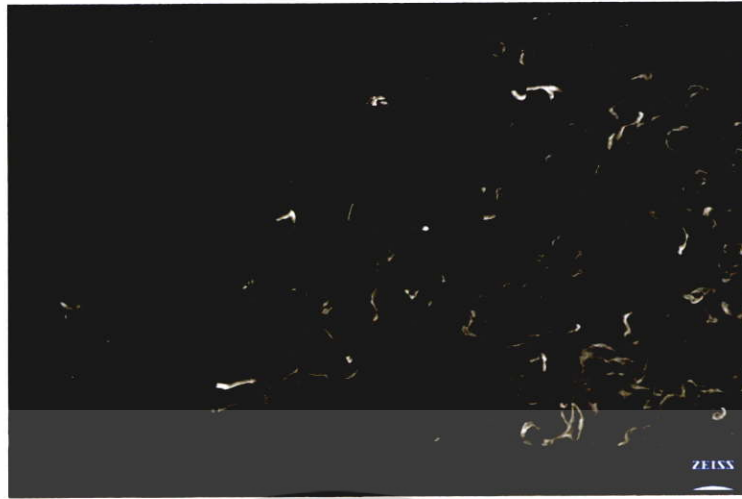


**รูปที่ 4.40** ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction)



**รูปที่ 4.41** ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (Transverse direction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

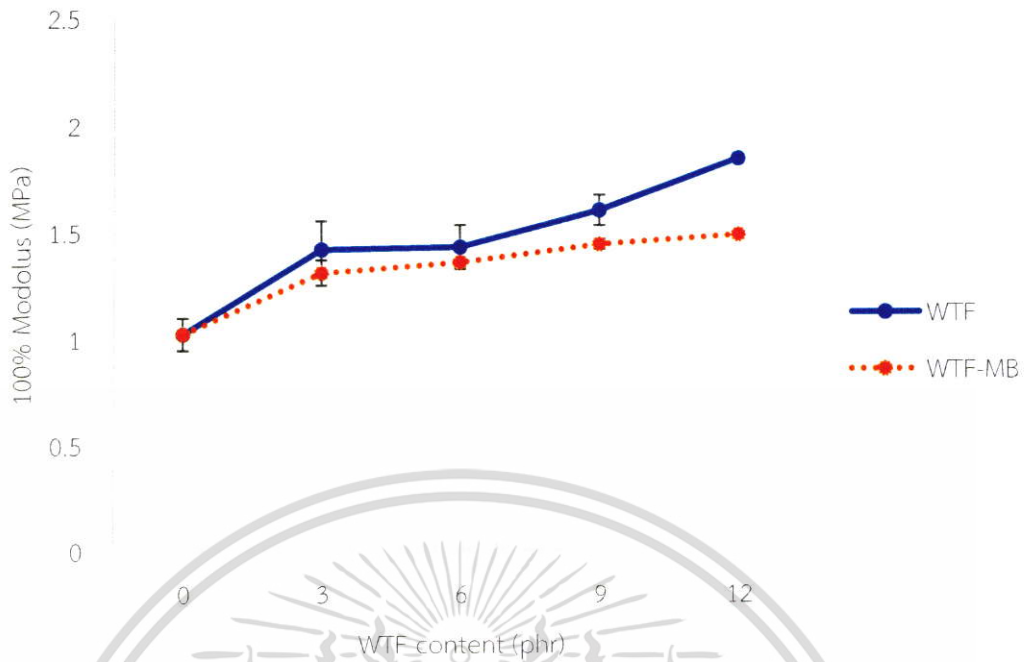


รูปที่ 4.42 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยจาก  
ขยะยางรถยนต์ 6 phr ที่กำลังขยาย 30 เท่า

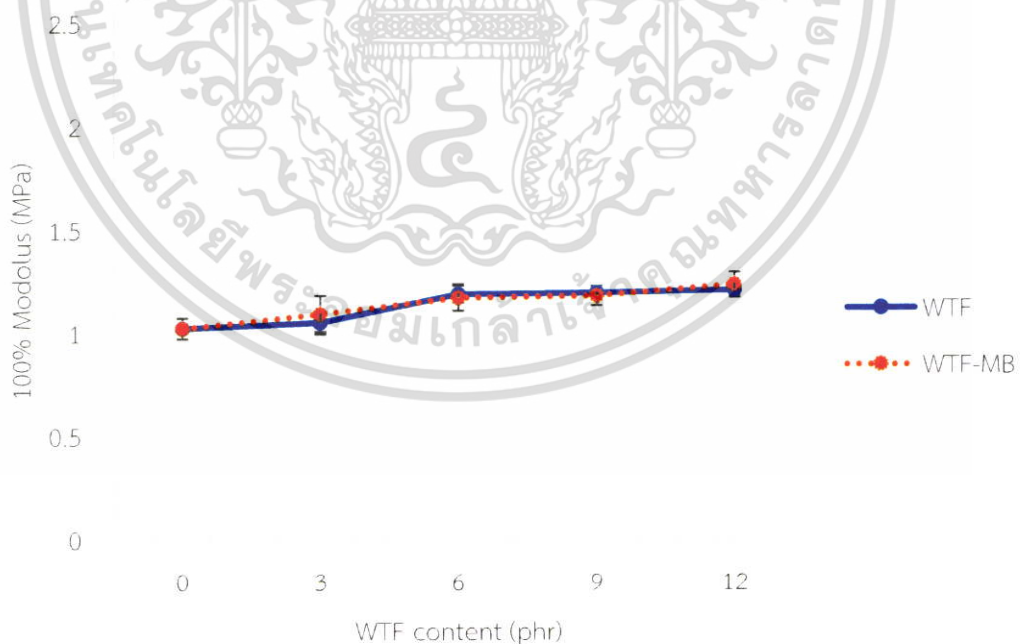


รูปที่ 4.43 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยจาก  
ขยะยางรถยนต์ 12 phr ที่กำลังขยาย 30 เท่า

จากการใช้เส้นใยเสริมแรงให้กับวัสดุพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้ค่ามอดุลัสที่ 100% และความแข็งแรงตมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.44-4.46 เนื่องจากเส้นใยที่ใส่ไปในยางผสมสูตรนั้นสามารถเสริมแรงให้กับวัสดุมีความแข็งแรง และความแข็งแรงมากกว่ายางซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อยต่างจากยางที่เป็นเมทริกซ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากกว่า ทั้งนี้เส้นใยที่เป็นของแข็งทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นเปรียบเสมือนการต้านการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลจึงส่งผลให้ค่ามอดุลัสที่ 100% และค่าความแข็งแรงตมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

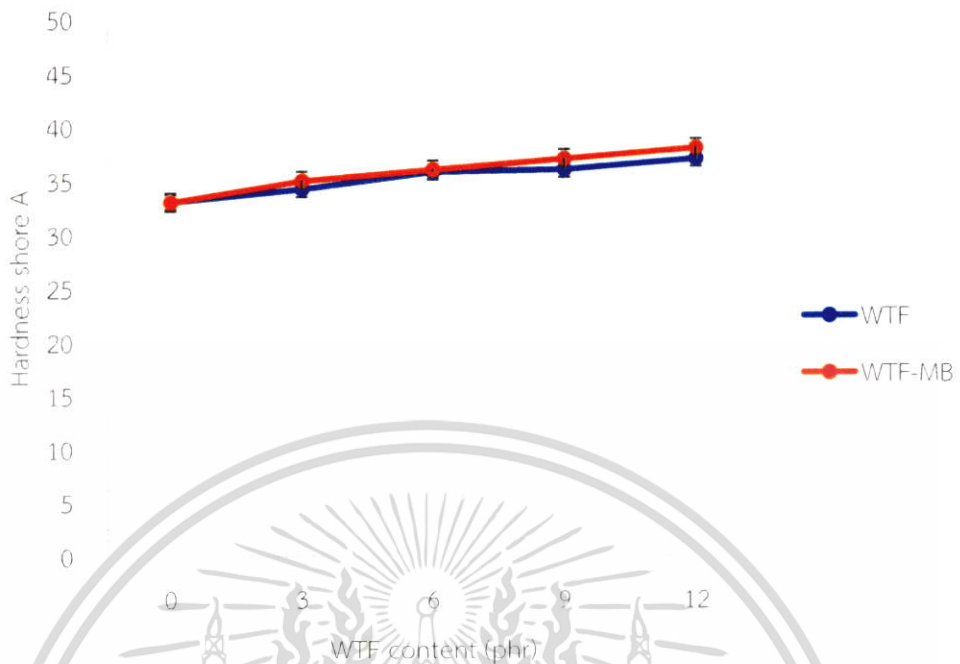


**รูปที่ 4.44** ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Mechine direction)



**รูปที่ 4.45** ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกันในทิศทางขวางแนวเครื่องจักร (Tranverse direction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.46** ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรของวิธีการใช้เส้นใยโดยตรง (WTF) และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย (WTF-MB) ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

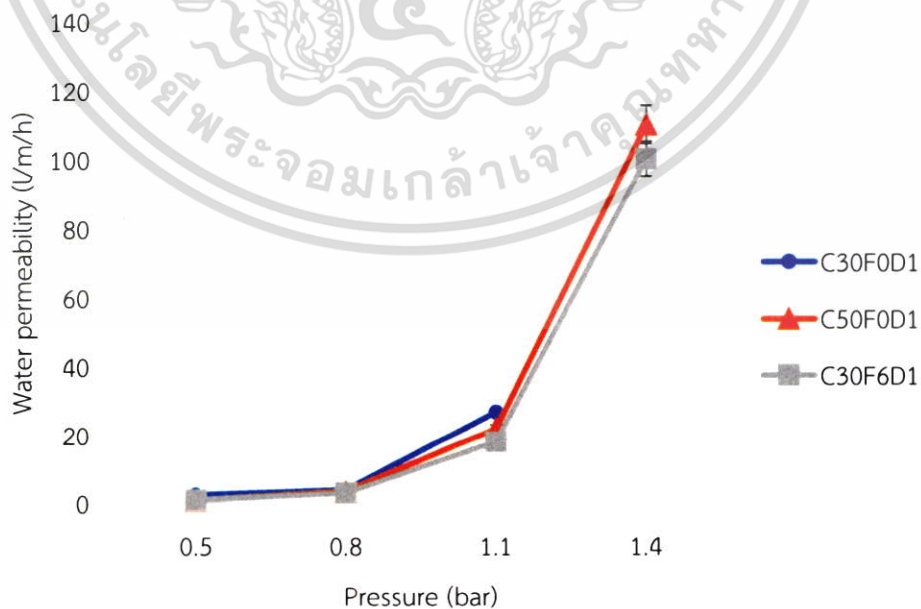
จากการศึกษาวิธีการใช้เส้นใยเพื่อเสริมแรงให้กับยางผสมสูตรทั้ง วิธีการนำเส้นใยไปใช้โดยตรง และการเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย พบว่าค่าสมบัติเชิงกลของทั้ง 2 วิธีนี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด และค่ามอดูลัสที่ 100% ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เส้นใยที่เตรียมเป็นมาสเตอร์แบทช์นำไปผสมกับยางผสมสูตรเพื่อขึ้นรูปท่อน้ำซึม เนื่องจากการเตรียมเส้นใยเป็นมาสเตอร์แบทช์นั้นสะดวกต่อการใช้งานเพราะเส้นใยสามารถดูดความชื้นได้ เมื่อเตรียมเส้นใยเป็นมาสเตอร์แบทช์จึงไม่ต้องทำการอบเส้นใยอีกครั้งเมื่อต้องการนำมาใช้งาน เนื่องจากยางล้อมรอบเส้นใยจึงสามารถลดการดูดความชื้นได้ และนอกจากนี้ยังลดการฟุ้งกระจายของเส้นใยสะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น การศึกษาปริมาณเส้นใยเพื่อเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึมพบว่าปริมาณเส้นใยที่ 6 phr ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด และค่ามอดูลัสที่ 100% ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกปริมาณการใช้เส้นใย 6 phr ขึ้นรูปท่อน้ำซึมเพื่อนำมาทดสอบสมบัติการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม

จากการนำเส้นใยจากขยะยางรถยนต์มาเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึมโดยใช้เส้นใยที่ผ่านการเตรียมเป็นมาสเตอร์แบทช์ปริมาณ 6 phr (C30F6D1) พบว่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เขม่าดำในการเสริมแรง (C50F0D1) เนื่องจากมีแนวโน้มค่ามอดูลัสที่ 100% มากกว่าเขม่าดำเล็กน้อย อัตราการซึมผ่านน้ำนั้นสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม แสดงดังรูปที่ 4.47 และ 4.48 เมื่อเพิ่มความดันท่อน้ำซึมเกิดการขยายตัวและอัตราการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้น สังเกตที่ความดัน 0.5-0.8 bar มีอัตราการซึมผ่านน้ำ 3-6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มความดันเกิน 0.8 bar พบว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

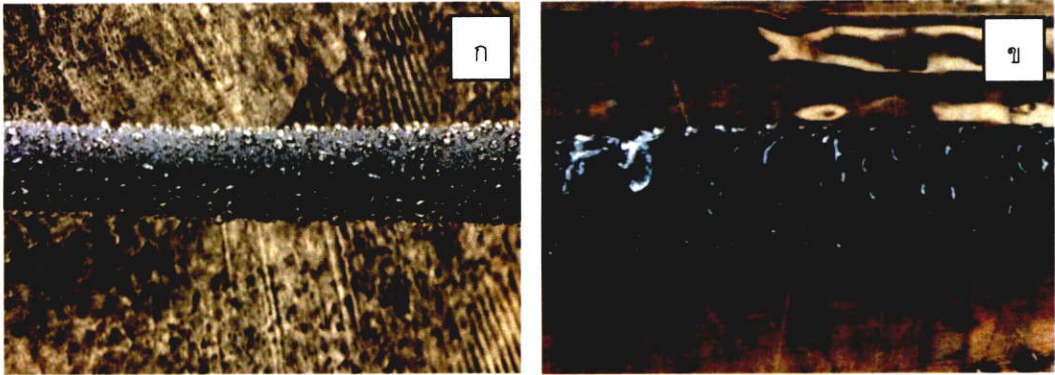
อัตราการซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากคาดว่าเมื่อเพิ่มความดัน 1.1 bar ท่อน้ำซึมเกิดการขยายตัวทำให้โครงสร้างรูพรุนเกิดการขยายตัวและเริ่มฉีกขาดทำให้อัตราการซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ความดัน 1.4 bar ดังรูปที่ 4.49 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงหาปริมาณการใส่สารเสริมแรงร่วมกันระหว่างเขม่าดำ และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นต่อไป



รูปที่ 4.47 ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมเสริมแรงด้วยเส้นใยจากวิธีการทำมาสเตอร์แบทซ์เส้นใยเปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมเสริมแรงด้วยเขม่าดำ



รูปที่ 4.48 ค่าการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมเสริมแรงด้วยเส้นใยจากวิธีการทำมาสเตอร์แบทซ์ เส้นใยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่เปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมเสริมแรงด้วยเขม่าดำ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 ภาพถ่ายท่อน้ำซึมนสูตร C30F6D1 เมื่อเพิ่มความดัน ก) 0.8 bar และ ข) 1.4 bar

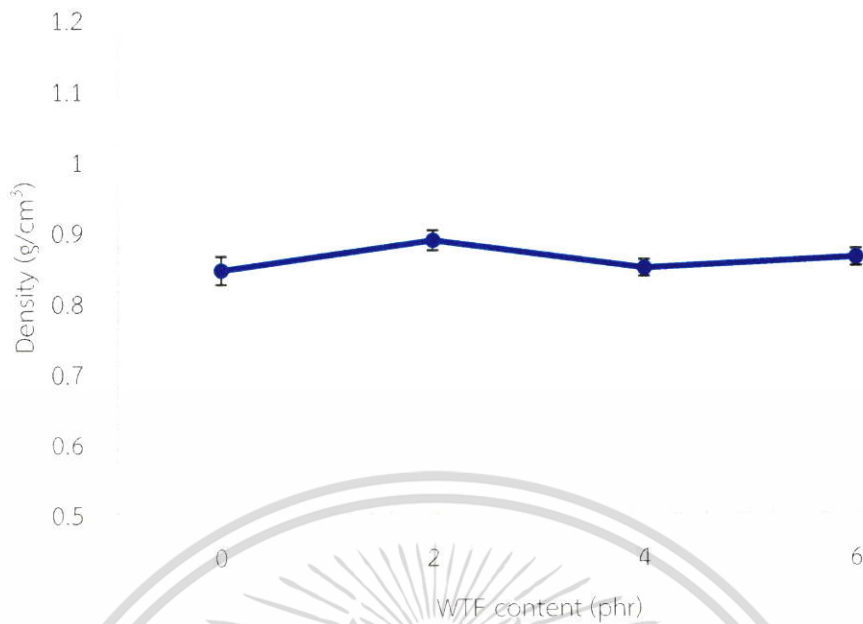
#### 4.3.3 การศึกษาปริมาณเขม่าดำร่วมกับ WTF

จากการศึกษาปริมาณเขม่าดำในหัวข้อ 4.3.1 เขม่าดำสามารถเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึมนสามารถทนแรงดันน้ำ และลดการขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อน้ำซึมนทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลง แต่การใช้ปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไปทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีทำให้สมบัติบางประการลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ผน จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด ดังนั้นจึงควบคุมปริมาณเขม่าดำ 50 phr นอกจากนี้การศึกษานี้เป็นการศึกษาปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ในหัวข้อ 4.3.2 พบว่าการใช้เส้นใยเพียงเล็กน้อยสามารถเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึมนได้มากกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณเขม่าดำ เนื่องจากเส้นใยมี Aspect ratio ที่มากกว่า ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงศึกษาปริมาณเส้นใยร่วมกับเขม่าดำ โดยมีอัตราส่วนยางและผงยางรถยนต์ 30 เมช เท่ากับ 40:60 และมีอัตราส่วน NR:RR-50:50 โดยควบคุมปริมาณการใช้สารให้ฟอง 1 phr จากนั้นนำสูตรที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดไปขึ้นรูปท่อน้ำซึมนเพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำต่อไป

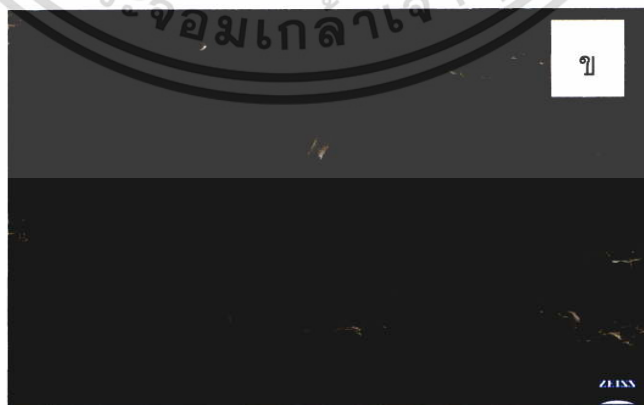
การใช้เส้นใยและเขม่าดำในการเสริมแรงนั้นมีปริมาณการใช้ที่จำกัดในการเสริมแรงกล่าว คือ การใช้เขม่าดำถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปอาจเกิดเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ อาจเนื่องจากประสิทธิภาพในการผสมยางหรืออย่างไม่สามารถล้อมรอบเขม่าดำได้ที่ปริมาณเขม่าดำมากเกินไป เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนสารให้ฟองเกิดก๊าซแทรกออกมาระหว่างวิทยุภาคยางและสารตัวเติม เช่น ผงยางรถยนต์ เขม่าดำ และเส้นใย ดังนั้นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของเขม่าดำมีโอกาสที่จะเกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่เมื่อก๊าซเกิดการแทรกระหว่างวิทยุภาคยาง และสารตัวเติมต่าง ๆ เช่นเดียวกับการใช้เส้นใยเมื่อเส้นใยมีปริมาณมากเกินไปเกิดการพันกันเป็นกลุ่มก้อน ยางไม่สามารถล้อมรอบเส้นใยได้ทั้งหมดเกิดช่องว่างระหว่างวิทยุภาคยางและเส้นใย เมื่อได้รับแรงเมทริกซ์จึงไม่สามารถส่งผ่านแรงมาที่เส้นใยได้ดีพอจึงมีสมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นจึงต้องหาปริมาณการใช้สารเสริมแรงในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด

จากการศึกษาการเสริมแรงเขม่าดำร่วมกับเส้นใย พบว่าความหนาแน่นมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ดังรูปที่ 4.50 เนื่องจากความหนาแน่นของเส้นใยในการทดลองมีการใส่ในปริมาณน้อย และมีความหนาแน่นประมาณ  $1.14 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เขม่าดำในการเสริมแรง (ความหนาแน่นเขม่าดำ  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) แสดงให้เห็นวิถียของการเสริมแรงด้วยเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ ดังรูปที่ 4.51 อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลต่อความหนืดมูนนี้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.52 เนื่องจากเส้นใยสามารถเสริมแรงให้กับชิ้นงาน และด้านการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

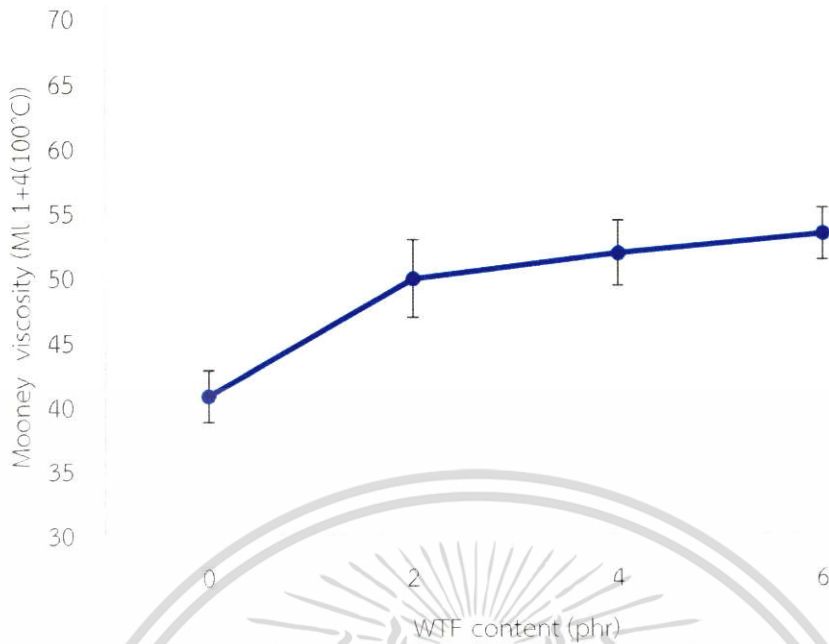


รูปที่ 4.50 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรจากการศึกษาเข้ามาดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน



รูปที่ 4.51 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วยเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่กำลังขยาย 100 เท่า ก) WTF 4 phr และ ข) WTF 6 phr

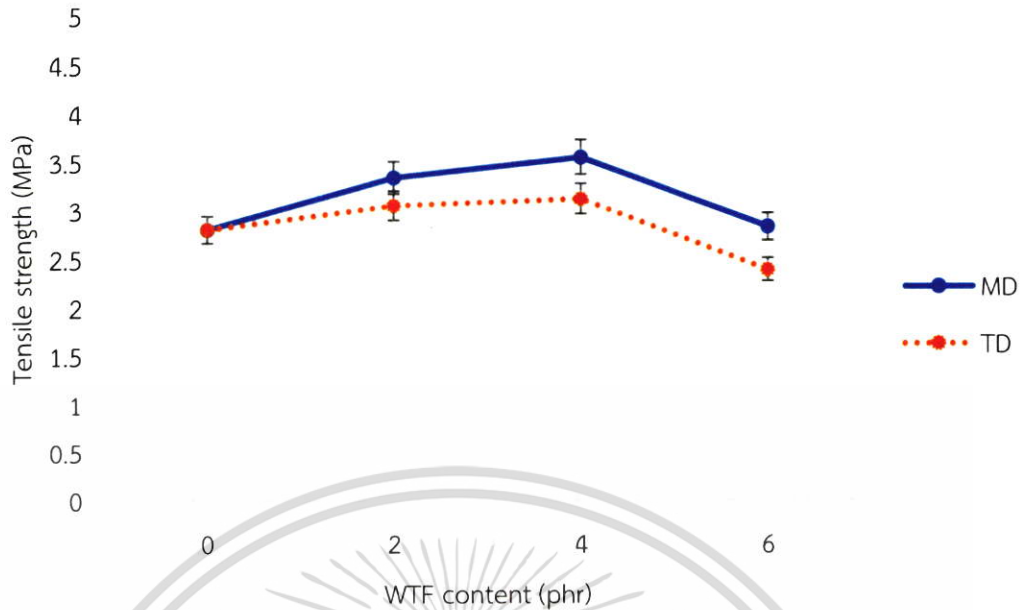
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



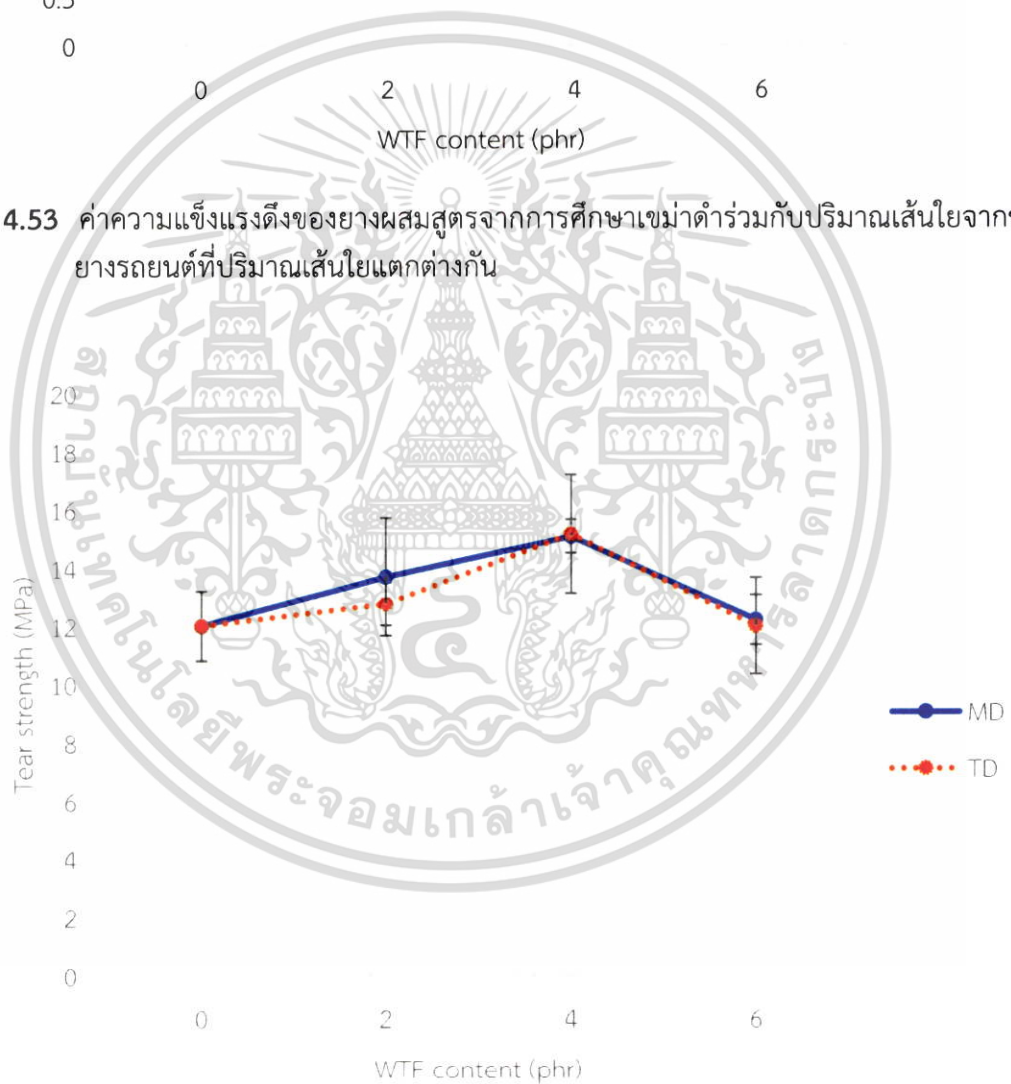
**รูปที่ 4.52** ค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

จากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับเส้นใยจากขยะยางรถยนต์โดยควบคุมปริมาณเขม่าดำที่ปริมาณ 50 phr และศึกษาปริมาณเส้นใย 2, 4 และ 6 phr เพื่อดูอิทธิพลของการเสริมแรงที่มีต่อสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจนถึง 4 phr ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และลดลงที่ 6 phr แสดงดังรูปที่ 4.53 และ 4.54 เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจนถึง 4 phr ยางสามารถรับ และกระจายแรงมาที่เส้นใยกับเขม่าดำได้ดีทำให้ค่าสมบัติเชิงกลดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 6 phr ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำและเส้นใยเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงสามารถเสริมแรงให้กับชิ้นงานได้แต่เมื่อมีสารเสริมแรงที่มากเกินไปอาจเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้ชิ้นงานในส่วนที่เป็นยางหรือเมทริกซ์ไม่สามารถห่อหุ้มสารเสริมแรงทั้งเขม่าดำ และเส้นใยได้ทั้งหมดอาจทำให้เกิดช่องว่างระหว่างภูมิภาคในชิ้นงานได้ง่ายโดยเฉพาะชิ้นงานนี้มีลักษณะเป็นรูพรุนจึงทำให้เกิดการส่งผ่านแรงที่ไม่ดี เช่นเดียวกับค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเมื่อเพิ่มเส้นใย 2 phr มีแนวโน้มค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเส้นใยมากกว่า 2 phr แสดงดังรูปที่ 4.55 จากการใช้เส้นใยในการเสริมแรง พบว่ามีการจัดเรียงตัวของเส้นใยแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทิศทางตามแนวเครื่องจักร และทิศทางขวางเครื่องจักร

จากการใช้เขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์เสริมแรงให้กับชิ้นงาน พบว่าส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกด และค่ามอดูลัสที่ 100% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.56 และ 4.57 เนื่องจากการเสริมแรงของเขม่าดำ และเส้นใยสารเสริมแรงเหล่านี้มีความแข็งแรงสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดได้น้อยกว่ายาง เมื่อสารเสริมแรงเหล่านี้เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกด และมอดูลัสที่ 100% เพิ่มขึ้น วัสดุสามารถเปลี่ยนรูปร่างหรือขนาดได้น้อยลง

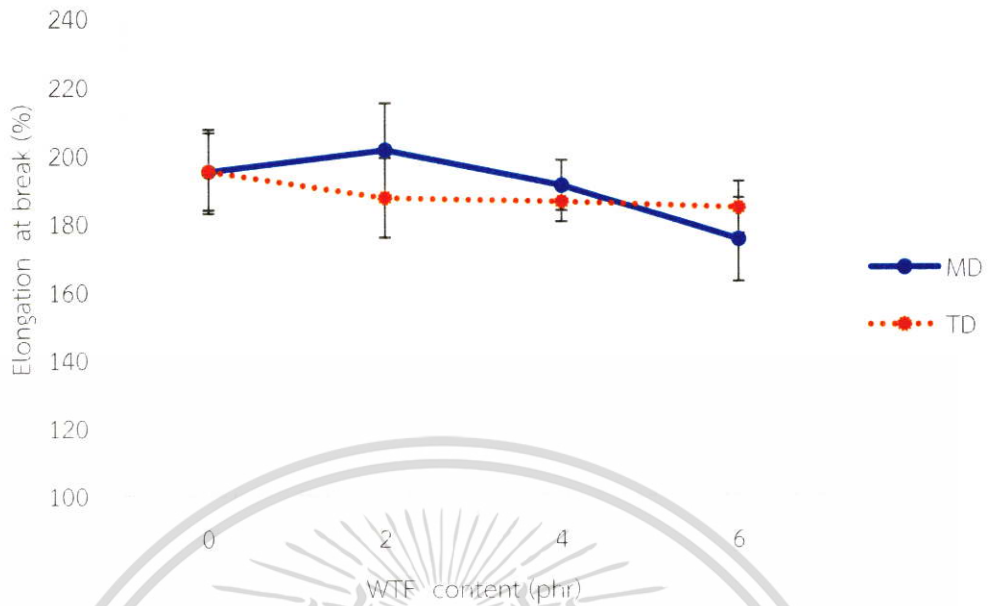


รูปที่ 4.53 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรจากการศึกษาเคมีดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

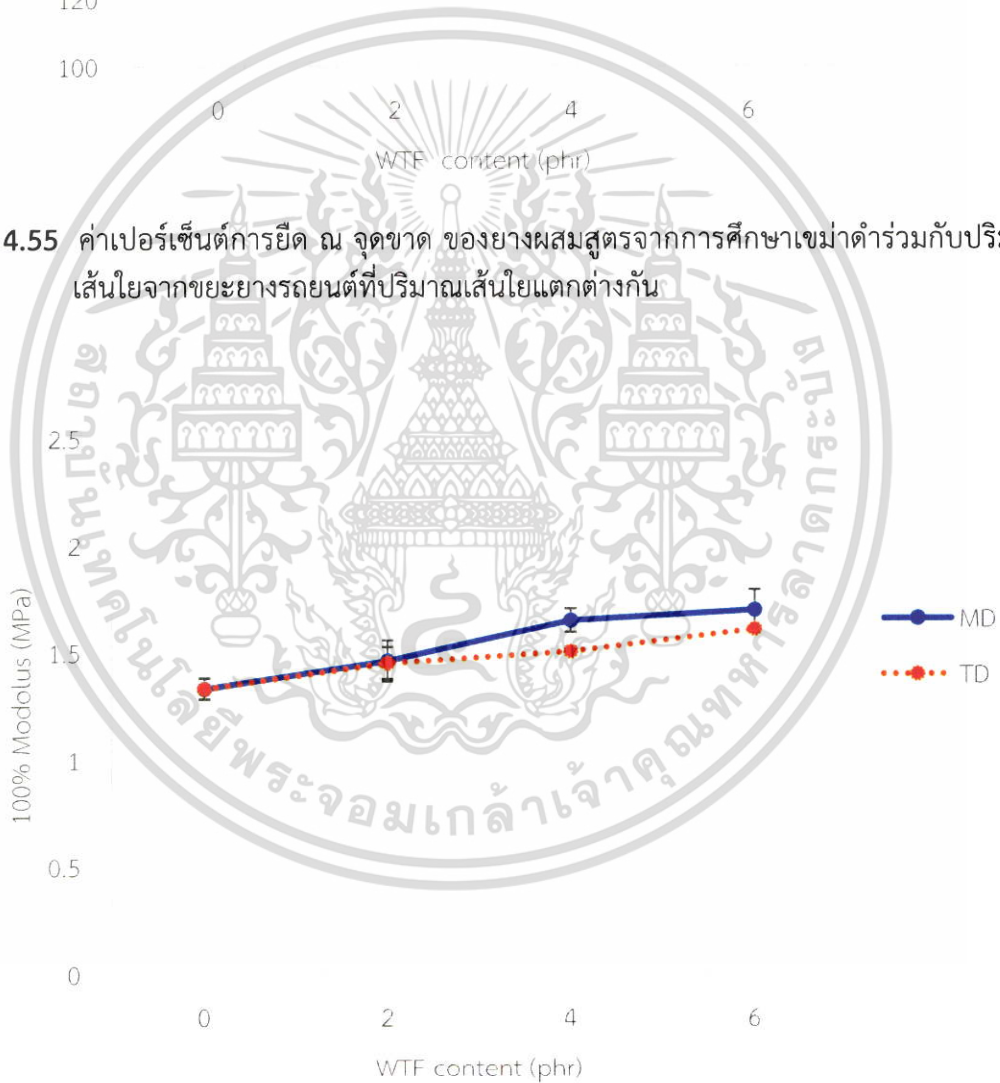


รูปที่ 4.54 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาเคมีดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

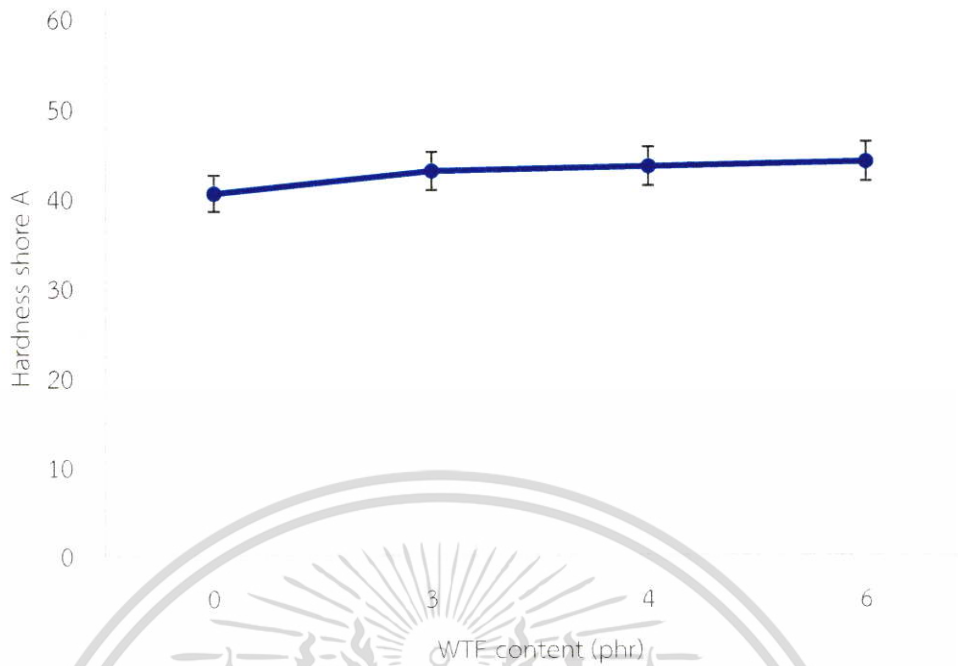


รูปที่ 4.55 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตรจากการศึกษาเคมีดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน



รูปที่ 4.56 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรจากการศึกษาเคมีดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

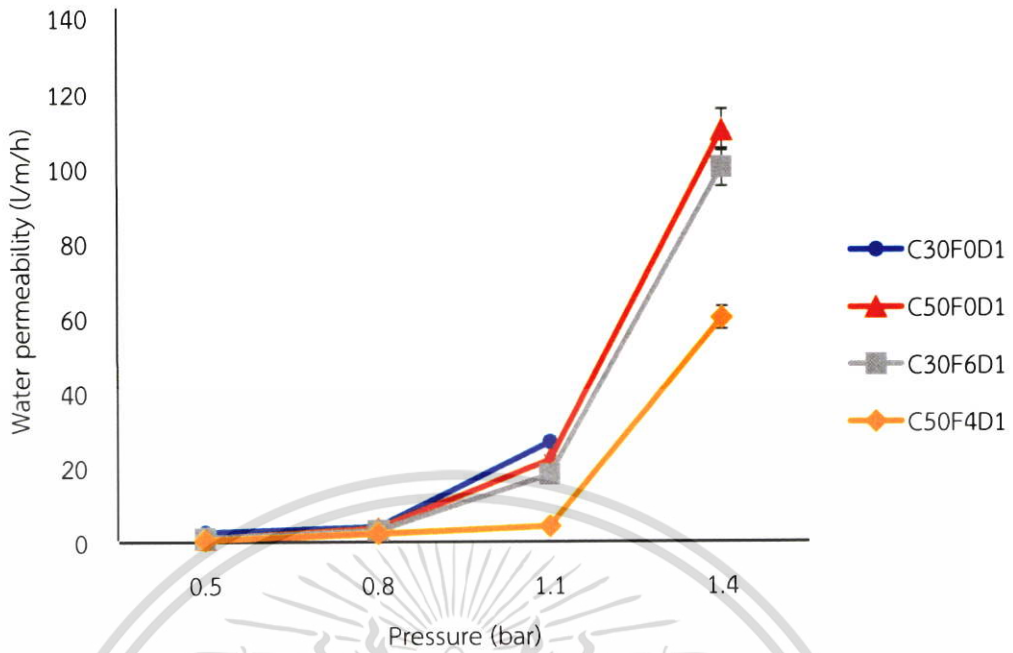
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



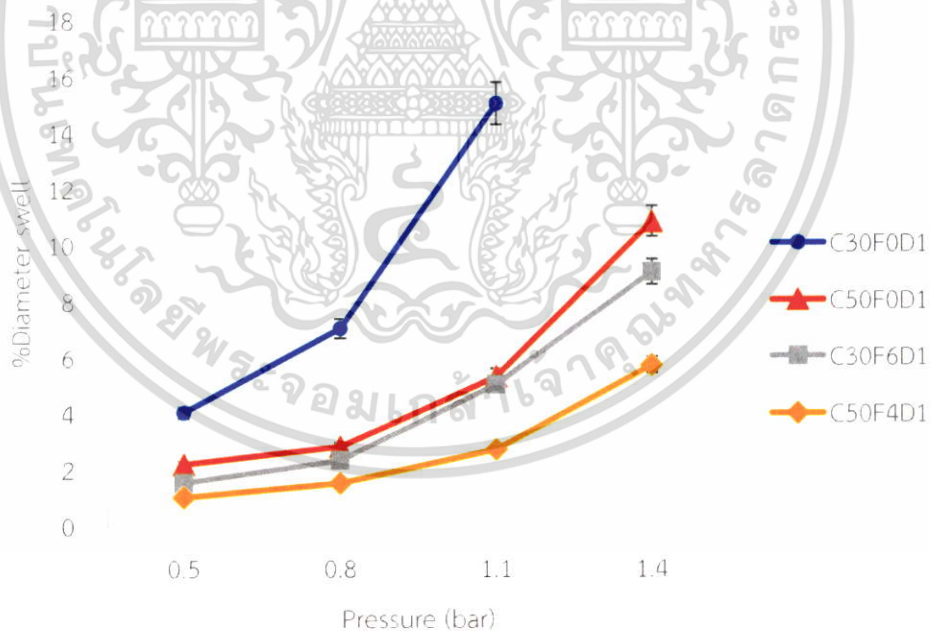
**รูปที่ 4.57** ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรจากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับปริมาณเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ที่ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน

จากการศึกษาเขม่าดำร่วมกับการใช้เส้นใยเสริมแรงจากขยะยางรถยนต์พบว่าสูตรที่มีการใช้ปริมาณเส้นใย 4 phr มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่มีเขม่าดำ 50 phr และเส้นใย 4 phr โดยมีตัวย่อ คือ C50F4D1 นำไปขึ้นรูปท่อน้ำซึมเพื่อทดสอบการทนความดันและอัตราการซึมผ่านน้ำต่อไป

จากการใช้เขม่าดำและเส้นใยเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึมสูตร C50F4D1 พบว่าอัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมสูตรอื่นๆ เมื่อทำการเพิ่มความดัน สอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่มีแนวโน้มน้อยกว่าสูตรอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 4.58 และ 4.59 ท่อน้ำซึมสูตร C50F4D1 มีอัตราการซึมผ่านน้ำที่น้อยกว่าท่อน้ำซึมสูตรอื่นๆ เมื่อเพิ่มความดัน 0.5-1.1 bar แสดงถึงท่อน้ำซึมมีแนวโน้มของสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความดันเกิน 1.1 bar ท่อน้ำซึมมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้รูพรุนเกิดการขยายตัว และอาจเกิดการฉีกขาดทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ความดัน 1.4 bar ท่อน้ำซึมที่วางขายในเชิงพาณิชย์ใช้ความดันในช่วง 0.5-1.5 bar ขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต และแต่ละเกรดการนำไปใช้งาน ท่อน้ำซึมในงานวิจัยนี้ในสูตร C50F4D1 มีอัตราการซึมผ่านน้ำ 2-6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง ในช่วงความดัน 0.5-1.1 bar ซึ่งมีปริมาณน้ำและความดันคล้ายกับท่อน้ำซึมในเชิงการค้า



รูปที่ 4.58 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ใช้ปริมาณเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ (C50F4D1) เปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมสูตรอื่น ๆ



รูปที่ 4.59 ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่ใช้ปริมาณเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ (C50F4D1) เปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมสูตรอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 สรุปอิทธิพลของการใช้สารเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซีเมนต์

จากการศึกษาสารตัวเติมชนิดเสริมแรงเพื่อเสริมแรงให้กับท่อน้ำซีเมนต์ เช่น เขม่าดำ เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ และการใช้เขม่าดำร่วมกับเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ เพื่อดูประสิทธิภาพในการเสริมแรงและเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีมาขึ้นรูปท่อน้ำซีเมนต์เพื่อทดสอบการทนความดันของท่อน้ำซีเมนต์ และอัตราการซึมผ่านน้ำ แสดงผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของสารตัวเติมชนิดเสริมแรงดังนี้

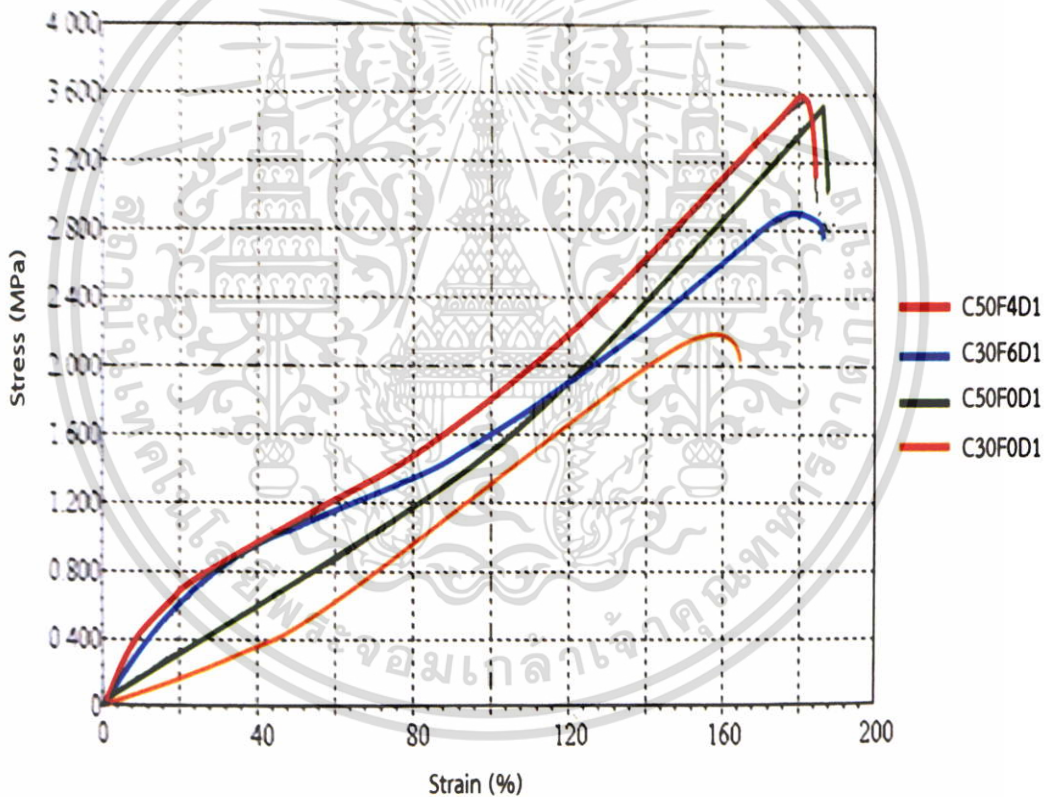
จากการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลในการผลิตท่อน้ำซีเมนต์นี้โดยควบคุมการใช้สารให้ฟอง 1 phr เพื่อศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำร่วมกับสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซีเมนต์โดยมียางผสมสูตรที่ใช้เป็นสูตรควบคุมเริ่มต้นในการศึกษา คือ C30F0D1 ซึ่งสูตรนี้คือยางผสมสูตรที่มีอัตราส่วน NR:RR ในอัตราส่วน 50:50 กล่าวคือสูตร C30F0D1 มีอัตราส่วนของสารตัวเติมเขม่าดำที่ผสมอยู่ในยางรีเคลม 30 phr จากกราฟความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 4.60 เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำเป็น 50 phr ในท่อน้ำซีเมนต์สูตร C50F0D1 เปรียบเทียบกับสูตร C30F0D1 พบว่าจากกราฟมีความชันมากขึ้นแสดงว่าท่อน้ำซีเมนต์มีมอดุลัสที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซีเมนต์มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.59 การใช้เส้นใยในการเสริมแรงให้กับท่อน้ำซีเมนต์ในสูตร C30F6D1 พบว่ามีค่าความชันของกราฟในช่วงแรกมากกว่าสูตรที่มีการใช้เขม่าดำและเมื่อเกิดการยืดมากขึ้นความชันของกราฟลดลง เนื่องจากเมื่อท่อน้ำซีเมนต์เกิดการยืดตัวเมื่อได้รับแรงถึงจุดจุดหนึ่ง เส้นใยอาจเกิดการขาดหรือหลุดออกจากยาง เนื่องจากเส้นใยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเส้นใยสั้น และเส้นใยมีความแข็งแรงสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้น้อยกว่ายาง แต่ต่างจากการใช้เขม่าดำเมื่อทำการผสมกับยางแล้วเป็นเนื้อเดียวกับยางจึงมีค่าความเค้น-ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ อย่างไรก็ตามเมื่อนำเขม่าดำและเส้นใยมาเสริมแรงร่วมกัน พบว่าความชันช่วงแรกของกราฟมีค่าสูงและหลังจากนั้นความเค้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยอาจเกิดการขาดหรือหลุดออกจากยางแต่ยังคงมีแนวโน้มของความเค้นที่มากกว่าสูตรอื่น ๆ ที่ความเครียดเท่ากัน เนื่องจากยังมีเขม่าดำช่วยในการเสริมแรง ซึ่งในสูตร C50F4D1 มีแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านจุดศูนย์กลางน้อยกว่าท่อน้ำซีเมนต์สูตรอื่น ๆ ส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อความดันเกิน 1.1 bar คาดว่าเส้นใยเกิดการขาดหรือหลุดออกจากยางเนื่องจากเป็นเส้นใยสั้น จึงทำให้ท่อน้ำซีเมนต์มีแนวโน้มการขยายตัวของเส้นผ่านจุดศูนย์กลางเพิ่มขึ้น รูปพรุนเกิดการขยายขนาดจึงทำให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำมากขึ้น

จากการขึ้นรูปท่อน้ำซีเมนต์สูตร C30F0D1 พบว่าเมื่อได้รับแรงดันจากน้ำท่อน้ำซีเมนต์มีอัตราการซึมผ่านน้ำ และการขยายตัวของเส้นผ่านจุดศูนย์กลางมากขึ้น และส่งผลให้ท่อน้ำซีเมนต์เกิดการแตกที่ความดัน 1.4 bar สมบัติเชิงกลของท่อน้ำซีเมนต์ และค่าความดันระเบิดของท่อน้ำซีเมนต์ แสดงดังรูปที่ 4.61-4.66 อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณเขม่าดำ 50 phr ในสูตร C50F0D1 เพื่อเสริมแรงให้กับท่อน้ำซีเมนต์ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัสที่ 100% และความแข็งแรงฉีกขาด นอกจากนี้สารตัวเติมนอกจากเขม่าดำในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยจากขยะยางรถยนต์เพื่อเสริมแรงให้กับท่อน้ำซีเมนต์โดยใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อยของสูตร C30F6D1 พบว่าสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับการใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเนื่องจาก Aspect ratio ของเส้นใยที่มากกว่าเขม่าดำ อย่างไรก็ตามการใช้สารเสริมแรงทั้ง 2 ชนิดในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัด เนื่องจากท่อน้ำซีเมนต์มีสารตัวเติมในปริมาณค่อนข้างมาก เช่น ผงยางรถยนต์ (60 phr) กล่าวคือมีปริมาณยางที่ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยผสมน้อย (Low rubber content) อีกทั้งชิ้นงานมีลักษณะรูปพรุนเป็นเซลล์เปิด ส่งผลให้ยางหรือเมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

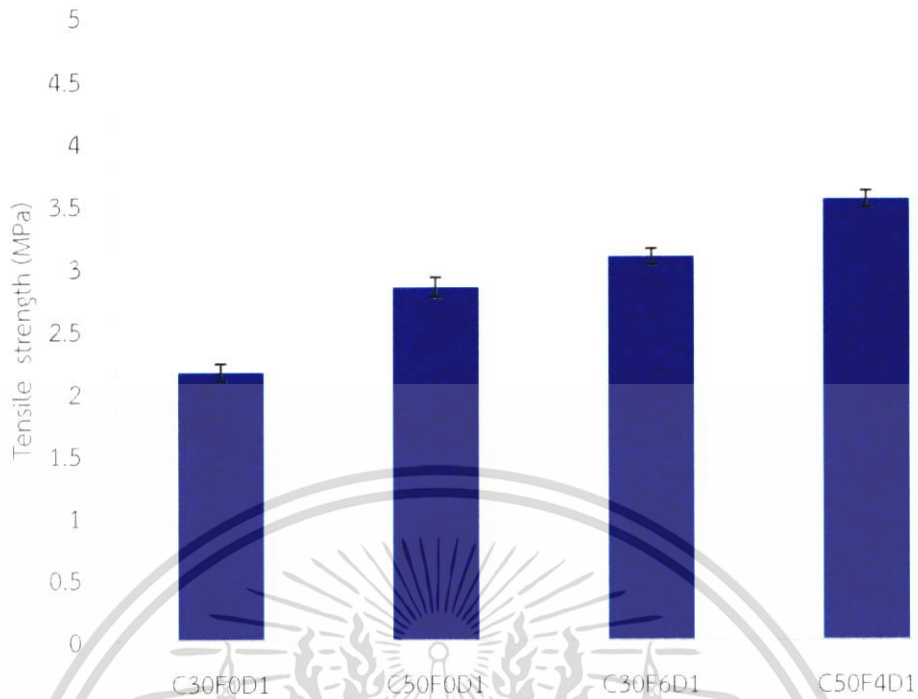
ไม่สามารถล้อมรอบส่วนเสริมแรงได้ทั้งหมด และปริมาณสารเสริมแรงที่มากเกินไปเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดิ่งกล่าวลดลง

เขม่าดำและเส้นใยต่างมีปริมาณในการใช้เพื่อเสริมแรงให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุดที่ปริมาณต่างกัน เนื่องจากปัญหาของการกระจายตัวในแต่ละชนิดของเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเขม่าดำและเส้นใยจากขยะยางรถยนต์มาใช้เสริมแรงร่วมกันในสูตร C50F4D1 เพื่อหาปริมาณการใช้สารเสริมแรงที่เหมาะสมที่สุด พบว่ามีค่าสมบัติเชิงกลมีค่าดีที่สุด เช่น ความแข็งแรงดึง, เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุด ขาด, ความแข็งแรงฉีกขาด และมอดุลัสที่ 100% ทำให้มีค่าอัตราการซึมผ่านน้ำมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับท่อน้ำซีเมนต์อื่น ๆ และสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำซีเมนต์ที่มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.58 และ 4.59 ตามลำดับ แสดงถึงท่อน้ำซีเมนต์ที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การขยายตัวของท่อมีแนวโน้มลดลงทำให้รูพรุนเกิดการขยายตัวลดลง

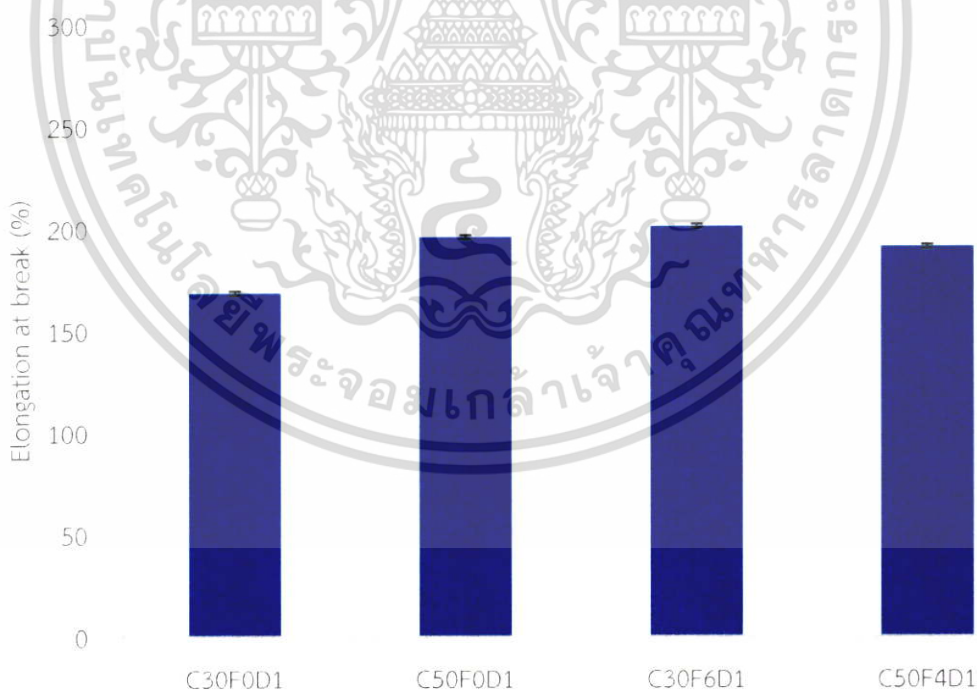


รูปที่ 4.60 กราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain curve) ของท่อน้ำซีเมนต์ต่ออิทธิพลของสารเสริมแรงแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

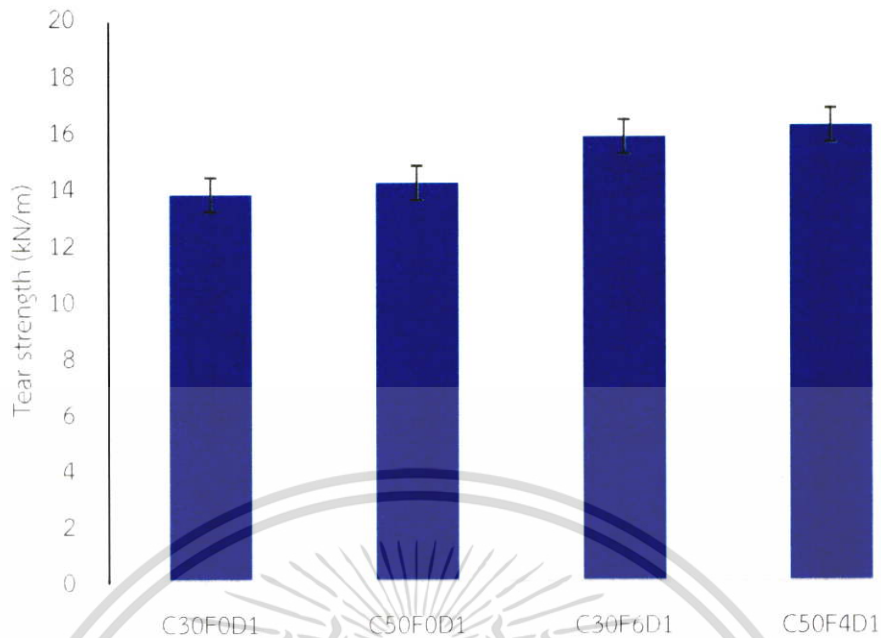


รูปที่ 4.61 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.62 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน

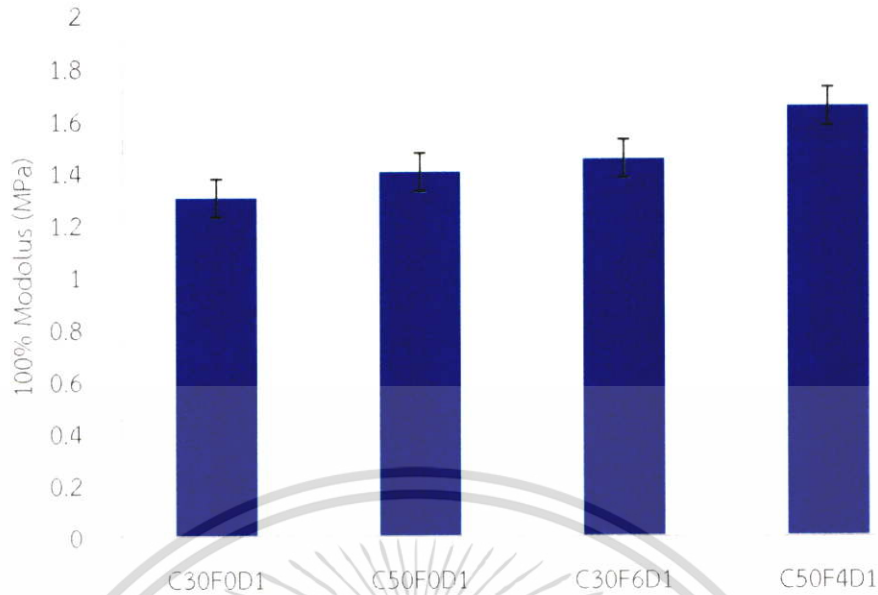
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



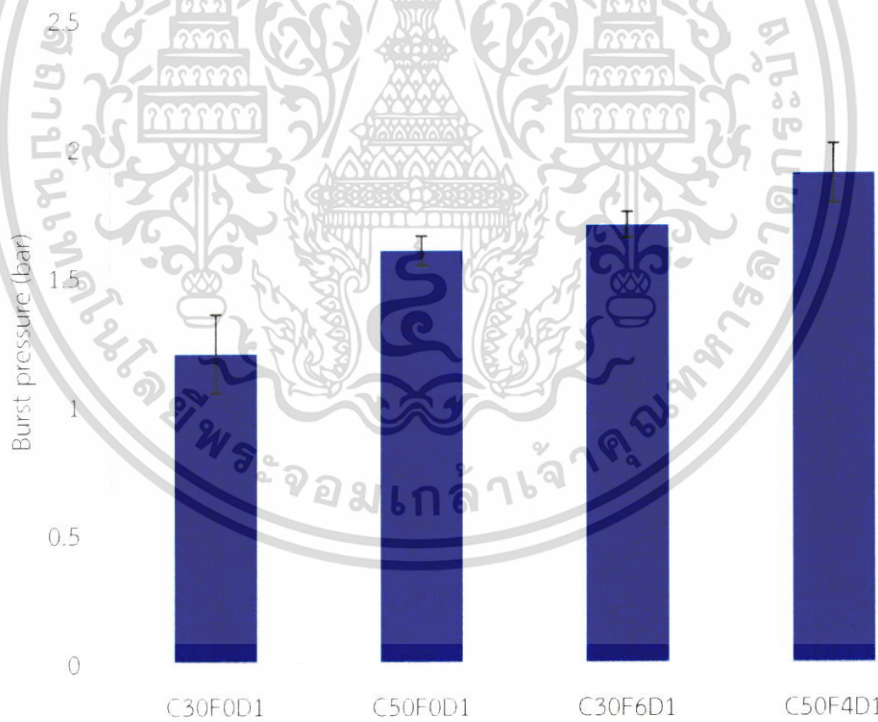
รูปที่ 4.63 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน

การนำเส้นใยจากขยะยางรถยนต์มาใช้ในการเสริมแรงของสูตร C30F6D1 ทำให้มีแนวโน้มของค่ามอดูลัสที่ 100% สูงกว่าสูตร C50F0D1 ที่ใช้เขม่าดำในการเสริมแรงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.64 สอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม ดังรูปที่ 4.59 เมื่อท่อน้ำซึมมีความแข็งแรงมากขึ้นจึงเกิดการขยายตัวลดลง จึงมีแนวโน้มการขยายตัวของท่อน้อยกว่าการใช้เขม่าดำเสริมแรงเล็กน้อย ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มน้อยกว่าการใช้เขม่าดำเมื่อเพิ่มความดัน แสดงดังรูปที่ 4.58 อย่างไรก็ตามการใช้เขม่าดำร่วมกับเส้นใยในสูตร C50F4D1 มีค่ามอดูลัสที่ 100% มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ในช่วงความดัน 0.8-1.1 bar สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่มีแนวโน้มน้อยกว่าสูตรอื่น ๆ และค่าความดันระเบิดของท่อน้ำซึมมากกว่าสูตรอื่น ดังรูปที่ 4.65

จากรูปที่ 4.66 แสดงค่าความแข็งแรงกดของการเสริมแรงด้วยเขม่าดำ และเส้นใยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำความแข็งแรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเสริมแรงด้วยเส้นใย แต่เมื่อใช้เส้นใยและเขม่าดำร่วมกันความแข็งแรงกดมีแนวโน้มมากที่สุด เนื่องจากปริมาณสารเสริมแรงทั้งหมดในยางผสมสูตรมีมาก อย่างไรก็ตามก็ตีการทดสอบสมบัติเชิงกลนี้เป็นการขึ้นรูปเพื่อการจำลองชิ้นงานทดสอบท่อน้ำซึมแบบอัดด้วยเครื่องอัดแบบ (compression molding machine) และเมื่อขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมแล้วสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มไม่แตกต่างกันแสดงดังภาคผนวก ค ดังนั้นท่อน้ำซึมในสูตร C50F4D1 เหมาะสมที่จะนำไปเพื่อขึ้นรูปท่อน้ำซึม และศึกษาอิทธิพลของสารให้ฟองที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านน้ำต่อไป

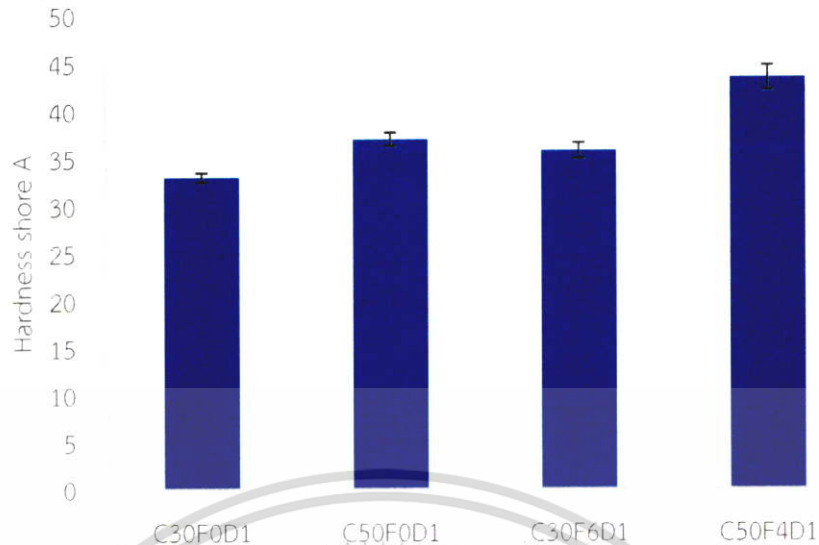


รูปที่ 4.64 ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.65 ค่าความดันระเบิดของท่อน้ำซีเมนต์ในการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



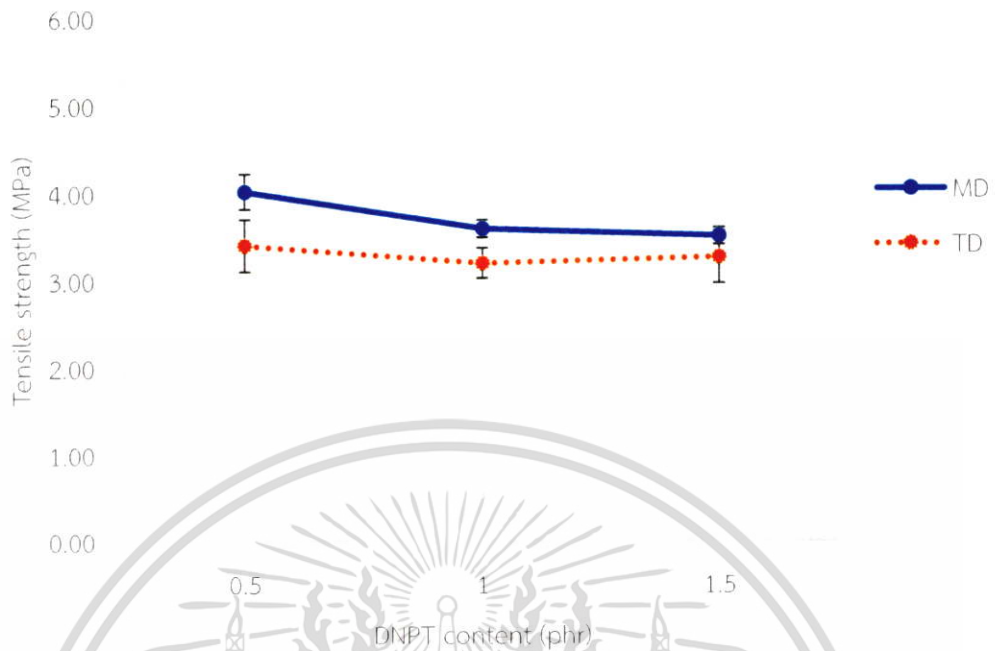
รูปที่ 4.66 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรจากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน

#### 4.4 การศึกษาปริมาณสารให้ฟอง

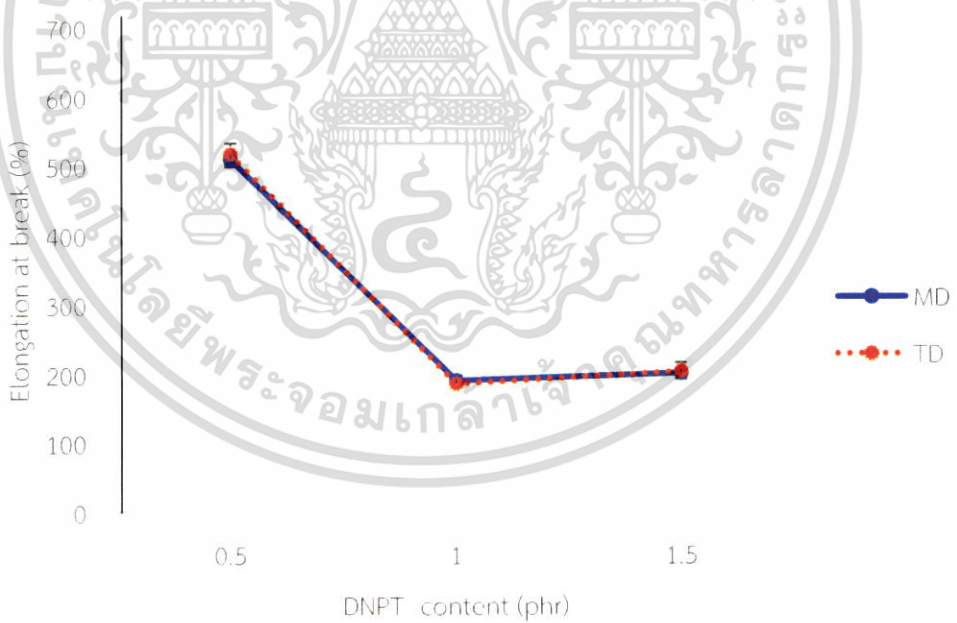
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลในข้างต้นมีการใส่สารให้ฟองเพื่อให้ชิ้นงานเกิดรูพรุนทำให้น้ำสามารถซึมผ่านออกมาจากผนังท่อน้ำซึมได้ ดังนั้นปริมาณสารให้ฟองจึงส่งผลต่อรูพรุนของท่อน้ำซึมและอัตราการซึมผ่านของน้ำ ถ้าสารให้ฟองปริมาณน้อยเกินไปเกิดรูพรุนหรือเกิดความต่อเนื่องของรูพรุนน้อยทำให้น้ำซึมผ่านได้ลดลง และถ้าปริมาณมากเกินไปไม่ได้ส่งผลให้รูพรุนมีจำนวนมากขึ้นเสมอไป เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมากเกินไปจะรวมตัวกันหลุดออกจากชิ้นงานอาจส่งผลให้ได้รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ทำให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำที่มาก นอกจากนี้สารให้ฟองยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเนื่องจากการเกิดรูพรุน เพราะรูพรุนเปรียบเสมือนข้อบกพร่องในชิ้นงาน ดังนั้นในหัวข้อวิจัยนี้จึงหาจุดสมดุลระหว่างรูพรุนที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ และสมบัติเชิงกลที่มีผลต่อการทนความดันน้ำของท่อน้ำซึมโดยศึกษาสารให้ฟองที่ปริมาณ 0.5, 1 และ 1.5 phr โดยมีอัตราส่วน NR:RR-50:50 และศึกษาในสูตร C50F4 กล่าวคือสูตรที่มีสารตัวเติมชนิดเขม่า 50 phr และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ 4 phr เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำต่อไป

จากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองเพื่อให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่องนั้นเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนสารให้ฟอง DNPT จะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซแทรกตัวออกมาระหว่างช่องว่างผงยางรถยนต์ หรือบางครั้งอาจเกิดที่สารตัวเติมต่าง ๆ เช่น เขม่าดำ และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์จากการเพิ่มปริมาณสารให้ฟองพบว่าสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงที่ปริมาณสารให้ฟอง 0.5-1 phr และเริ่มคงที่ เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด แสดงดังรูปที่ 4.67-4.69 เนื่องจากเมื่อสารให้ฟองได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวฟองก๊าซทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานเสมือนเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงาน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง 1.5 phr พบว่าค่าสมบัติเชิงกลดังกล่าวเริ่มคงที่เนื่องจากปริมาณก๊าซของสารให้ฟองที่มากเกินไปทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างรูพรุนที่มีความต่อเนื่องมากขึ้นจึงทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นหลุดออกจากชิ้นงาน อย่างไรก็ตามการเกิดรูพรุนในชิ้นงานส่งผลให้ค่ามอดูลัสที่ 100% มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.70 แต่การเกิดรูพรุนไม่มีอิทธิพลมากพอต่อค่าความแข็งกดที่มีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง ดังรูปที่ 4.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยูได้เห็นใบเซอร์เวชันด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

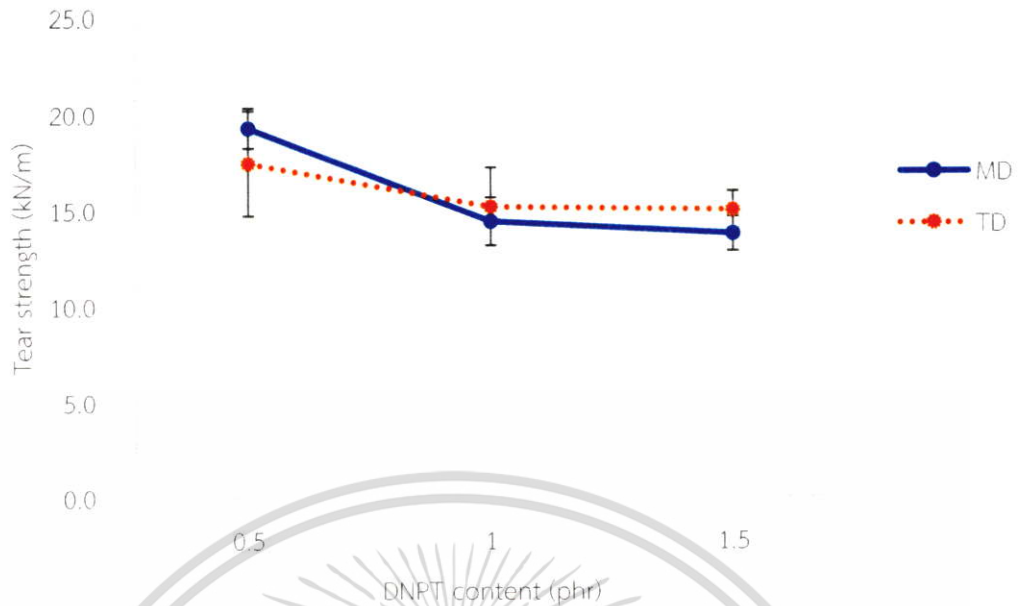


รูปที่ 4.67 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน

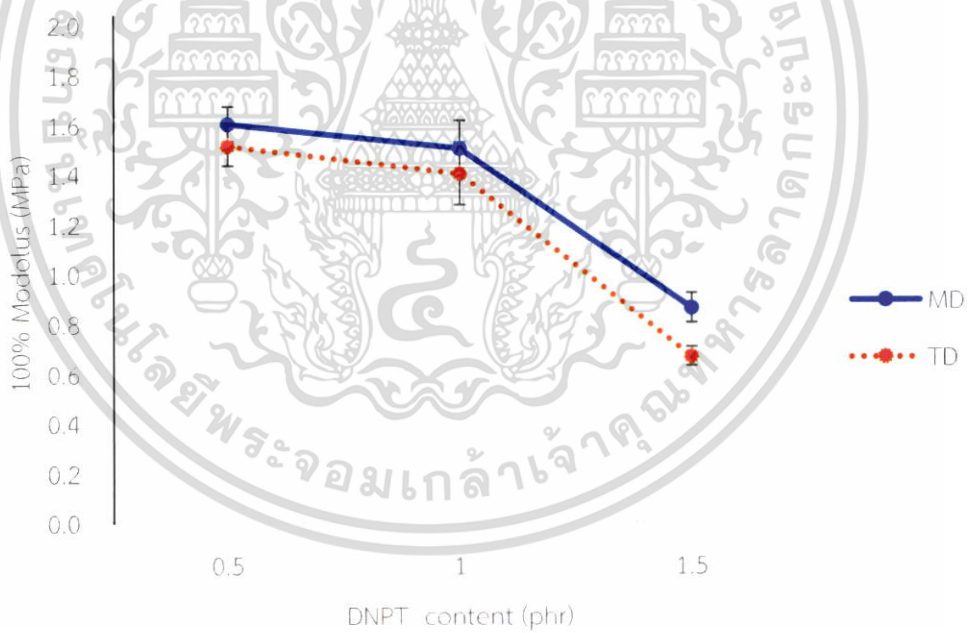


รูปที่ 4.68 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

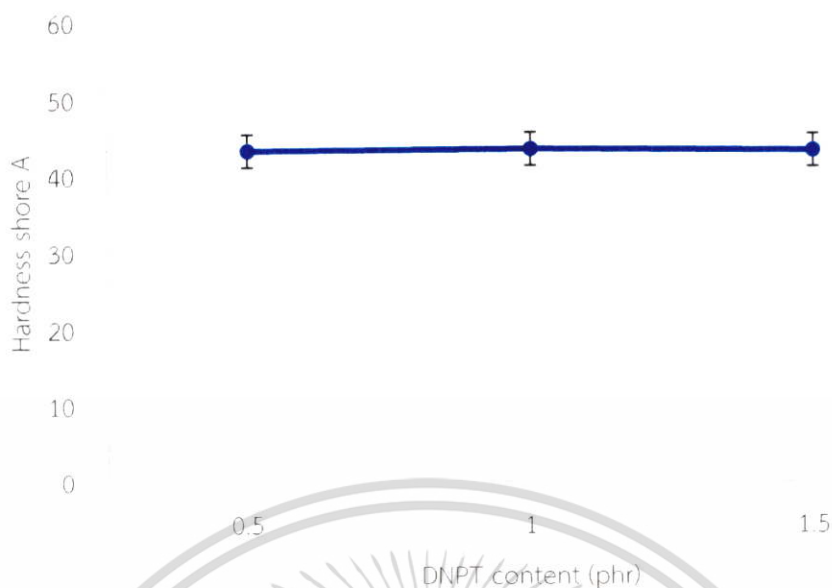


รูปที่ 4.69 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.70 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน

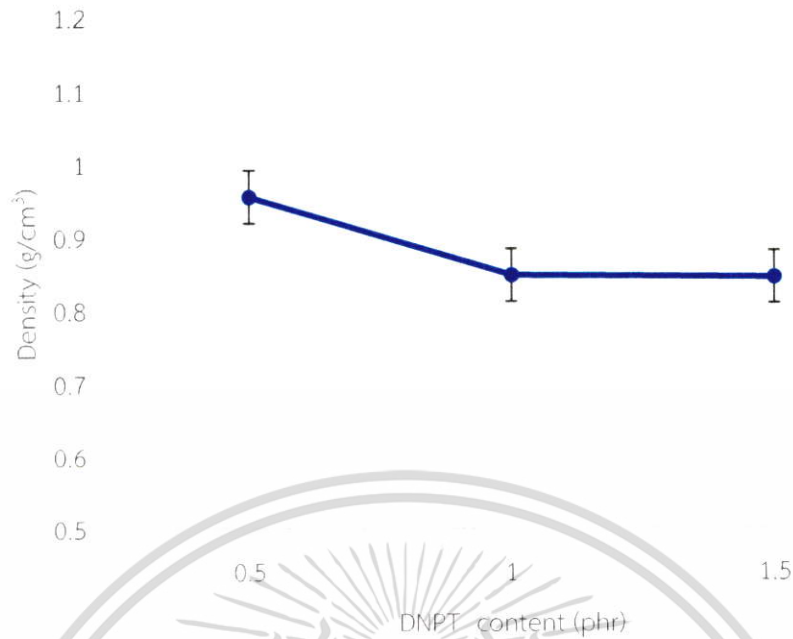
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.71** ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน

จากค่าความหนาแน่นที่ปริมาณสารให้ฟอง 0.5-1 phr พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ดังรูป 4.72 เนื่องจากสารให้ฟองสลายตัวแล้วเกิดรูพรุนในชิ้นงานและมีจำนวนรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้น การใช้สารให้ฟองที่มากเกินไปทำให้โครงสร้างรูพรุนมีความต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจึงสามารถหลุดออกจากชิ้นงานผ่านโครงสร้างรูพรุนที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณสารให้ฟองนั้นส่งผลต่อขนาดและจำนวนของรูพรุน แสดงดังรูปที่ 4.73 SEM แสดงการเปรียบเทียบขนาด และจำนวนของรูพรุนที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง พบว่าที่ปริมาณสารให้ฟอง 0.5 phr มีจำนวนการเกิดรูพรุนที่น้อยกว่าสารให้ฟอง 1 phr อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง 1.5 phr ส่งผลให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากสารให้ฟองนั้นรวมตัวกันออกจากชิ้นงาน รูพรุนที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มปริมาณสารให้ฟองสอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม ดังรูปที่ 4.74 จากสูตร C50F4D0.5 ใช้สารให้ฟอง 0.5 phr พบว่าน้ำไม่สามารถซึมผ่านผนังท่อน้ำซึมได้ที่ความดัน 0.5 bar แต่เมื่อเพิ่มความดัน 0.8 bar น้ำสามารถซึมออกมาจากผนังท่อน้ำซึมได้เนื่องจากท่อน้ำซึมเกิดการขยายตัวส่งผลให้รูพรุนเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง 1 phr ในสูตร C50F4D1 น้ำสามารถซึมผ่านผนังท่อได้ที่ความดัน 0.5 bar แสดงถึงการเกิดรูพรุนที่มีความต่อเนื่องมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง 1.5 phr รูพรุนมีแนวโน้มขนาดใหญ่มากขึ้นจึงมีอัตราการซึมผ่านน้ำมากกว่าสูตรอื่น ๆ นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำนั้นสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม เมื่อเพิ่มความดันกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมมีค่ามากขึ้นตามอัตราการซึมผ่านน้ำ เนื่องจากการขยายตัวของท่อทำให้รูพรุนเกิดการขยายตัว แสดงดังรูปที่ 4.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

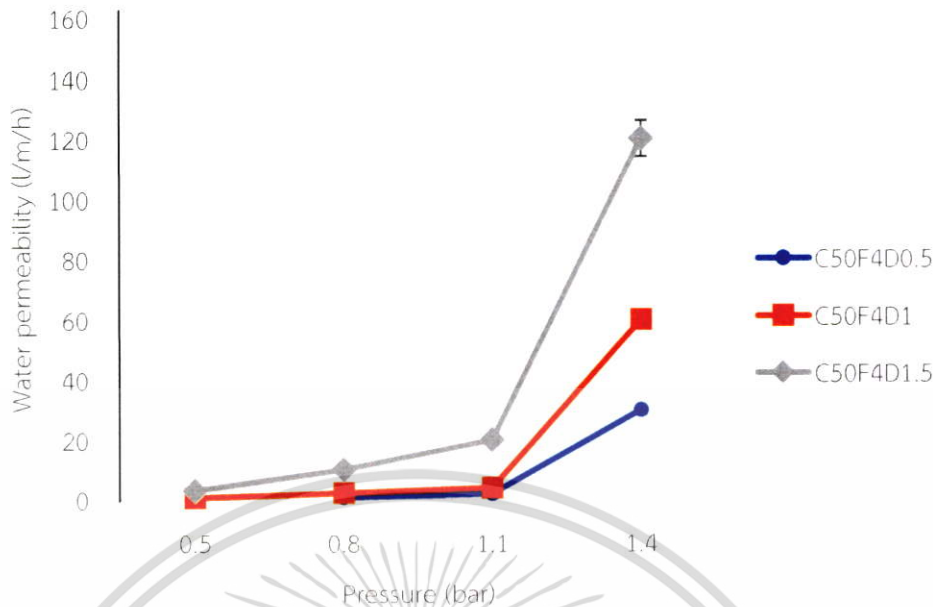


รูปที่ 4.72 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน

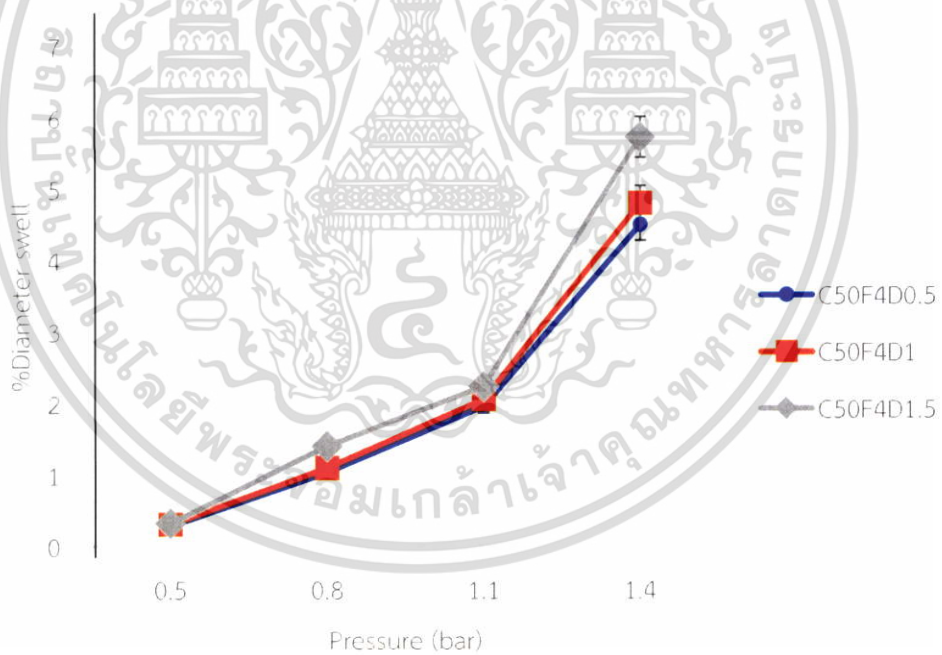


รูปที่ 4.73 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการศึกษาปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน ก) DNPT 0.5 phr ข) DNPT 1 phr และ ค) DNPT 1.5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.74 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมในปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.75 ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมในปริมาณสารให้ฟองที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ผลของความยาวท่อน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ

จากการศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรงพบว่าสูตรที่มีการใช้เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ร่วมกับเซมาต้าในการเสริมแรง (C50F4D1) โดยมีสารให้ฟอง DNPT 1 phr มีสมบัติเชิงกลที่ดีทำให้เปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมต่ำ ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างคงที่เมื่อเพิ่มความดันในช่วง 0.5-1.1 bar จึงนำท่อน้ำซึมสูตรนี้มาศึกษาผลของความยาวท่อน้ำซึมต่อความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น 25 และ 50 เมตร และอัตราการซึมผ่านน้ำ โดยทดสอบท่อน้ำซึมที่ความยาว 50 เมตร ที่ความดัน 0.5, 0.8 และ 1.1 bar แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของความยาวท่อน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ

ความดันเริ่มต้น (bar)	ตำแหน่งความยาวท่อ (เมตร)	ความดันที่วัดได้ (bar)	อัตราการซึมผ่านน้ำ (ลิตร/เมตร/ชั่วโมง)
0.5	25	0.5	0.50
	50	0.5	0.45
0.8	25	0.8	2.30
	50	0.8	2.23
1.1	25	1.1	4.20
	50	1.0	4.10

จากการทดสอบผลของความยาวท่อน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ พบว่าเมื่อเพิ่มความดันน้ำเริ่มต้นที่ต่างกันของท่อน้ำซึมที่ตำแหน่ง 25 และ 50 เมตร มีค่าใกล้เคียงกันกับความดันเริ่มต้น แสดงดังตารางที่ 4.2 แสดงถึงท่อน้ำซึมมีความดันลด (Pressure drop) น้อยมาก เนื่องจากอัตราการซึมผ่านของน้ำออกจากผนังท่อน้ำซึมมีปริมาณที่น้อยจึงลดการสูญเสียแรงดันของน้ำ นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีความดันลดที่น้อย ดังนั้นท่อน้ำซึมในสูตร C50F4D1 สามารถให้น้ำพิชที่ความดันต่าง ๆ ในระยะความยาว 50 เมตร ได้โดยมีอัตราการซึมผ่านน้ำที่ใกล้เคียงกัน แสดงรูปการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมดังรูปที่ 4.76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 4.76 การซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม สูตร C50F4D1 ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของท่อน้ำซึม

จากการทดลองพบว่า องค์ประกอบที่วัตถุดิบและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตท่อน้ำซึมเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ อัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในทางการเกษตร คือ ท่อน้ำซึมที่ประกอบไปด้วย

- อัตราส่วนยาง : ผงยางรถยนต์ คือ 40:60 (โดยน้ำหนักเทียบกับยาง)
- อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และยางรีเคลม คือ 50:50 (โดยน้ำหนักของยาง)
- ปริมาณเขม่าดำ 50 phr
- เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ 4 phr
- สารให้ฟองไดโนโตรเพนตะเมทิลีนเตตระเมีน (DNPT) 1 phr

ทำการบดผสมยางด้วยเครื่องนิตเตอร์ที่อุณหภูมิ 70°C และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียว หนองเตียวที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที โดยท่อน้ำซึมที่ผลิตได้นั้นจะมีลักษณะเป็นรูพรุน สีดำ ผิวเรียบ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ความหนา 2.7 มิลลิเมตร สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติบางประการของท่อน้ำซึมสูตร C50F4D1

สมบัติของท่อน้ำซึม	ค่าที่ได้
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 (100°C))	51.7
ความแข็งแรงดึง (MPa)	3.55
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	190.9
มอดูลัสที่ 100%	1.65
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	15.08
ความแข็งกด (Shore A)	43.5
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.85
อัตราการซึมผ่านน้ำ (l/m/h) ณ ความดันดังนี้	
- 0.8 bar	2.3
- 1.1 bar	4.2

#### 4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะเลือกท่อน้ำซึมที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ สูตร C50F4D1 โดยวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ซึ่งสามารถผลิตท่อน้ำซึมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร มีความหนา 2.7 มิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>1</sup>	เป็นเงิน (บาท)
ยางแผ่นรมควันชั้น 2	145 กรัม	65 บาท/กก.	9.43
ยางรีเคลม เกรด UCD105	290 กรัม	28 บาท/กก.	8.12
ผงยางรถยนต์ (ขนาด 30 เมช)	435 กรัม	3 บาท/กก.	12.18
ซิงค์ออกไซด์	14.5 กรัม	90 บาท/กก.	1.31
กรดสเตียริก	5.8 กรัม	40 บาท/กก.	0.23
CBS	2.9 กรัม	115 บาท/กก.	0.1
TMTD	1.45 กรัม	70 บาท/กก.	0.33
เขม่าดำ (N550)	43.5 กรัม	45 บาท/กก.	1.96
เส้นใยจากขยะยางรถยนต์	29 กรัม	-	-
น้ำมันเนฟทานิก	14.5 กรัม	68 บาท/กก.	0.29
6PPD	2.9 กรัม	90 บาท/กก.	0.26
DNPT	2.9 กรัม	184 บาท/กก.	0.28
ยูเรีย	2.9 กรัม	136 บาท/กก.	0.14
กำมะถัน	7.25 กรัม	15 บาท/กก.	0.11
ค่าแรง	1 ชั่วโมง	300 บาท/วัน <sup>2</sup>	37.5
ค่าไฟฟ้า	10 หน่วย	3 บาทต่อหน่วย	30
เบ็ดเตล็ด	-	-	5
รวมต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (8 เมตร) <sup>3</sup>			107

หมายเหตุ

<sup>1</sup> เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือน พฤศจิกายน 2561<sup>2</sup> คิดค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน<sup>3</sup> ราคาไม่รวมเครื่องจักรการผลิต และค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักร

จากตารางที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ พบว่าการนำผงยางรถยนต์มาใช้เป็นสารตัวเติมให้กับท่อน้ำซีเมนต์นั้นนอกจากจะช่วยให้เกิดรูปทรงภายในท่อน้ำซีเมนต์แล้วยังลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากผงยางรถยนต์มีราคาถูก และมีปริมาณการใช้มากถึง 60% เมื่อเทียบกับยาง โดยต้นทุนการผลิตท่อน้ำ 1 กิโลกรัม ได้ท่อน้ำซีเมนต์ 8 เมตร ใช้ต้นทุนการผลิต 107 บาท กล่าวคือได้ท่อน้ำซีเมนต์ประมาณ 13.4 บาท/เมตร ซึ่งถือว่าต้นทุนการผลิตที่ต่ำ ซึ่งราคาถูกกว่าท่อน้ำซีเมนต์ที่วางขายในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าท่อน้ำซีเมนต์ที่ผลิตจากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลม และผงยางรถยนต์ในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลมและผงยางรถยนต์ โดยเน้นศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านน้ำ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลมและผงยางรถยนต์เสริมแรงด้วยเส้นใยจากขยะยางรถยนต์และเขม่าดำเป็นอุปกรณ์การให้น้ำ พบว่าท่อน้ำซึมมีสมบัติเชิงกลที่ดีส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมสูตรอื่น ๆ สอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่มีแนวโน้มลดลง และสามารถทนแรงดันน้ำได้มากขึ้นเมื่อใช้เส้นใยจากขยะยางรถยนต์ในการเสริมแรงร่วมกับเขม่าดำ ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้สารเสริมแรงเพียงชนิดเดียว การผลิตท่อน้ำซึมมีรายละเอียดจากการวิจัยในแต่ละตอนดังนี้

1) สภาพการเชื่อมโยงที่เหมาะสมของท่อน้ำซึมที่อุณหภูมิ 160°C โดยศึกษาเวลาเชื่อมโยง พบว่าเวลาการเชื่อมโยงที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่ดี คือ 20 นาที (เฉพาะการใช้เครื่องมือการเชื่อมโยงของงานวิจัยนี้)

2) การศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางรีเคลม พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางธรรมชาติสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญงานวิจัยนี้เลือกสูตรอัตราส่วน NR:RR-50:50 เพื่อต้องการใช้ยางรีเคลมเพื่อลดต้นทุน และเพิ่มปริมาณการใช้ยางธรรมชาติ

3) การเติมเขม่าดำในการเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด จนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง คือปริมาณเขม่าดำ 50 phr จากนั้นสมบัติเชิงกลเหล่านั้นลดลง ส่วนค่ามอดูลัสที่ 100% ความแข็งแรง และความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นนอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเสริมแรงด้วยเขม่าดำสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของท่อน้ำซึมที่มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการนำเขม่าดำมาเสริมแรงให้กับท่อน้ำซึมที่เหมาะสมนั้น คือ 50 phr

4) การใช้เส้นใยจากขยะยางรถยนต์เสริมแรงให้กับท่อน้ำซึม จากการศึกษาการใช้เส้นใย 2 วิธี การนำเส้นใยมาใช้โดยตรงและการทำมาสเตอร์แบทช์เส้นใย พบว่าทั้ง 2 วิธีมีสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด จึงเลือกใช้วิธีการเตรียมเส้นใยเป็นมาสเตอร์แบทช์มาใช้งาน โดยเมื่อเพิ่มเส้นใยพบว่าสมบัติเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งที่ปริมาณเส้นใย 6 phr และมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแตกต่างจากค่ามอดูลัสที่ 100% และค่าความแข็งแรงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของท่อน้ำซึมแต่การเสริมแรงของเส้นใยนั้นทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านน้ำที่ลดลงเมื่อเพิ่มความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การใช้เขม่าดำร่วมกับเส้นใยจากขยะยางรถยนต์เสริมแรงให้กับท่อน้ำซึม โดยใช้เขม่าดำ 50 phr และเพิ่มปริมาณเส้นใย พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้สมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเส้นใย 4 phr และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเส้นใย แตกต่างจากมอดูลัสที่ 100% ความแข็งกด และความหนืดมูนีที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น การใช้เขม่าดำร่วมกับเส้นใยนั้นส่งผลให้ท่อน้ำซึมมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการใช้สารตัวเติมชนิดเสริมแรงเพียงชนิดเดียว ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับท่อน้ำซึมสูตรอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึมที่มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังสามารถทนความดันน้ำได้ดีจากค่าความดันระเบิดที่มีแนวโน้มสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารเสริมแรงกับสารเสริมแรงเพียงชนิดเดียว

6) จากการศึกษาปริมาณสารให้ฟอง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง และมีผลต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำเมื่อสารให้ฟองเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางมากขึ้น ดังนั้นจุดสมดุลระหว่างสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมต่อการให้สารให้ฟอง DNPT คือ 1 phr

จากการผลิตท่อน้ำซึมพบว่าสูตรที่เหมาะสมต่อการผลิตและมีสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง คือ สูตร C50F4D1 ซึ่งมีองค์ประกอบของอัตราส่วนยางและผงยางรถยนต์ 40:60 ในส่วนของยางนั้นมีอัตราส่วน NR:RR-50:50 เสริมแรงด้วยเขม่าดำ 50 phr และเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ 4 phr โดยใช้สารให้ฟอง 1 phr การผลิตท่อน้ำซึมนี้ใช้สภาวะการเชื่อมโยง 160°C เป็นเวลา 20 นาที โดยมีต้นทุนการผลิตประมาณ 13 บาท/เมตร ท่อน้ำซึมที่ผลิตได้มีความดันในการใช้งานที่เหมาะสมประมาณ 0.8-1.1 bar มีอัตราการให้น้ำประมาณ 2-4 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง ใกล้เคียงกับท่อน้ำซึมในเชิงพาณิชย์เหมาะสมต่อการให้น้ำทางการเกษตร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยผลิตท่อน้ำซึม สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่น่าสนใจที่อาจเป็นแนวทางในการทำการศึกษาวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมที่ผลิตจากถุงมือยาง ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ารีเคลมจากขยะยางรถยนต์
2. ศึกษาชนิดหรือปริมาณของสารป้องกันการเกิดตะไคร้ในการมาปรับใช้กับท่อน้ำซึม
3. ศึกษาผลของความหนาของท่อน้ำซึมที่มีผลต่ออัตราการซึมผ่านน้ำ
4. ปรับสูตรส่วนผสมท่อน้ำซึมเพื่อประยุกต์การใช้งานเป็นท่อปล่อยฟองอากาศสำหรับสัตว์น้ำ
5. ศึกษาขนาดและจำนวนรูพรุนต่อความสามารถในการดูดซับของท่อน้ำซึมเพื่อประยุกต์ใช้ในน้ำเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำ เช่น น้ำมัน ตัวทำละลาย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] โอพาร พิทักษ์ และคณะ. 2559. “ฐานข้อมูลการเกษตร” ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมส่งเสริมการเกษตร
- [2] คณะกรรมการพัฒนาข้อมูลด้านการเกษตร. 2559. “ยางพารา” [Online] Available : <http://www.oae.go.th/download/forecastdata/situation/9rubber.pdf>
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2556. การขยายฐานการผลิตยางล้อเพื่อการส่งออก กรุงเทพฯ : สถาบันพลาสติก และศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย.
- [4] Xin Xing Zhang Can Hui Lu and Mei Liang. 2007 “Preparation of Rubber Composites from Ground Tyre Rubber Reinforced with Waste-tyre Fibre through Mechanical Milling.” J. appl. Polym. Sci., 103 : 4087–4094.
- [5] Leaky Pipe. 2560. “Soaker Hose” Available : <http://www.johnstowngardencentre.ie/p/soaker-hose---leaky-pipe-porous-pipe/soaker-hose>
- [6] James E. Turner and Southlake. **Underground Irrigation Porous Pipe.** U.S Patent 4003408., 1997.
- [7] สุนา แจ่มเหมือน. 2547. “การผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [8] วศิน จีระไพศากุล และคณะ 2547. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากยางรีคอมและผงยางรถยนต์” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] อธิพล แจ่มชัด. 2545. **เทคโนโลยีการยาง.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] Lucia Asaroa, Michel Grattona, Saïd Segharb and Nourredine Aït Hocinea. 2018. “Recycling of rubber wastes by devulcanization”. Conservation & Recycling. 133. : 250–262.
- [11] Makarov V.M and Drozdovski V.F. 1991. **Reprocessing of tyres and rubber wastes recycling from the rubber product products industry.** USA : Ellis horrwood.
- [12] เสาวรจน ขวัญจุลจิตร. 2541. **เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] อุดมศักดิ์ พาตี. 2544. “ผลของอัตราส่วนผสมต่อการดูดซึมน้ำ สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างไนลอน 6 และพอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] Folkes M.J. and Hope, P.S. 1993. **Polymer Blends and Alloys,** 1<sup>st</sup> Ed. New York : CRC Press

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Paul. D.R, Barlow J.W., and Keskkula. H. 1988. "Polymer Blends". in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering Vol. 10 : 399-461.
- [16] พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. **สารเคมีสำหรับยาง**. สงขลา : ภาควิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [17] ภัณฑิลา ภูมิระเบียบ 2556 **สารเคมีสำหรับยาง** กรุงเทพฯ : โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรมกรรมวิทยาศาสตร์บริการ
- [18] พจนพร ชวบเจริญและคณะ 2557. "การบ่มสุกและสมบัติเชิงกลของวัสดุประกอบยางธรรมชาติที่มีซิลิกาจากเถาขานอ้อย.". ในการประชุมวิชาการระดับชาติ "วิทยาศาสตร์วิจัย" ครั้งที่ 6 ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา หน้า 64-69
- [19] Af supercell. 2010. **Foaming agent**. Bangkok : Report Af Supercell Co.,Ltd
- [20] Blow C.M. 2010. **Rubber Technology and Manufacture**. London : Butterworth & Co. Puplication Ltd.
- [21] อิทธิพล แจ่มชัด. 2545. **คอมโพสิต**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] ดรรชนี พัทธรากร. 2544. **เทคโนโลยีสิ่งทอ**. เชียงใหม่ : ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [23] กองบริษัทที่ดิน. 2525. **คู่มือการวางแผนระบบการให้น้ำในไร่นาและความสัมพันธ์ระหว่างดิน พืช และน้ำ**. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. หน้า 139
- [24] วิบูลย์ บุญยธโรกุล. 2526. **หลักการชลประทาน**. กรุงเทพฯ : ภาควิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [25] อภิชาติ อนุกุลอำไพ และคณะ 2524. **คู่มือการชลประทานระดับไร่นา**. ปทุมธานี : ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย.
- [26] Leakpipe "Porous pipe". [Online] Available ; <https://www.leakypipe.co.uk/top-picks-for-small-gardens-c102x3144287>
- [27] บริษัท กสิพันธ์ารัต จำกัด "ท่อน้ำซึม". [Online] Available : [http://www.kasipa\\_nta\\_rut.com/](http://www.kasipa_nta_rut.com/)
- [28] LBS Global Company "Polous pipe". [Online] Available : <http://www.porouspipe.co.uk/page/the-range>
- [29] เบลูจวรรณ ชนะจรัญวิทย์. 2543. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [30] สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล. 2554. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [31] Sombat thanawan, Pitchapa Pittayavinai and Tawechai Amornsakchai. 2017. "Comparative study of natural rubber and acrylonitrile rubber reinforced with aligned short aramid fiber." Polymer testing

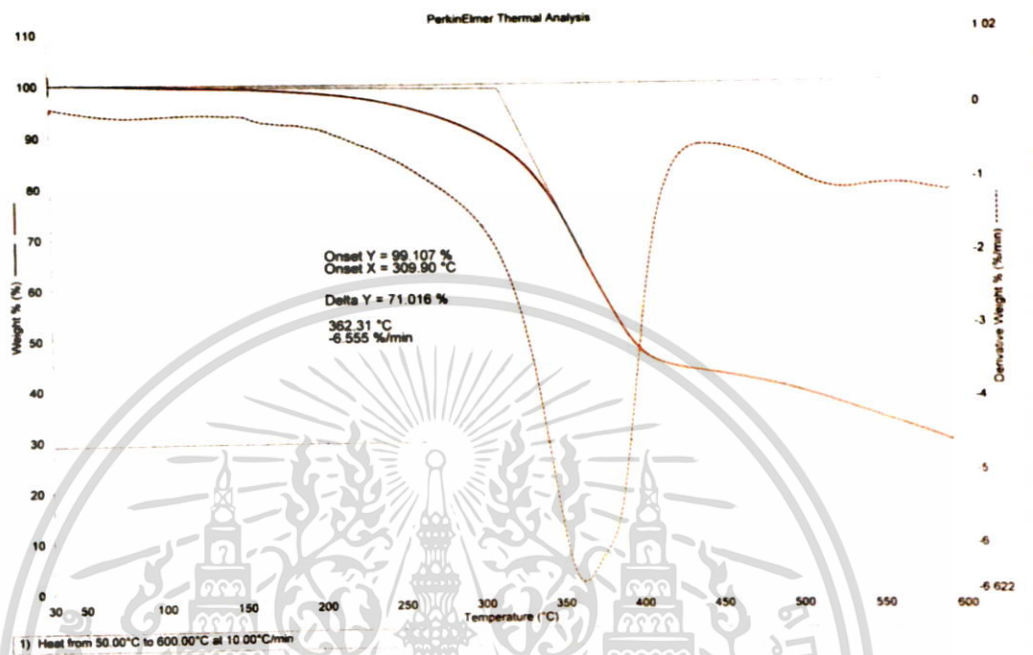
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [32] จุฑาทิพย์ ตริทศรีรัตน์ และคณะ. 2559. “การศึกษาเส้นใยเคฟลาร์และเส้นใยสัปรดเป็นสารเสริมแรงในยางถอนขนไก่” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [33] Sreeja T.D. and Kutt S.K.N. 2003. “Cure characteristics and mechanical properties of short nylon fiber reinforced natural rubber – reclaimed rubber blend” Polymer-plastics technology and engineering 42 : 239-252
- [34] Ukrit wisttanawat, Sombat thanawan and Tawechai amornsakchai. 2014. “Mechanical properties of highly aligned short pineapple leaf fiber reinforced nitrile rubber composite : Effect of fiber content and bonding agent.” Polymer testing 35 : 20-27
- [35] Soltani S., Naderi G. and Ghoreishy M.H.R.. 2010. “Mechanical and rheological properties of short nylon fiber NR/SBR composites” Rubber Research .vol. 13(2) : 110–124
- [36] ASTM D 2084 Committee On standard. 2001. “Standard test method for rubber property – Vulcanization using rotorless cure meters.” Philadelphia : American Society for Testing and Materials
- [37] ASTM D1646 Committee on standard. 1994. “Standard test methods for rubber-viscosity, stress relaxation, and per-vulcanization characteristics (Mooney viscosity).” Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [38] ASTM D412 Committee on standard. 1992. “Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic rubbers and thermoplastic elastomers-tension.” Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [39] ASTM D624 Committee on standard. 1991. “standard test method for tear strength of conventional vulcanized rubber thermoplastic elastomers.” Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [40] ASTM D2240 Committee on standard. 1991. “Standard test methods for Rubber property-Durometer hardness.” Philadelphia : American Society for Testing and Materials.

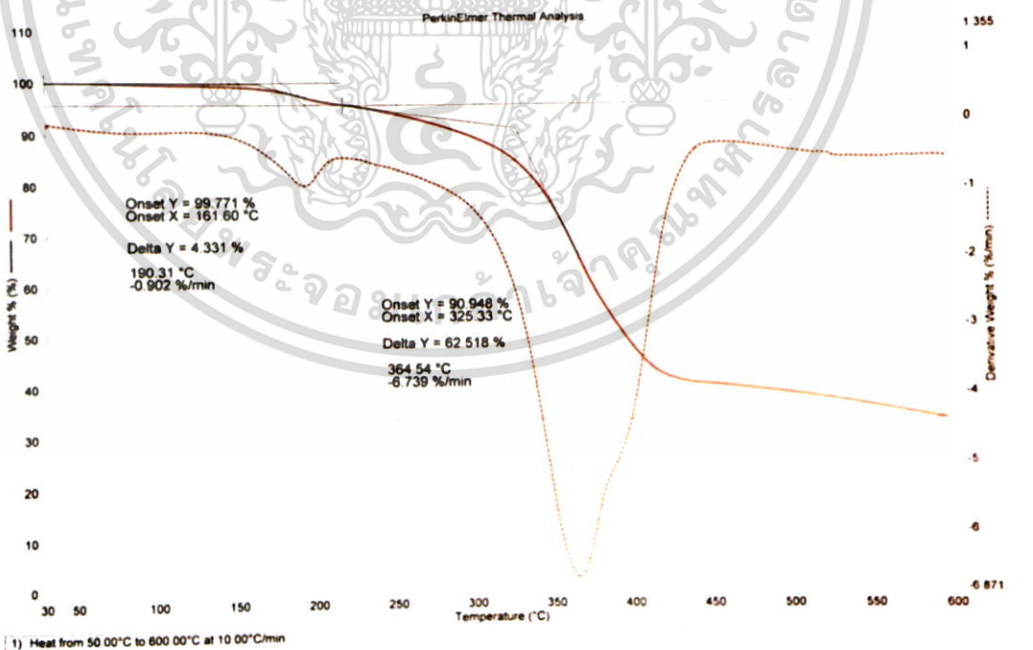


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

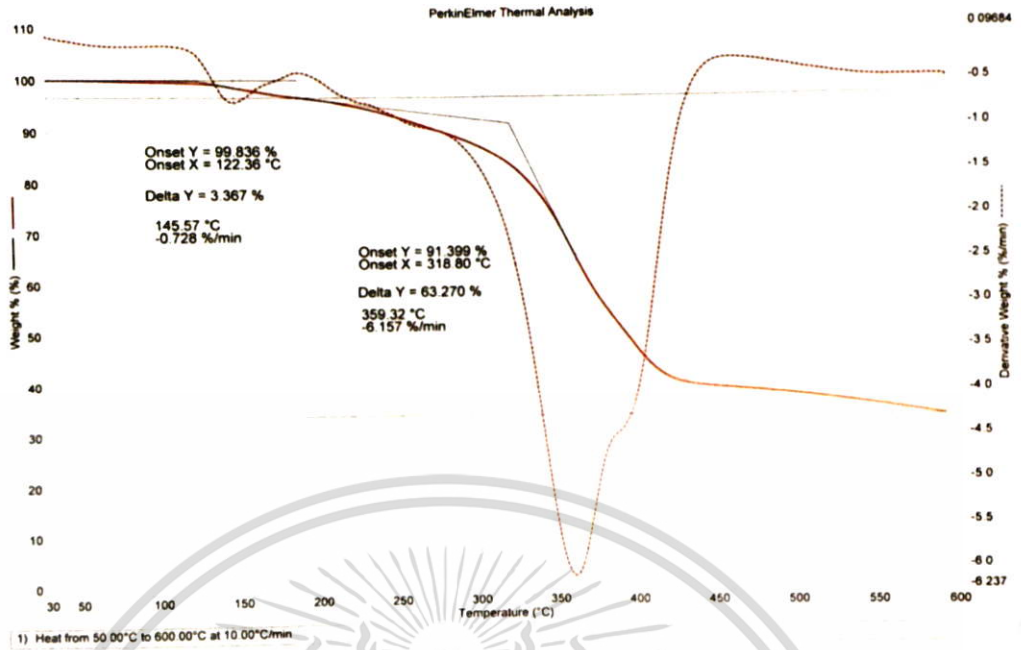


รูปที่ ก.1 เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตร



รูปที่ ก.2 เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ในยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

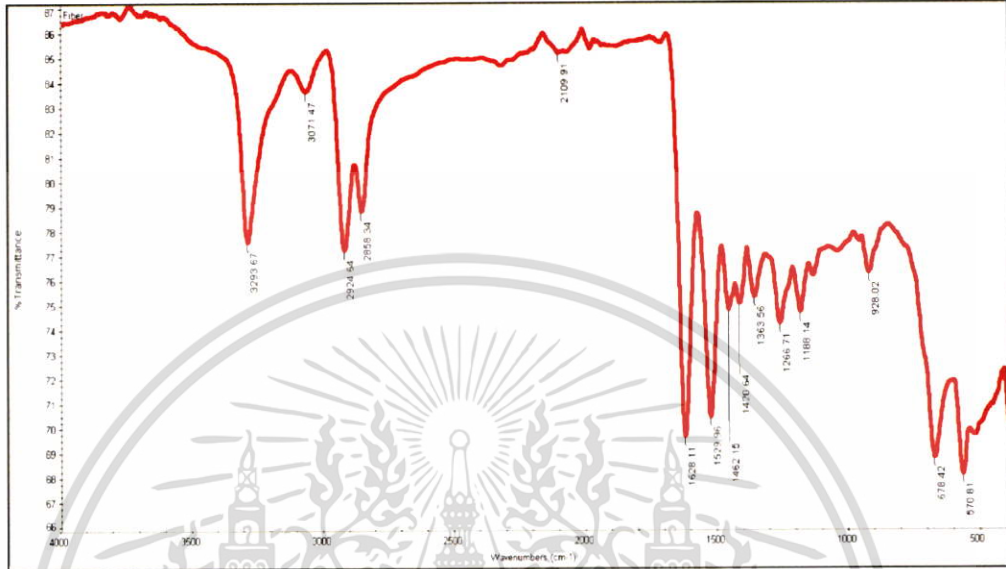


รูปที่ ก.3 เทอร์โมกราฟแสดงอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT และยูเรียในยางผสมสูตร

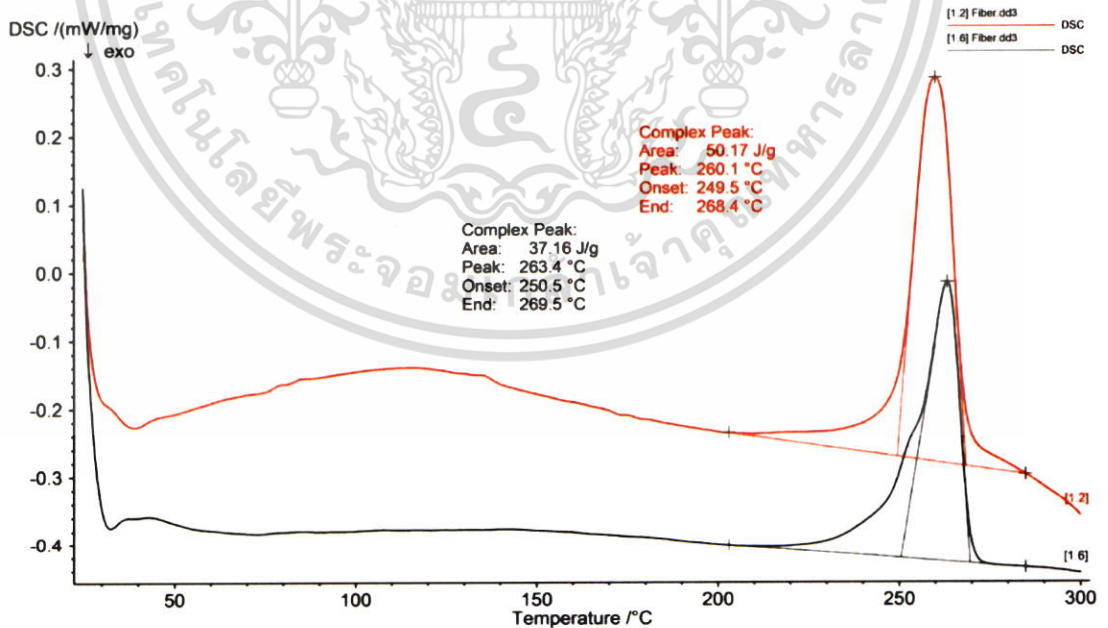


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์เส้นใยจากขยะยางรถยนต์



รูปที่ ข.1 กราฟ FT-IR ของ WTF



รูปที่ ข.2 กราฟ DSC ของ WTF

ขอสงวนลิขสิทธิ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของการขึ้นรูปทดสอบชิ้นงาน

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Tensile strength (MPa)	C50F4D1 Sheet	C50F4D1 Pipe
	3.22	3.45
	3.45	3.55
	3.33	3.6
	3.12	3.39
	3.65	3.7
Average	3.35	3.5
STD	0.21	0.12

ตารางที่ ค.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Elongation at break (%)	C50F4D1 Sheet	C50F4D1 Pipe
	185.5	198.32
	195.65	189.43
	190.02	194.2
	187.4	195.7
	193.86	200.3
Average	190.49	195.6
STD	4.26	4.17

ตารางที่ ค.3 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Tear strength (kN/m)	C50F4D1 Sheet	C50F4D1 Pipe
	14.50	15.75
	15.20	16.20
	14.01	16.61
	15.04	16.64
	14.52	15.65
Average	14.65	16.16
STD	0.47	0.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

100% Modulus (MPa)	C50F4D1 Sheet	C50F4D1 Pipe
	1.6	1.75
	1.58	1.8
	1.7	1.67
	1.64	1.79
	1.55	1.7
Average	1.614	1.742
STD	0.06	0.06

ตารางที่ ค.5 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ขึ้นรูปแตกต่างกันในทิศทางตามแนวเครื่องจักร

Density (g/cm <sup>3</sup> )	C50F4D1 Sheet	C50F4D1 Pipe
	0.855	0.867
	0.832	0.842
	0.856	0.921
	0.843	0.823
	0.865	0.854
Average	0.850	0.861
STD	0.012	0.033

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ผลของการใส่สารคู่ควบ (Coupling agent)

ตารางที่ ง.1 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ

Tensile strength (MPa)	C30F6D1	C30F6D1(Coupling agent)
MD	2.45	3.01
	2.37	2.92
	2.57	3.15
	2.50	2.90
	2.42	3.20
Average	2.46	3.01
STD	0.07	0.13
TD	2.10	2.80
	2.24	2.95
	2.34	2.75
	2.21	2.86
	2.30	2.98
Average	2.23	2.86
STD	0.09	0.09

ตารางที่ ง.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ

Elonation at break (%)	C30F6D1	C30F6D1(Coupling agent)
MD	175.21	206.31
	160.01	216.15
	170.65	216.16
	172.23	210.81
	168.20	217.12
Average	169.70	213.28
STD	5.65	4.61
TD	150.33	213.35
	155.01	217.81
	145.43	222.31
	160.12	214.06
	149.45	210.56
Average	151.80	215.50
STD	5.80	4.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ

Tear streangth (kN/m)	C30F6D1	C30F6D1(Coupling agent)
MD	10.1	16.4
	12.4	15.8
	11.5	14.7
	12.0	14.2
	14.2	17.7
Average	12.2	15.7
STD	1.41	1.38
TD	13.1	14
	10.2	15.8
	9.7	14.7
	9.5	14.2
	10.0	13
Average	10.1	14.3
STD	1.44	1.04

ตารางที่ ง.4 ค่ามอดุลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้สารคู่ควบ

100% Modolus (MPa)	C30F6D1	C30F6D1(Coupling agent)
MD	1.23	1.33
	1.11	1.54
	1.20	1.37
	1.00	1.60
	1.30	1.30
Average	1.16	1.42
STD	0.11	0.13
TD	1.22	1.16
	0.98	1.22
	1.20	1.30
	1.10	1.14
	1.11	1.22
Average	1.12	1.21
STD	0.095	0.063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### ผลของยางผสมสูตรยางธรรมชาติและยางรีเคลมเมื่อไม่มีสารให้ฟอง

ตารางที่ จ.1 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม

Tensile strength (MPa)	NR:RR-100:0	NR:RR-0:100
	7.96	5.54
	7.75	6.10
	7.55	6.21
	7.82	5.92
	9.10	5.30
Average	8.03	5.81
STD	0.61	0.38

ตารางที่ จ.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม

Elongation at break (%)	NR:RR-100:0	NR:RR-0:100
	363.3	260.6
	361.2	236.4
	368.7	240.1
	371.6	254.6
	355.7	245.7
Average	364.1	247.3
STD	6.2	10.1

ตารางที่ จ.3 ค่ามอดูลัสที่ 100% ของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีเคลม

100% Modulus (MPa)	NR:RR-100:0	NR:RR-0:100
	1.11	1.97
	1.11	1.84
	1.21	1.86
	1.19	1.91
	1.30	2.06
Average	1.18	1.92
STD	0.07	0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.4 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีไซเคิล

Tear strength (kN/m)	NR:RR-100:0	NR:RR-0:100
	14.0	13.9
	16.1	14.4
	14.3	13.5
	14.9	13.3
	14.5	12.9
Average	14.7	13.6
STD	0.85	0.57

ตารางที่ จ.5 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรโดยไม่มีสารให้ฟองของยางธรรมชาติและยางรีไซเคิล

Density (g/cm <sup>3</sup> )	NR:RR-100:0	NR:RR-0:100
	1.072	1.322
	1.054	1.290
	1.074	1.234
	1.120	1.332
	1.064	1.341
Average	1.076	1.302
STD	0.025	0.044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### การหาความยาวท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ความถ่วงจำเพาะของท่อน้ำซึม} &= 0.85 \\
 \text{ปริมาตรของท่อน้ำซึม 1 กิโลกรัม} &= 1000/0.85 \\
 &= 1176.47 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\
 \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในท่อน้ำซึมเท่ากับ 2 และ 1.46 เซนติเมตร ตามลำดับ} \\
 \text{ปริมาตรของท่อน้ำซึมยาว 1 เมตร} &= \pi(r_1^2 - r_2^2)h \\
 &= \pi(1^2 - 0.73^2) \times 100 \\
 &= 146.74 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\
 \text{ท่อน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัม มีความยาว} &= 1176.47/146.74 \\
 &= 8 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ปัฐวี พินิจกุล
วัน เดือน ปีเกิด	27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	47 หมู่ 6 ต. ท่าตะคร้อ อ. หนองหญ้าปล้อง จ. เพชรบุรี 76160
ประวัติการศึกษา	2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา เคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 2.88 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2561 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขา เทคโนโลยีพอลิเมอร์ เกรดเฉลี่ย 3.31 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-
ผลงานทางวิชาการ	Pinitkul, P. Ou-udomying, B. and Jangchud, I. 2018 “Study of porous pipes made from GRT/NR/reclaimed rubber reinforced with waste tire fiber for agricultural applications” The proceeding of International Polymer Conference of Thailand 2018 (PCT8) Bangkok, 192-196.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้