

การศึกษาทำอย่างน้ำซีเมนต์เสริมแรงด้วยเส้นใย  
เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำในระบบเกษตรอัจฉริยะ

STUDY OF FIBER REINFORCED POROUS RUBBER PIPE  
FOR SMART AGRICULTURAL SYSTEMS



มนติชา จันท์ปัญญา  
MONTICHA JUNPUNYA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2022-SC-M-012-129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF FIBER REINFORCED POROUS RUBBER PIPE  
FOR SMART AGRICULTURAL SYSTEMS



MONTICHA JUNPUNYA

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

2022

KMITL-2022-SC-M-012-129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาท่อยางน้ำซีมเสริมแรงด้วยเส้นใยเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำในระบบเกษตรอัจฉริยะ
ชื่อนักศึกษา	นางสาวมนธิชา จันทร์ปัญญา
รหัสประจำตัว	62605078
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องในการศึกษาและประยุกต์ใช้งานท่อยางน้ำซีมชนิดเสริมแรง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ให้น้ำชนิดใหม่ที่ตอบโจทย์เกษตรอัจฉริยะ ผลิตจากขยะยางรถยนต์ ได้แก่ ผงยางรถยนต์ (Ground tire rubber, GTR) ยางรีไคลม (Reclaim rubber, RR) เสริมแรงด้วยเส้นใยขยะยางรถยนต์ (Waste tire fiber, WTF) และเส้นใยใบสับประรด (Pineapple leaf fiber, PALF) มีการใช้สารให้ฟองไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) และคิกเกอร์ยูเรียเพื่อสร้างโครงสร้างเซลล์เปิด การผสมสูตรทำด้วยเครื่องผสมแบบปิด ทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที ในการทดลองตอนที่หนึ่งเป็นการศึกษาแบบจำลอง (Model study) ทำการขึ้นรูปแผ่นยางน้ำซีมด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ในอัตราส่วน GTR:RR:NR เท่ากับ 60:20:20 (โดยน้ำหนัก) ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อยางน้ำซีม ได้แก่ ชนิดเส้นใย (WTF และ PALF) ปริมาณของเส้นใย (0-15 phr) และปริมาณสารให้ฟอง (1-2 phr) พบว่าแผ่นยางน้ำซีมที่เสริมแรงด้วย PALF มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลบางประการ ได้แก่ ความหนาแน่น มอดุลัสการดึงยืดที่ 20% (M20) และความแข็งกดชอร์ซีมากกว่าแผ่นยางน้ำซีมที่เสริมแรงด้วย WTF ส่วนอัตราการซึมผ่านน้ำมีค่าน้อยกว่าแผ่นยางน้ำซีมที่เสริมแรงด้วย WTF เมื่อศึกษาปริมาณเส้นใยพบว่าค่ามอดุลัสการดึงยืดที่ 20% (M20) และ 100% (M100) และความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง DNPT จาก 1 เป็น 2 phr พบว่าค่าความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย เนื่องจากรูพรุนใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาสมบัติการไหลแบบพลวัตด้วยเทคนิค RPA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ความหนืดของยางผสมสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามก็ดียางผสมสูตร PALF มีความหนืดมากกว่ายางผสมสูตร WTF การเติมเส้นใยทำให้ค่า Tan delta น้อยกว่ายางผสมสูตรที่ไม่เติมเส้นใย

ในการทดลองตอนที่สองเป็นการศึกษาที่อย่างน้ำซึม ทำการขึ้นรูปที่อย่างน้ำซึมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว พบว่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางของที่อย่างน้ำซึมและอัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ที่อย่างน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลาง และอัตราการซึมผ่านน้ำมีค่าต่ำกว่าที่อย่างน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF นอกจากนี้ที่อย่างน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีค่าทนความดันระเบิดสูงกว่าที่อย่างน้ำซึมที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรง ที่อย่างน้ำซึมมีอัตราการซึมผ่านน้ำและความดันในแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกันจากการทดสอบที่ระยะยาว 20 เมตร ตัวอย่างที่อย่างน้ำซึมทดสอบการใช้งานจริงเป็นอุปกรณ์ให้น้ำในการปลูกผักสลัดในโรงเรือน ร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะแบบแม่นยำ พบว่าที่อย่างน้ำซึมสามารถเป็นอุปกรณ์ให้น้ำร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะได้ ที่อย่างน้ำซึมมีต้นทุนการผลิตประมาณ 7.34 บาท/เมตร งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าที่อย่างน้ำซึมจากงานนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์และใช้งานจริงในระบบเกษตรอัจฉริยะ

**คำสำคัญ :** การเกษตรอัจฉริยะ ที่อย่างน้ำซึม แผ่นยางน้ำซึม เส้นใยชยะยางรถยนต์ เส้นใยใบ-สับประรด อุปกรณ์ให้น้ำ

<b>Thesis Title</b>	Study of Fiber Reinforced Porous Rubber Pipe for Smart Agricultural Systems
<b>Student Name</b>	Miss Monticha Junpunya
<b>Student ID</b>	62605078
<b>Degree</b>	Master of Science (Polymer Technology)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2022
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Taweechai Amornsakchai

### Abstract

In this research, a novel water irrigation equipment for smart agriculture so called “reinforced rubber porous pipe” was further studied from previous works. The pipes can be produced from waste worn-out tires, i.e., ground tire rubber (GTR) and reclaimed rubber (RR). Waste tire fibers (WTF) and pineapple leaf fibers (PALF) were used as the reinforcement. Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT) blowing agent and urea kicker were used to create open-cell structures. Compound samples were mixed by an internal mixer. Samples were then vulcanized by hot air oven at 160°C for 20 min. In the first part, porous rubber sheets (model study) were shaped by compression machine. Ratio of the GTR, RR and NR was fixed at 60:20:20 (by weight). Factors affecting sample properties were studied, such as, fiber types (WTF and PALF), fiber loadings (0-15 phr) and blowing agent loadings (1 and 2 phr). It was found that density, modulus (at 20% strain, M20) and hardness (Shore C) of PALF reinforced porous rubber sheet higher than those of WTF reinforced porous rubber sheet. However, water permeability rate of PALF reinforced porous rubber sheet was lower. By studying fiber loadings, it was found that moduli (M20 and M100) and hardness had a trend to increase when fiber loading was increased. In addition, water permeability rate was decreased with increasing fiber loading. When blowing agent loading was increased from 1 to 2 phr, density of samples was slightly decreased yielding larger porous sizes, in turn, resulting in increasing water permeability rate. Nevertheless,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

mechanical properties were insignificantly different. By using RPA, dynamic properties of the mixtures were studied. It was found that viscosity and storage modulus were slightly increased when the fibers were increased. However, viscosity of PALF compounds was higher than that of WTF compounds. By adding the fibers, tan delta was decreased.

In the second part, porous rubber pipes were shaped by a single screw extruder. It was found that %diameter swell and water permeability rate of the pipes were decreased as the fiber loading was increased. %Diameter swell and water permeation rate of WTF reinforced porous rubber pipes were lower than those of PALF ones. By adding the fibers, burst pressure of reinforced fiber pipe samples was also higher. In addition, water permeability rate and water pressure each position along the 20 meter length were unchanged. Pipe samples were also tested in real application as irrigation device in greenhouse vegetable farming with precision smart agriculture system. It was proven that the rubber porous pipes could be used efficiently in the smart farming system. The production cost of the pipes was about 7.34 baht/meter. It can be concluded that porous rubber pipes in this research have a potential for commercial production and smart agriculture system.

**Keywords :** Smart agriculture, Porous rubber pipe, Porous rubber sheet, Waste tire fiber (WTF), Pineapple leaf fiber (PALF), Irrigation equipment

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาของ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา ตลอดจนเสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินงาน ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการ รศ.ดร.สมบัติ ธนะवंดี และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ และตรวจทาน แก่ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ โครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (ITAP) และ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโท และขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนการเสนอผลงานวิชาการ

ขอขอบคุณ คุณบุญหาญ อุ่อดมยิ่ง บริษัท แสงไทยผลิตายาง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เรื่อง เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในด้านปฏิบัติการทดลองงานวิจัย รวมถึงบุคลากรในบริษัท ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ รศ.อนุพงศ์ สรงประภา และบริษัท เมอร์ลินเนียม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เรื่อง อุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ IoT รวมถึงให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้งาน

ขอขอบคุณ บริษัท วิสและบุตร จำกัด บริษัท แอมพาเซ็ท จำกัด และบริษัท เอ็กซอนโมบิล จำกัด สำหรับการสนับสนุนการสร้างโรงเรือน (Greenhouse) เพื่อใช้ในการทดลองปลูกผักสลัด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมืออำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ และอาคารสถานที่สำหรับปฏิบัติ รวมทั้งคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้บริการในการตรวจวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว และขอบคุณเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจสำคัญตลอดการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา ซึ่งผู้เขียนไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ได้ทั้งหมด หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวมนชิตา จันทร์ปัญญา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 ยางธรรมชาติ.....	7
2.2 ยางรีเคลม.....	8
2.2.1 วิธีการทำยางรีเคลม.....	9
2.3 ผงยางรถยนต์.....	10
2.3.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding).....	10
2.3.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding).....	11
2.4 พอลิเมอร์ผสม.....	12
2.5 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular rubber).....	13
2.5.1 การจำแนกผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุน.....	15
2.5.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation).....	15
2.6 คอมโพสิต.....	17
2.6.1 อินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ (Fiber-matrix interfaces).....	17
2.6.2 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of adhesion).....	17
2.7 เส้นใยเสริมแรง.....	20
2.7.1 เส้นใยไนลอน.....	20
2.7.2 เส้นใยธรรมชาติ.....	21
2.7.2.1 การจัดกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.2.2 เส้นใยใบสับประรด (Pineapple leaf fiber, PALF) .....	22
2.8 สารเติมแต่งสำหรับยาง .....	25
2.8.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) .....	25
2.8.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators).....	26
2.8.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators).....	27
2.8.4 สารตัวเติม (Fillers).....	28
2.8.4.1 เขม่าดำ (Carbon black).....	28
2.8.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants).....	29
2.8.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	29
2.8.7 สารให้พอง (Blowing agents).....	29
2.8.7.1 Dinitro pentamethylene tetramine (DNPT หรือ DPT).....	30
2.8.8 คิกเกอร์ (Kickers).....	31
2.8.9 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG).....	31
2.9 ท่อน้ำซึม .....	32
2.9.1 หลักการทำงาน .....	32
2.9.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้น้ำ.....	33
2.10 การเกษตรอัจฉริยะ .....	33
2.11 ท่อน้ำซึมเชิงพาณิชย์.....	34
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	36
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>42</b>
3.1 แผนการดำเนินงาน .....	42
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.4 วิธีการทดลอง.....	49
3.4.1 การเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย.....	49
3.4.1.1 การเตรียมเส้นใยขยะยางรถยนต์ (WTF).....	49
3.4.1.2 การเตรียมเส้นใยใบสับประรด (PALF).....	50
3.4.2 การผสมสูตรยาง.....	50
3.4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานและเวลาการเชื่อมโยง.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.4 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อยางน้ำซึม.....	51
3.4.4.1 ผลของปริมาณเส้นใยขะยะยางรถยนต์และเส้นใยใบสับปะรด.....	51
3.4.4.2 ผลของปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำ .....	51
3.4.4.3 การศึกษาสมบัติการไหลพลวัตของยาง (RPA) .....	51
3.4.4.4 การเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำและการทนความดันสูงสุด ของท่อยางน้ำซึม .....	52
3.4.4.5 ผลของความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อและผลของความยาวท่อ ต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ .....	52
3.4.5 การทดสอบและวิเคราะห์.....	53
3.4.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเส้นใย .....	53
3.4.5.2 การทดสอบความเหนียว.....	53
3.4.5.3 การทดสอบความหนาแน่น.....	53
3.4.5.4 การทดสอบสมบัติรับแรงดึง.....	53
3.4.5.5 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด.....	54
3.4.5.6 การทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์.....	54
3.4.5.7 การศึกษาสัญญาณวิทยา.....	54
3.4.5.8 การทดสอบพลวัตของยาง .....	55
3.4.5.9 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ .....	55
3.4.5.10 การทดสอบความดันระเบิด (Burst pressure test) .....	56
3.4.5.11 การทดลองสาธิตการใช้งานจริงร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะ.....	56
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>58</b>
4.1 การเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของเส้นใย โดยขึ้นรูปเป็นแผ่นยางน้ำซึม .....	59
4.2 การศึกษาปริมาณสารให้ฟองและอัตราการซึมผ่านน้ำ โดยขึ้นรูปเป็นแผ่นยางน้ำซึม.....	71
4.3 การศึกษาสมบัติการไหลแบบพลวัตและสมบัติการซึมผ่านน้ำของท่อยางน้ำซึม.....	78
4.3.1 การศึกษาสมบัติการไหลแบบพลวัต .....	78
4.3.2 การศึกษาสมบัติการซึมผ่านน้ำของท่อยางน้ำซึม.....	80
4.3.2.1 การศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำ.....	81
4.3.2.2 การศึกษาผลของความยาวท่อยางน้ำซึมต่อความดันน้ำ .....	84
4.4 การทดลองสาธิตการใช้งานจริงของท่อยางน้ำซึม .....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สรุปสูตรที่เหมาะสมของท่อขำน้ำซึ่มและวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต .....	89
4.5.1 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของท่อขำน้ำซึ่ม.....	89
4.5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	90
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>92</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
เอกสารอ้างอิง .....	94
ภาคผนวก .....	100
ภาคผนวก ก.....	102
ภาคผนวก ข.....	103
ภาคผนวก ค.....	106
ภาคผนวก ง.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ เทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการเสริมแรงพลาสติกและยาง .....	24
2.2 เปรียบเทียบผลผลิตเส้นใยที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ .....	25
2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky pipe systems .....	35
2.4 ข้อมูลความดันในการใช้งาน ปริมาณน้ำ และราคาท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า.....	36
3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ เกรด STR 5L .....	45
3.2 สมบัติบางประการของยางรีเคลม เกรด UCD-105 ที่ใช้ในงานวิจัย .....	46
3.3 สมบัติทางเคมีบางประการของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (PALF) ที่ใช้ในงานวิจัย .....	46
3.4 สมบัติบางประการของ DNPT ที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.5 สมบัติบางประการของ Urea ที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.6 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ.....	48
3.7 สูตรการผลิตท่อน้ำซึม.....	49
4.1 พิก FTIR จากการตรวจวิเคราะห์เส้นใย WTF.....	61
4.2 พิก FTIR จากการตรวจวิเคราะห์เส้นใย PALF.....	61
4.3 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความหนาและลักษณะของท่อน้ำซึมในแต่ละสูตร .....	81
4.4 ผลของความยาวท่อน้ำซึมต่อความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ .....	84
4.5 ชื่อและหน้าที่ของอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ .....	86
4.6 การเจริญเติบโตของผักสลัดในแต่ละวัน .....	88
4.7 สมบัติบางประการของท่อน้ำซึมสูตร C40D2WTF12 .....	89
4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึม.....	90
ค.1 อัตราการซึมผ่านน้ำ ( $L/m^2/h$ ) ที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF ที่ปริมาณสารให้ฟอง 1 และ 2 phr.....	106
ค.2 อัตราการซึมผ่านน้ำ ( $L/m^2/h$ ) ที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย PALF ที่ปริมาณสารให้ฟอง 1 และ 2 phr.....	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ท่อน้ำซีเมนต์ผลิตจาก a) พลาสติก และ b) ยาง.....	1
1.2 วัฏจักรของเศรษฐกิจหมุนเวียน (ซ้าย) และวัฏจักรของเศรษฐกิจเส้นตรง (ขวา).....	2
1.3 กองขยะยางรถยนต์.....	3
1.4 ไบโสบัปเกรด .....	5
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน).....	7
2.2 กลไกของปฏิกิริยาไดฟีนิลไดซัลไฟด์ระหว่างการดีวัลคาไนเซชัน .....	9
2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน .....	13
2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน .....	13
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ.....	14
2.6 มุมสัมผัส และแรงดึงผิวของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง .....	18
2.7 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ Nylon 6,6.....	20
2.8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส .....	21
2.9 แผนภาพการแบ่งกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช.....	22
2.10 ขั้นตอนการแยกเส้นใยจากไบโสบัปเกรดด้วยวิธีบดเชิงกล .....	25
2.11 ลักษณะของเส้นใยไบโสบัปเกรดที่แยกด้วยวิธีการบดเชิงกล (ซ้าย) หลังจากการขึ้นเป็นแผ่นเส้นใยแบบไม่ทอ (กลาง) และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของแผ่นเส้นใย (ขวา).....	25
2.12 กลไกปฏิกิริยาการสลายตัวของ DNPT.....	31
2.13 ท่อน้ำซีเมนต์.....	32
2.14 การใช้ IoT เพื่อทำการเกษตรอัจฉริยะ.....	34
2.15 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซีเมนต์ บริษัท กสิพันธ์ จำกัด .....	35
2.16 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซีเมนต์ Porous pipe Ltd. ....	36
3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของแผ่นยางน้ำซีเมนต์ .....	43
3.2 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของท่อยางน้ำซีเมนต์ .....	44
3.3 การทดสอบความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อและผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ.....	52
3.4 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อยางน้ำซีเมนต์.....	55
3.5 แผนผังแปลงสาริตการใช้งานจริงร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะ .....	56
3.6 การเพาะต้นกล้าในสภาพหลุม a) กรีนโอ๊ค (Green oak) และ b) เรดโอ๊ค (Red oak).....	56
3.7 ต้นกล้าในแปลงเพาะปลูกในโรงเรือน.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ a) แผ่นยางน้ำซึม และ b) ท่อยางน้ำซึม .....	58
4.2 เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย a) WTF และ b) PALF .....	59
4.3 SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยที่กำลังขยาย 120 เท่า a) WTF และ b) PALF .....	60
4.4 กราฟ FTIR ของ WTF .....	60
4.5 กราฟ FTIR ของ PALF .....	60
4.6 ค่าความหนืดมูนิของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใย ที่แตกต่างกัน .....	62
4.7 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย a) ไม่มีเส้นใย b) WTF 3 phr c) WTF 12 phr d) PALF 3 phr และ e) PALF 12 phr แยกหักที่ อุณหภูมิตำที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	63
4.8 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใย ที่แตกต่างกัน .....	64
4.9 กราฟความเค้น-ความเครียดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน.....	65
4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใย ที่แตกต่างกัน .....	66
4.11 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใย ที่แตกต่างกัน.....	66
4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน .....	67
4.13 ค่ามอดุลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน .....	68
4.14 ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M100) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน .....	68
4.15 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน .....	69
4.16 แบบจำลองของระบบคอมพิวเตอร์ท่อยางน้ำซึม.....	69
4.17 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ a) แผ่นยางน้ำซึมขณะทดสอบ b) เครื่องทดสอบ .....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางจำลองสูตร WTF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและความดันน้ำแตกต่างกัน .....	70
4.19 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางจำลองสูตร PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและความดันน้ำแตกต่างกัน .....	71
4.20 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน .....	72
4.21 อัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมสูตร WTF ที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr .....	73
4.22 อัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมสูตร PALF ที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr .....	73
4.23 SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วย WTF 6 phr แยกหักที่อุณหภูมิต่ำที่กำลังขยาย 150 เท่า a) DNPT 1 phr และ b) DNPT 2 phr .....	74
4.24 SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วย PALF 6 phr แยกหักที่อุณหภูมิต่ำที่กำลังขยาย 150 เท่า a) DNPT 1 phr และ b) DNPT 2 phr .....	74
4.25 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน .....	75
4.26 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน .....	75
4.27 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน .....	76
4.28 ค่ามอดุลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน .....	76
4.29 ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M100) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน .....	77
4.30 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน .....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ค่าความหนืดของยางผสมสูตรของ WTF และ PALF ที่ปริมาณ 6 และ 12 phr ในโหมด Frequency sweep.....	79
4.32 ค่ามอดูลัสสะสมของยางผสมสูตรของ WTF และ PALF ที่ปริมาณ 6 และ 12 phr ในโหมด Stain sweep.....	80
4.33 ค่า Tan delta ของยางผสมสูตรของ WTF และ PALF ที่ปริมาณ 6 และ 12 phr ในโหมด Stain sweep.....	80
4.34 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF และ PALF ปริมาณ 6 และ 12 phr ที่ความดันน้ำต่าง ๆ.....	82
4.35 ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF และ PALF ปริมาณ 6 และ 12 phr ที่ความดันน้ำต่าง ๆ.....	82
4.36 ค่าความดันระเบิดของท่อยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF และ PALF ปริมาณ 6 และ 12 phr	83
4.37 ภาพถ่ายท่อยางน้ำซึมสูตร C40D2WTF12 ที่ความดัน 1.8 bar.....	84
4.38 โรงเรียนปลูกผักสลัด ณ โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา สุวินทวงศ์ กรุงเทพมหานคร.....	86
4.39 อุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ a) วาล์วน้ำ IoT b) เซนเซอร์ดิน IoT c) เซนเซอร์อากาศ และ LoRa gateway และ d) กล้อง.....	87
4.40 แดชบอร์ด (Dashboard) แสดงข้อมูลต่าง ๆ บนเว็บไซต์ skmfarm.com.....	87
4.41 ลักษณะของผักสลัดในระยะเวลา 55 วัน.....	88
ก.1 กราฟ DSC ของ C30D2WTF6.....	102
ก.2 กราฟ DSC ของ C30D2PALF6.....	102
ข.1 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF และมีสารให้ฟอง 1 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	103
ข.2 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF และมีสารให้ฟอง 2 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	104
ข.3 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF และมีสารให้ฟอง 1 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	104
ข.4 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF และมีสารให้ฟอง 2 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไทยแลนด์ 4.0 เป็นวิสัยทัศน์เชิงนโยบายการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนเศรษฐกิจแบบเดิมไปสู่เศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม [1] ได้แก่ การเปลี่ยนจากการผลิตสินค้าโภคภัณฑ์ไปสู่สินค้าเชิงนวัตกรรม การเปลี่ยนจากการขับเคลื่อนประเทศด้วยภาคอุตสาหกรรมไปสู่การขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีและความคิดสร้างสรรค์ ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงได้มีการเปลี่ยนจากการเกษตรแบบดั้งเดิมเป็นการเกษตรสมัยใหม่ ที่เน้นการบริหารจัดการและเทคโนโลยี ได้แก่ เกษตรอัจฉริยะ (Smart farming) โดยในช่วง 20 ปีมาหลาย ๆ ที่ในโลกได้เริ่มพัฒนาเทคโนโลยีด้านการเกษตรไปอีกขั้นกับการนำเครื่องมือใหม่ ๆ และระบบการเกษตรอัจฉริยะแม่นยำ (Precision farming) เข้ามาใช้ ซึ่งเกิดจากแนวคิดที่ว่า การปลูกพืชนั้นมีปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลทั้งเรื่องของดินฟ้าอากาศ ดังนั้นในไร่นาจึงมีความแตกต่างกันในแต่ละบริเวณแม้อยู่ในไร่เดียวกัน [2] เป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีหรือหุ่นยนต์ เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูงเข้ามาช่วยในการทำงาน โดยให้ความสำคัญกับความปลอดภัยต่อผู้บริโภคน สิ่งแวดล้อม และเป็นการใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่าที่สุด [3]

จากสถานการณ์ในปัจจุบันการขาดแคลนน้ำเพื่อการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นช่วงหน้าแล้ง หลังเก็บเกี่ยว หรือช่วงฝนทิ้งช่วง พบว่าเป็นปัญหาสำคัญของเกษตรกร และพบประจำต่อเนื่องแทบทุกปี ซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตทางการเกษตร ดังนั้นแนวทางการใช้น้ำในปัจจุบันจึงไม่ใช่การกักเก็บน้ำเพียงอย่างเดียว แต่ต้องรวมถึงการใช้น้ำได้อย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการให้น้ำที่ประหยัดน้ำและมีประสิทธิภาพต่อการเพาะปลูก เช่น ท่อน้ำซึม ท่อน้ำหยด ฯลฯ

ท่อน้ำซึม (Porous pipe) เป็นนวัตกรรมหนึ่งที่สามารถให้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปรับอัตราการไหลของน้ำได้จากการควบคุมความดันน้ำ จึงทำให้ประหยัดน้ำได้มากขึ้น ใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำแบบแม่นยำ (Precision irrigation system) สามารถผลิตได้จากยางและพลาสติก แสดงดังรูปที่ 1.1 ซึ่งท่อน้ำซึมที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ทั้งในประเทศและต่างประเทศส่วนใหญ่พบว่าเป็นท่อพลาสติกผสมยางรถยนต์ (Ground tire rubber; GTR) อย่างไรก็ตามท่อน้ำซึมทำจากพลาสติกมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ โค้งงอยาก แตกหักเมื่อได้รับแรงกระทำ เช่น พับงอและเหยียบย่ำ นอกจากนี้ยังอึดตันง่าย เนื่องจากท่อมีความแข็งและเป็นรูพรุน [4] นอกจากนี้ท่อน้ำซึมในเชิงพาณิชย์ยังมีราคาจำหน่ายที่สูง (ประมาณ 35-70 บาท/เมตร) [5-7] ทำให้มีการใช้งานจำกัดและยังไม่เป็นที่นิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ท่อน้ำซีมผลิตจาก a) พลาสติก [8] และ b) ยาง

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และส่งออกในรูปยางดิบมากที่สุด ในโลก ปี 2564 มีจำนวนเกษตรกรที่ทำการเพาะปลูกยางพาราถึง 1.1 ล้านครัวเรือน ซึ่งมีผลผลิตประมาณ 4.87 ล้านตัน หรือ 33.4% ของผลผลิตโลก [9] อุตสาหกรรมยางพาราของประเทศไทยถือว่ามีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยางพาราค่อนข้างมาก ซึ่งที่ผ่านมานโยบายในการพัฒนาอุตสาหกรรมยางพาราปลายน้ำของไทยไม่ชัดเจน ทำให้การผลิตของไทยส่วนใหญ่เป็นการแปรรูปยางพาราขั้นต้น เพื่อส่งออกตามความต้องการของประเทศ ปัจจุบันมีผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางขั้นปลายจำนวนน้อย ทำให้ผู้ประกอบการไทยประสบปัญหาด้านการแข่งขันสูงจากลักษณะสินค้าที่มีความคล้ายกัน (Low product differentiation) ปัญหาที่ไทยกำลังพบเจอ คือ การลงทุนพัฒนาอุตสาหกรรมยางพาราขั้นปลายของไทยที่ยังมีไม่มากนัก [10]

เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) เกิดจากวิกฤตการณ์ด้านทรัพยากรธรรมชาติและพลังงาน ระบบเศรษฐกิจต้องเผชิญกับความเสี่ยงด้านอุปทานจากการขาดแคลนวัตถุดิบในการผลิตและปัญหามลภาวะของสิ่งแวดล้อม ทำให้แนวคิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนถูกกล่าวอีกครั้งจากองค์กรระหว่างประเทศ รัฐบาล และกลุ่มธุรกิจรายใหญ่ เนื่องจากเศรษฐกิจหมุนเวียนให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพของการจัดการของเสียจากการผลิตและบริโภค ด้วยการนำวัตถุดิบที่ผ่านการผลิตและบริโภคแล้วเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ (Re-material) และสนับสนุนการใช้ซ้ำ (Reuse) ซึ่งต่างจากเศรษฐกิจแบบเส้นตรง (Linear economy) ที่มีการดึงทรัพยากรธรรมชาติออกมาใช้ในจำนวนมหาศาลก่อนจะนำทรัพยากรเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการผลิต ขายให้ลูกค้าได้นำไปใช้งาน ซึ่งเมื่อผลิตภัณฑ์หมดประโยชน์แล้วทิ้งกลายเป็นขยะ [11] ดังรูปที่ 1.2 ทั้งนี้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนตั้งอยู่บนหลักการ 3 ข้อ ได้แก่

1. การรักษาและเพิ่มประสิทธิภาพทุนด้านทรัพยากรธรรมชาติ
2. การใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้วยการหมุนเวียนวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์
3. การรักษาประสิทธิภาพของระบบด้วยการระบุและลดผลกระทบเชิงลบให้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 วัฏจักรของเศรษฐกิจหมุนเวียน (ซ้าย) และวัฏจักรของเศรษฐกิจเส้นตรง (ขวา) [12]

หลักการทั้ง 3 ข้อ ทำให้เกิดลักษณะสำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียน คือ การทำให้ระบบเศรษฐกิจไม่มีขยะ การขับเคลื่อนเศรษฐกิจด้วยพลังงานหมุนเวียน การให้ความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต และการที่ราคาสะท้อนถึงต้นทุนที่แท้จริง โดยเมื่อวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิต (Manufacturing) และกระจายไปยังผู้บริโภคแล้ว (Distribution) สิ่งที่เหลือจากการบริโภค (Use and Disposal) จะถูกนำกลับไปจัดสรรใหม่ (Reuse/Redistribution) หรือนำกลับสู่กระบวนการผลิตอีกครั้ง (Re-manufacturing/Recycle) เพื่อคืนความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ทรัพยากรธรรมชาติ พื้นฟูระบบนิเวศ ลดผลกระทบเชิงลบ และเพิ่มผลกระทบเชิงบวกต่อระบบเศรษฐกิจ [13] ซึ่งเศรษฐกิจหมุนเวียนยังสอดคล้องกับ 1 ใน 17 เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของโลก (Sustainable development goals, SDGs) จากองค์การสหประชาชาติในเรื่องสร้างหลักประกันให้มีรูปแบบการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน (SDG12)

ในปัจจุบันยางล้อได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีบทบาทสำคัญต่อชีวิตประจำวันของทุกคน ไม่ว่าจะเป็นอย่างล้อขนส่งบุคคลหรือสาธารณะ ยางที่ใช้ในการผลิตยางล้อมีปริมาณการใช้ 17 ล้านตันต่อปี ในประเทศไทยพบว่ามีขยะยางรถยนต์กว่า 600,000 ตัน [14] ซึ่งมีการสะสมของยางเสียจำนวนมาก ดังรูปที่ 1.3 ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงได้มีการนำยางรถยนต์กลับมาใช้ใหม่ ด้วยการนำมาทำให้เป็นเศษยางเพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น การนำเศษยางมาทำยางรีเคลม (Reclaimed rubber, RR) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด



รูปที่ 1.3 กองขยะยางรถยนต์ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังร่วมกับบริษัท แสงไทยผลติยาง จำกัด ร่วมกันพัฒนา “ท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe)” มีจุดเด่นคือ ท่อมีความนิ่ม ยืดหยุ่นสูง สามารถตัดโค้งได้ตามต้องการ ที่ผนังของท่อมีรูพรุนอยู่รอบ ๆ ทำให้น้ำสามารถซึมออกมาได้อย่างสม่ำเสมอ ในอัตราที่กำหนดตามความเหมาะสมกับความต้องการของพืช โดยสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำได้จากการควบคุมความดันน้ำ นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ผลิตท่ออย่างมีราคาถูกมีองค์ประกอบหลักเป็นผงยางที่บดจากยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว มีต้นทุนการผลิตต่ำมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์และใช้งานจริง อย่างไรก็ตามท่อยางน้ำซึมสามารถทนแรงดันน้ำได้ต่ำ และมีอัตราการซึมผ่านน้ำที่มากเมื่อเพิ่มความดันโดยเฉพาะความดันสูง และมีการขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางมาก เนื่องจากรูพรุนเกิดการขยายตัว และเกิดการฉีกขาดส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านน้ำสูง [16-17] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [18] ศึกษาสมบัติและการประยุกต์ใช้งานท่อน้ำซึมชนิดเสริมแรงที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมยางรีไซเคิลและผงยางรถยนต์ โดยมีเศษเส้นใยยางรถยนต์ (Waste tire fiber, WTF) ชนิดเส้นใยสั้นจากชั้นพลาย (Ply) ของยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเป็นสารเสริมแรง สารให้ฟองไดโนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) และคิกเกอร์ยูเรียถูกใช้เพื่อสร้างโครงสร้างเซลล์เปิด ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อน (Hot air oven) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) และยาง (NR และ RR) เท่ากับ 60:40 ที่อุณหภูมิเชื่อมโยง 160°C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อทดสอบสมบัติของท่อน้ำซึม พบว่าท่อน้ำซึมชนิดเสริมแรงด้วยเส้นใยพลายสามารถทนแรงดันน้ำได้ 1.1 บาร์

จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากที่ถูกปล่อยหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร หนึ่งในนั้นคือใบสับปะรด (Pineapple leaf) แสดงดังรูปที่ 1.4 ซึ่งสับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ในแต่ละรอบการผลิตจะมีใบสับปะรดสดที่ถูกทิ้งรวมมากกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อไร่ [19] ใบสับปะรดเหล่านี้เป็นภาระต่อเกษตรกร อย่างไรก็ตามใบสับปะรดสดมีเส้นใยโดยเฉลี่ยประมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นที่ทราบว่าเส้นใยใบสับปะรด (Pineapple leaf fiber, PALF) มีความแข็งแรงของเส้นใยที่สูงเมื่อเทียบกับเส้นใยธรรมชาติประเภทอื่น ๆ จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง อีกทั้งยังสามารถช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งในประเทศได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการผลิตท่อยางน้ำซึมในเชิงพาณิชย์ยังไม่มี การนำเส้นใยจากธรรมชาติมาใช้ในการเสริมแรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเส้นใยใบสับปะรดมาใช้ศึกษาเปรียบเทียบกับเส้นใยขยะยางรถยนต์ ซึ่งตอบโจทย์ในเรื่องของการใช้วัสดุชีวภาพ (Bio based materials) และเป็นวัสดุที่มีใช้ไม่หมดสิ้น (Renewable materials)



รูปที่ 1.4 ใบสับปะรด [20]

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาท่อน้ำซึมชนิดเสริมแรงให้มีความแข็งแรง สามารถทนความดันน้ำได้มากขึ้น โดยศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของเส้นใยขยะยางรถยนต์และเส้นใยใบสับปะรดเป็นสารเสริมแรงแก่ท่อน้ำซึม เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและเป็นการลดวัสดุเหลือทิ้งจากขยะยางรถยนต์และธรรมชาติ โดยคาดว่าท่อน้ำซึมที่พัฒนาได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับเกษตรอัจฉริยะได้ โดยเป็นงานวิจัยร่วมกันระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด เพื่อขึ้นรูปท่อน้ำซึมในเชิงอุตสาหกรรม และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตท่อน้ำซึมในเชิงพาณิชย์

สมบัติของท่อน้ำซึม ที่เป็นเป้าประสงค์ของงานวิจัยมีดังนี้

- |  |                     |
|--|---------------------|
| - ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)                  | ไม่น้อยกว่า 2 MPa   |
| - เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) | ไม่น้อยกว่า 100 %   |
| - ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)                  | ไม่น้อยกว่า 15 kN/m |
| - อัตราการซึมผ่านน้ำ (Water permeability)            | ไม่น้อยกว่า 2 l/m/h |

หมายเหตุ : เป้าประสงค์กำหนดโดยบริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัดและโครงการ iTAP

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาท่อน้ำซึมที่ผลิตจากขยะยางรถยนต์ ผงยางรถยนต์ (GTR) และยางรีเคลม (RR) เสริมแรงด้วยเส้นใย โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติของวัสดุ เช่น ชนิดและปริมาณเส้นใย ปริมาณสารให้ฟอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเส้นใยขยะยางรถยนต์ (WTF) และเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม สามารถใช้ท่อน้ำซึมที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์และสามารถประยุกต์ใช้งานจริงกับระบบเกษตรอัจฉริยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ตรวจสอบวิเคราะห์เส้นใยด้วยเทคนิคแอมพเทนนูเอเทคโทพัลรีเฟลคชันฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (ATR-FTIR) และเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (SEM)

2) เตรียมตัวอย่างแผ่นยางน้ำซึม (Porous rubber sheet) โดยใช้อัตราส่วนของผงยางรถยนต์ต่ออย่างธรรมชาติต่ออย่างรีเคลม (GTR:NR:RR) เป็น 60:20:20 (โดยน้ำหนัก) ขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณเส้นใยขยะยางรถยนต์ (WTF) และเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ที่ปริมาณ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 phr โดยผสมสูตรและขึ้นรูปแผ่นยางน้ำซึม โดยเติมสารให้ฟอง DNPT ปริมาณ 2 phr เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ สัมฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการซึมผ่านน้ำ

- ศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณสารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr โดยใส่เส้นใย WTF และเส้นใย PALF ที่ปริมาณ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 phr โดยผสมสูตรและขึ้นรูปแผ่นยางน้ำซึม เพื่อทดสอบสมบัติทางกายภาพ สัมฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการซึมผ่านน้ำ

3) เตรียมตัวอย่างท่อยางน้ำซึม โดยใช้อัตราส่วนของ GTR:RR เป็น 60:40 (โดยน้ำหนัก) เติมเขม่าดำ 10 phr และเลือกปริมาณเส้นใยที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมจากข้อข้างต้นมาผลิตเป็นท่อยางน้ำซึมด้วยกระบวนการอัดรีด เพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อยางน้ำซึม ได้แก่ อัตราการซึมผ่านของน้ำ เปร้อเซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลาง ความดันระเบิดและความดันลด (Pressure drop) ของท่อยางน้ำซึม

4) ศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติวิสโคอิลาสติกของยางผสมสูตรเส้นใยด้วยเครื่องทดสอบสมบัติพลวัตของยาง (Rubber process analyzer, RPA)

5) ทดลองสาธิตการใช้งานจริงร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะปลูกผักสลัดอินทรีย์ (ผักสลัดกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค)

6) วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของสูตรท่อยางน้ำซึมที่สามารถผลิตได้ในเชิงพาณิชย์

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถผลิตท่อยางน้ำซึมที่มีความแข็งแรง มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ความดันน้ำสูงสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำร่วมกับอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

2) ช่วยลดขยะที่เกิดจากอุตสาหกรรมยาง และลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ

3) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าเส้นใยจากขยะยางรถยนต์ และเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ใบสับปะรด ที่เป็นเศษเหลือจากภาคเกษตรกรรมในประเทศ

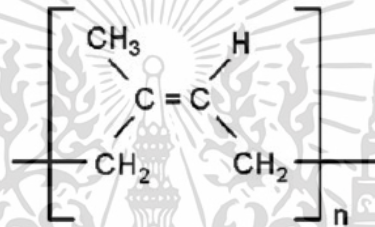
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubbers, NR) หรืออาจเรียกว่า “ยางพารา” เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงยาว มีหน่วยซ้ำ ๆ กันคือ ไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ได้จากต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ “ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส” (*Hevea Brasiliensis*) [21-23]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ (ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน) [23]

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง (Elasticity) เมื่อทำการให้แรงสามารถยืดตัวออกได้มากหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่า และหลังปล่อยแรงสามารถหดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็ว มีสมบัติที่ตีเทียมในด้านการเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น ยางธรรมชาติมีจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallization) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low temperature crystallization) ทำให้ยางแข็งขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำขึ้นยางจะอ่อนลงดังเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (Strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแสดงถึงสมบัติที่ตีเทียมในด้านความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ถึงแม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และความต้านทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) สูง อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติยังมีขีดจำกัดในการใช้งานในด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำที่สูงขึ้น กล่าวคือยางจะอ่อนตัวและเหนียวเหนอะเมื่อร้อน แต่แข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ดังนั้นยางธรรมชาติจึงต้องผสมกับสารเคมีต่าง ๆ เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้น เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น หลังการบดผสมยางผสมสูตรหรือยางคอมพาวด์ (Rubber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

compound) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (Vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปแล้วมีความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น

## 2.2 ยางรีเคลม

ยางรีเคลมเป็นยางที่ได้จากการนำผลิตภัณฑ์ยางเก่าที่ใช้แล้ว เช่น ยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพและผลิตภัณฑ์ยางที่เสียระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งยางเหล่านี้เป็นยางที่คงรูปแล้ว มีการเชื่อมโยงแบบ 3 มิติ การทำยางรีเคลมเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของยางให้เป็นโครงสร้างสายโซ่ 2 มิติหรือดีวัลคาไนเซชัน (Devulcanization) ยางรีเคลมสามารถทำได้จากผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ โดยในขั้นตอนแรกทำการกำจัดวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางออกให้หมด เช่น เส้นใยต่าง ๆ และโลหะ หลังจากนั้นทำการบดให้เป็นเศษ (Crumb) ขนาด 20-30 เมช (Mesh) แล้วผ่านกระบวนการโดยใช้ความร้อน สารเคมี ร่วมด้วยวิธีเชิงกล ซึ่งในแต่ละกระบวนการมีการเติมสารเคมีที่ใช้ในการช่วยบดยางรีเคลม ได้แก่ กลุ่มเปปไทซ์ (Peptizing agent) และกลุ่มฟีนอลิกไดซัลไฟด์ (Phenolic disulfides) เช่น ไดเบนซาไมด์ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (Dibenzamidediphenyl disulfide) เพนตะคลอโรโธโอฟินอล (Pentachlorothio-phenol, PCTP) และนอกจากนี้ ยังอาจใช้น้ำมัน (Reclaiming oils) เช่น น้ำมันสน เพื่อเป็นสารทำให้ نرم สามารถผลิตยางรีเคลมได้หลายกระบวนการ [24] เช่น

1. Digester process เป็นกระบวนการไม่ต่อเนื่อง โดยกระบวนการนี้จะผสมเศษยางกับน้ำมันและสารเติมแต่งอื่น ๆ แล้วจะนำไปเติมลงในหม้ออัดความดัน (Digester) ที่มีการปั่นกวตลอดเวลาและให้ความร้อนด้วยไอน้ำ ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้อุณหภูมิมีความสม่ำเสมอ และรักษามวล โดยมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลาประมาณ 4-10 ชั่วโมง โดยมีการปั่นกวอย่างต่อเนื่องแล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการต่อไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพ

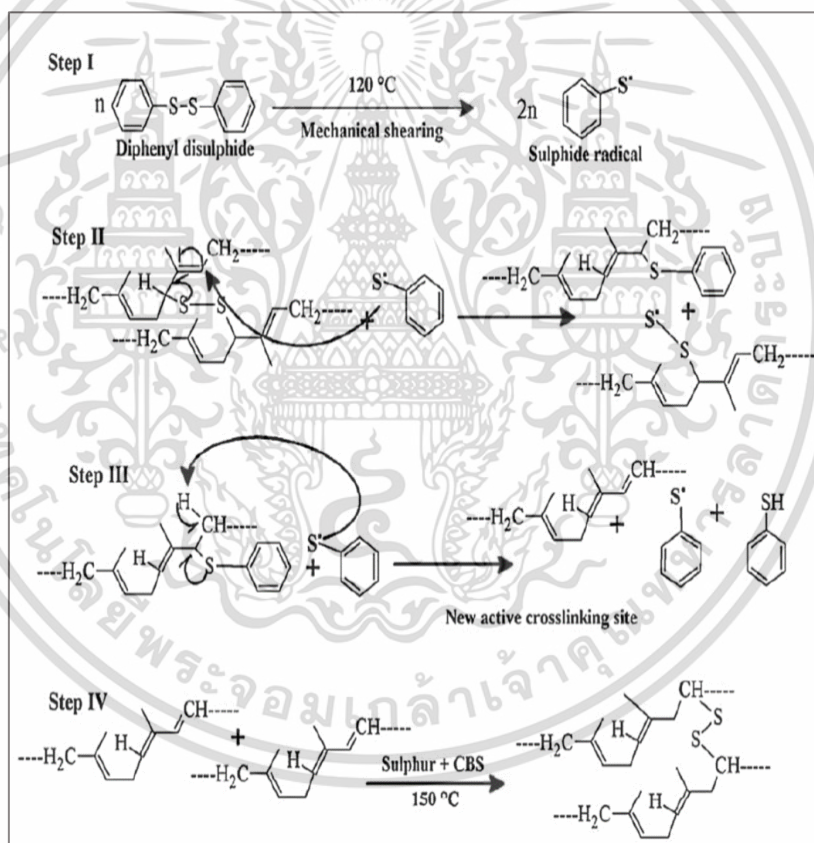
2. Pan process หรือ Heater process เป็นกระบวนการไม่ต่อเนื่อง โดยผสมเศษยางและน้ำมันแล้วนำไปเติมลงในเครื่องอบความร้อนสูงด้วยไอน้ำ ความดันที่ใช้ประมาณ 100-250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลานานประมาณ 5-12 ชั่วโมง แล้วนำไปเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพต่อไป

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

## 2.2.1 วิธีการทำยางรีเคลม

วิธีการทำยางรีเคลมมี 4 วิธี [25] ดังต่อไปนี้

1. วิธีการทางเคมี (Chemical method) กระบวนการตีวัลคาไนเซชันทางเคมี เป็นวิธีที่ใช้สารเคมีเพื่อตัดพันธะระหว่างคาร์บอนกับกำมะถัน (C-S) และกำมะถันกับกำมะถัน (S-S) เป็นวิธีการใช้พลังงานความร้อน และพลังงานเชิงกลเพื่อเร่งการเกิดตีวัลคาไนเซชัน สารเคมีที่ใช้ ได้แก่ กลุ่มไดซัลไฟด์ (Disulfides) เช่น ไดฟีนิลไดซัลไฟด์ (Diphenyl disulfide) และไทโอพีนอล วิธีการตีวัลคาไนเซชันทางเคมีส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทำเป็นแบทช์ (Batch) โดยการผสมสารเคมีกับผงยางรถยนต์จากนั้นทำการควบคุมความดันและอุณหภูมิ ข้อเสียเปรียบของวิธีนี้ คือ ความเป็นพิษจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามไดซัลไฟด์เป็นหนึ่งในสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงมีกลไก ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกของปฏิกิริยาไดฟีนิลไดซัลไฟด์ระหว่างการตีวัลคาไนเซชัน [26]

2. วิธีการใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic method) การประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกด้วยระดับคลื่นของอัลตราโซนิกเพื่อตีวัลคาไนเซชันยางโดยเลือกตัดพันธะการเชื่อมโยงของยาง ได้แก่ คาร์บอนกับกำมะถัน (C-S) และกำมะถันกับกำมะถัน (S-S) ปราศจากการตัดพันธะคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) อย่างไรก็ตามถ้ามีความดันและอุณหภูมิที่เกินระดับที่ไม่เหมาะสม คลื่นอัลตราโซนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถตัดสายโซ่หลักของยางได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องระวังในการใช้วิธีนี้ ซึ่งในวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว และไม่ต้องใช้สารเคมี การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการตีวัลคาไนเซชันนั้นสามารถทำเป็นกระบวนการต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีด โดยมีการเพิ่มส่วนของอัลตราโซนิกในเครื่องอัดรีด การใช้วิธีการทำยางรีเคลมด้วยวิธี อัลตราโซนิกเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถควบคุมการตีวัลคาไนเซชันด้วยระดับคลื่นอัลตราโซนิก ทำให้สามารถมีระดับการตีวัลคาไนเซชันที่สูงได้ เหมาะสมกับอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องอัดรีดเป็นหลักในการทำยางรีเคลม

3. วิธีการใช้ไมโครเวฟ (Microwave method) การตีวัลคาไนเซชันด้วยรังสีไมโครเวฟทำให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ และก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของยาง ส่งผลให้พันธะในการเชื่อมโยงสามารถแตกออกจากกัน โดยสามารถควบคุมพลังงานที่จะทำลายพันธะคาร์บอนกับกำมะถัน (C-S) และกำมะถันกับกำมะถัน (S-S) โดยไม่ทำลายพันธะคาร์บอนกับคาร์บอน (C-C) วิธีการตีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟนั้นควรใช้กับยางที่มีชั้น เทคโนโลยีตีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟแสดงการจดสิทธิบัตรโดย Goodyear Tire & Rubber Co. ที่ความถี่ 915 หรือ 2450 MHz [27] โดยทำให้เกิดพลังงานที่อยู่ระหว่าง 325 และ 1404 kJ/kg ในการตีวัลคาไนเซชันด้วยไมโครเวฟไม่ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ วิธีการใช้ไมโครเวฟในการตีวัลคาไนเซชันยางนั้นเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ใช้การแผ่รังสีเพื่อตีวัลคาไนเซชันยาง และสิ่งที่สำคัญคือการควบคุมพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเพื่อให้การเสื่อมสลาย (Degradation) ของยางน้อยที่สุด

4. วิธีการทางชีวภาพ (Biological method) การใช้เทคนิคทางชีวภาพในการตีวัลคาไนเซชันโดยใช้จุลินทรีย์สามารถเลือกตัดพันธะการเชื่อมโยงของกำมะถันได้ การเกิดตีวัลคาไนเซชันเกิดขึ้นที่บนบริเวณพื้นผิวของยาง และมีอัตราการตีวัลคาไนเซชันที่ต่ำ ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลาค่อนข้างนานประมาณ 40 วัน ซึ่งการตีวัลคาไนเซชันด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพนี้ยังคงห่างไกลในการมาประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งแบคทีเรียที่ใช้ในการตัดพันธะการเชื่อมโยงผ่านกระบวนการดีซัลฟิไรเซชัน (Desulfurization) ได้แก่ *T. ferrooxidans*, *Alicyclobacillus sp.*, *Sphingomonas sp.*, and *G. desulfuricans DSM44462T* วิธีนี้มีขั้นตอนในการทำเป็นเวลานาน และเสี่ยงต่อการปนเปื้อนแบคทีเรีย จึงเป็นวิธีที่ยังคงศึกษาเพียงในห้องปฏิบัติการยังไม่พัฒนาถึงขั้นอุตสาหกรรม

## 2.3 ผงยางรถยนต์

ผงยางรถยนต์เป็นวัตถุดิบส่วนหนึ่งที่ได้ในระหว่างการผลิตยางรีเคลม โดยผงยางที่ทำการผลิตส่วนใหญ่จะได้จากยางรถยนต์ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และเป็นบางส่วนที่เป็นของเสียในกระบวนการผลิตซึ่งสามารถผลิตได้ 2 วิธี [28] คือ

### 2.3.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding)

เทคนิคนี้ทำได้โดยการให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตransition temperature (T<sub>g</sub>) โดยการทำให้ยางมีอุณหภูมิต่ำ เช่น การแช่ยางที่เชื่อมโยงแล้วลงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) ขั้นตอนต่อไปทำการบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดแบบลูกกลมโลหะ (Ball mill) ได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 30-100 เมช (Mesh) ขนาดอนุภาคของผงยางที่ได้นี้ขึ้นกับเวลาที่แช่ในไนโตรเจนเหลวและขนาดของตะแกรงร่อน (Screen) ที่อยู่ในเครื่องบด การแปรรูปและการผสมผงยางสามารถแปรรูปได้หลายลักษณะดังนี้

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

- การอัดขึ้นรูป (Molding) สามารถใช้ผงยางได้ทุกขนาดเนื่องจากเป็นการไล่ฟองอากาศที่ขังในยางขณะขึ้นรูป

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

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

เครื่องมือในการผลิตยางชนิดนี้มีราคาถูก ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมกรไหลที่ดีกว่าผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) สันฐานวิทยาพื้นผิวของผงยาง ทำให้สามารถกำจัดอากาศที่ขังอยู่ในยางที่ไม่ได้เกิดการเชื่อมโยงออกไปได้ง่าย โดยเฉพาะยางล้อรถ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงของการพองหลังจากการเชื่อมโยง และผงยางจะถูกออกซิเดชันที่ผิวน้อยลงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งแตกต่างจากผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้องที่มีพื้นที่ผิวสูง (10-30 เมช)

### 2.3.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding)

วิธีการบดที่อุณหภูมิห้องสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

1. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (Dry ambient grinding) โดยนำยางที่ทำการเชื่อมโยงแล้วบดด้วยเครื่องฟันปลา (Serrated grinder) ได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ประมาณ 10-30 เมช และเกิดกิ้ง (Pendant) ที่ผิวขึ้นจำนวนหนึ่ง ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับยางดิบได้ดี เมื่อขนาดอนุภาคของผงยางเพิ่มขึ้นความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์จะลดลง ถึงแม้จะมีชื่อการผลิตว่า “การบดที่อุณหภูมิห้อง” แต่ในทางปฏิบัติให้ความร้อนระหว่างกระบวนการผลิต การให้ความร้อนสูงจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเกิดการสลายตัว

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 พอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) คือ การนำพอลิเมอร์สองชนิดมาผสมกันโดยวิธีทางกายภาพ เป็นการนำสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติหลากหลายมากขึ้น แต่พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) ซึ่งเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมด้อยกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาโครงสร้างของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่จะนำมาผสมกันให้มีความเข้ากันได้ [29-30]

ในการพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่จะนำมาผสมนั้น สามารถพิจารณาจากค่าพลังงานอิสระ (Gibbs free energy) ในการผสม ซึ่งพิจารณาจากสมการที่ 2.1

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\Delta G$  คือ พลังงานอิสระในการผสม (kJ/mol)

$\Delta H$  คือ ความแตกต่างของเอนทัลปีในการผสม (kJ/mol)

$T$  คือ อุณหภูมิ (K)

$\Delta S$  คือ ความแตกต่างของเอนโทรปีในการผสม (kJ/mol)

ค่าพลังงานอิสระในการผสมจะขึ้นกับเอนทัลปีและเอนโทรปีในการผสม แต่เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงทำให้เอนโทรปีมีค่าน้อยมาก ดังนั้นความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมถูกกำหนดโดยค่าเอนทัลปี

การจำแนกพอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [31] ได้แก่

1. พอลิเมอร์ผสมที่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ Homogeneous ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมเนื้อเดียวกันที่มาจากสารตั้งต้นชนิดเดียวกันแต่ต่างเกรด และ Heterogeneous ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมเนื้อเดียวกันที่มาจากสารตั้งต้นต่างชนิดกันที่มาจากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน

2. พอลิเมอร์ผสมที่ไม่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) จะมีโครงสร้างแยกวัฏภาคกัน สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะที่เหนียวแน่นระหว่างวัฏภาค (Compatible blend) และพอลิเมอร์ผสมที่มีการยึดเกาะระหว่างวัฏภาคที่ไม่ดี (Incompatible blend) ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำ แต่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizers) ซึ่งสารดังกล่าวมักจะเป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกและต่อกิ่ง (Block and graft copolymers) ที่เข้ากันได้ทั้งพอลิเมอร์สองวัฏภาค และต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อที่จะทำให้เกิดการพันกัน (Entanglement) กับสายโซ่พอลิเมอร์แต่ละวัฏภาค

นอกจากนี้อัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม โดยพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนมากกว่าเป็นวัฏภาคหลัก (Matrix) หรือวัฏภาคต่อเนื่อง ส่วนพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนน้อยกว่าเป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งโดยทั่วไปพอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนมากกว่าเป็นตัวควบคุมสมบัติส่วนใหญ่ของพอลิเมอร์ผสม



A อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม B

รูปที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [29]



A อัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม B

รูปที่ 2.4 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [29]

## 2.5 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular rubber)

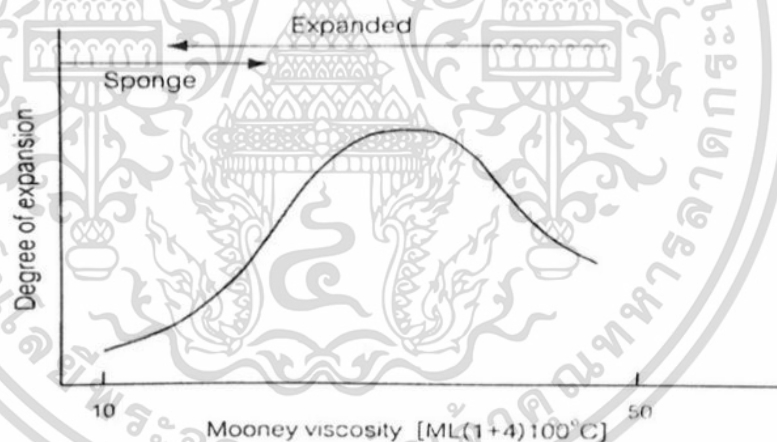
### 2.5.1 การจำแนกผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุน

ผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุน แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 [28] 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 แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ [32]

สิ่งสำคัญในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber คือชนิดของสารให้ฟอง โดย Sponge rubber จะใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารที่ให้ไนโตรเจน ส่วน Expanded rubber จะใช้สารที่ให้ไนโตรเจนเท่านั้น อุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองและอุณหภูมิการเชื่อมโยงจะต้องสมดุลกัน นอกจากนี้สภาวะการผสมก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญซึ่งขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ความหนืดของพอลิเมอร์ ปริมาณสารทำให้นิ่ม ปริมาณสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยง และชนิดสารให้ฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation)

โฟมพอลิเมอร์สามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ กระบวนการขยายตัว (Expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน [33] ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (Bubble formation or Initiation) ทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์หลอมเหลว กระบวนการการเกิดฟองนี้จะเรียกว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ 1) การเกิดนิวเคลียสในตนเอง (Self nucleation) คือ ฟองก๊าซจะเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน 2) กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation process) คือ ฟองก๊าซจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (Liquid-solid interphase) ซึ่งของแข็งนี้เรียกว่าสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) การทำให้พลาสติกเกิดฟองก๊าซในโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

1) การสลายตัวทางความร้อนของสารฟูทางเคมีจากการผสมสารฟูที่เป็นของแข็งกับพอลิเมอร์และให้ความร้อน ทำให้สารฟูสลายตัวเกิดเป็นก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เป็นต้น

2) การเกิดฟองก๊าซเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ก๊าซจะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง สารเคมี 2 ชนิด ซึ่งก๊าซจะปล่อยออกมาพร้อมกับการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) และการเชื่อม ขวาง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยาเนต (Isocyanate) กับน้ำ ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็น ผลิตภัณฑ์ในกระบวนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane Foam) เป็นต้น

3) การลดความดัน เป็นการขยายตัวของก๊าซในเนื้อพอลิเมอร์โดยการลดความดันในระบบพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น การอัดรีด (Extrusion) โฟมพอลิสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS)

4) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อนกับสารฟูที่เป็นของเหลว ตัวอย่างของสารฟูที่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) เป็นต้น

5) การใช้ตัวเติมชั่วคราว วิธีนี้ไม่มีการผลิตก๊าซขึ้นแต่จะใช้อุณหภูมิของแข็งผสมกับพอลิเมอร์ แล้วขึ้นรูปเป็นพลาสติกแข็ง จากนั้นชะล้าง (Leach) สารตัวเติมออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีเซลล์เปิดเกิดขึ้น วิธีนี้มักใช้ในการเตรียมโฟมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE foam) เนื่องจาก PTFE เป็นพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการขยายตัวได้ยาก

6) การเก็บกักก๊าซเชิงกล คือการทำให้เกิดฟองก๊าซ โดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว แล้วทำให้แข็งตัว โดยสารเร่งปฏิกิริยาหรือความร้อนทำให้เกิดการกักฟองก๊าซไว้ในเนื้อพลาสติก วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่าและมีข้อเสียคือโฟมที่ได้จะมีเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ

7) การเติมไมโครสเฟียร์ เป็นการเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (Hollow microspheres) ในพอลิเมอร์ซึ่งไมโครสเฟียร์ดังกล่าวอาจเป็นเม็ดแก้วหรือเม็ดพลาสติกโดยส่วนใหญ่จะเป็นการผสมเม็ด

ฟีนอลิก (Phenolic spheres) ในพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ขณะเกิดการบ่ม (Curing)

ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟอง (Bubble growth) การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของก๊าซจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองก๊าซ ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมี ลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้สภาวะที่กำหนดและควบคุมโดยอาศัยความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองก๊าซหรือเซลล์ ( $\Delta P$ ) แรงตึงผิวที่สัมผัส ( $\gamma$ ) และรัศมี ฟองก๊าซ ( $r$ ) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\Delta P = 2 \gamma / r \quad (2.2)$$

ค่าความแตกต่างของความดันจะมีค่ามากในฟองที่มีขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวค่าหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัวหรือเพิ่มขนาดขึ้น (Growing) การแตกของผนังเซลล์หรือการแพร่ของสารเร่งฟูจากฟองที่มีขนาดเล็กไปฟองที่มีขนาดใหญ่สามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.3

$$\Delta P_{1,2} = 2 \gamma [(1/r_1) - (1/r_2)] \quad (2.3)$$

ขั้นตอนที่ 3 ความเสถียรหรือการคงรูปของฟอง (Bubble stability) เป็นขั้นตอนสุดท้ายและสำคัญที่สุดในกระบวนการเกิดโฟมซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วงความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างซึ่งปัจจัยหนึ่ง คือ การถ่ายเท (Drainage) ของของเหลวจากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (Cell junction) โดยขณะที่ฟองกำลังขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันของเซลล์ทำให้เกิดผนังเซลล์และสัน (Ribs) ของเซลล์ขึ้น เมื่อการขยายตัวเกิดต่อไปอีกของเหลวจะเกิดการถ่ายเทไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์มากขึ้น ถ้าการถ่ายเทของเหลวในลักษณะนี้ยังคงเกิดต่อไปจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์และถ้าทำให้ระบบโฟมขณะนี้เสถียรจะทำให้ได้โฟมพลาสติกแบบเซลล์เปิดการป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ทำได้ โดยทำให้ระบบโฟมเกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโฟมพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสพอลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโฟม วิธีทำให้ภาวะโฟมเสถียรมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสภาพแก้วเพื่อป้องกันการไหลของพอลิเมอร์

## 2.6 คอมโพสิต

คอมโพสิต (Composites) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน โดยเมื่อทั้งสองส่วนอยู่ด้วยกัน ทำให้เกิดสมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่ดีขึ้นโดยเฉพาะการทำให้วัสดุแข็งแรงขึ้นหรือเกิดการเสริมแรง (Reinforcing effect) องค์ประกอบสองส่วนหลักของคอมโพสิต [34] ได้แก่

1. **ส่วนเสริมแรง** (Reinforcement หรือ Reinforcing component) คือส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง ส่วนเสริมแรงเป็นส่วนเสริมแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต ตัวอย่างของส่วนเสริมแรงได้แก่ เส้นใย (Fibers) เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar® fiber) ฯลฯ อาจเป็นเส้นใยยาว หรือเส้นใยสั้น นอกจากนี้อาจเป็นเส้นใยพันกันหรือทอ (Weaves) ให้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ และมีการจัดเรียง (Orientation) ของส่วนเสริมแรงแบบต่าง ๆ

2. **เมทริกซ์** (Matrix) เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรงและเป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นส่วนยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะล้อมรอบและปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้น ฯลฯ มักมีความแข็งแรงและมอดูลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมทริกซ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์

### 2.6.1 อินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ (Fiber-matrix interfaces)

อินเทอร์เฟซ (Interfaces) คือ เส้นรอยต่อ (Boundary) ที่แยกเห็นเด่นชัดระหว่างภูมิภาค (Phase) ที่แตกต่างกัน เช่น เส้นใยกับเมทริกซ์ ลักษณะและสมบัติของอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์มีความสำคัญต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมโพสิตโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) และสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) เนื่องจากในการใช้งานเมื่อวัสดุคอมโพสิตได้รับแรง เมทริกซ์ทำหน้าที่ส่งผ่านแรง (Stress transfer) ที่ได้รับไปยังเส้นใยที่ทำหน้าที่รับแรง (Load bearing) ข้ามผ่าน “อินเทอร์เฟซ”

### 2.6.2 ทฤษฎีการยึดเกาะ (Theories of adhesion)

1. **การดูดซับและการเปียก** (Adsorption and wetting) เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอจะเกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” เช่น การเปียกของเหลวบนพื้นผิวของแข็งในกรณีของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้กันมากถึงระดับจุลภาค (ไมครอน) หรือระดับอะตอม ความขรุขระของพื้นผิวจะเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถสัมผัสกันได้ ในกรณีของเหลวบนพื้นผิวของแข็งสามารถเกิดการเปียกได้ง่าย การเปียกจะเกิดได้มากหรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

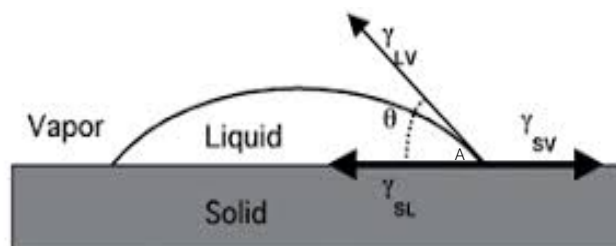
น้อยแสดงได้โดยใช้ “มุมสัมผัส” (Contact angle,  $\theta$ ) ถ้าของเหลวมีความสามารถในการเปียกบนพื้นผิวของแข็งดี ของเหลวชอบที่สัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีมุมสัมผัสน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกต่ำ ของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับของแข็งเป็นผลให้มุมสัมผัสมาก สมบัติการเปียกของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สามารถแสดงได้ในรูปสมการง่าย ๆ ของดูปรี (Dupre equation) แสดงการยึดเกาะ (Work of adhesion,  $W_a$ ) ของเหลวบนของแข็งดังนี้

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  คือค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) ของของเหลวและของแข็งตามลำดับ  $\gamma_{12}$  คือ พลังงานพื้นผิวอิสระของอินเทอร์เฟซระหว่างของเหลวและของแข็ง สมการนี้สามารถโยงให้สัมพันธ์กับกรณีของหยดของเหลวบนผิวของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.6 โดยใช้สมการของยัง (Young equation) ทำสมดุลกระทำที่จุด “A” ตามแนวระนาบ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\gamma_{sv}$ ,  $\gamma_{sl}$  และ  $\gamma_{lv}$  คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) หรือแรงตึงผิว (Surface tension) ของอินเทอร์เฟซระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ก๊าซ ตามลำดับ และ  $\theta$  คือมุมสัมผัส พื้นผิวของแข็งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวได้ยาก ในขณะที่สามารถทำการทดลองวัดค่าแรงตึงผิวของเหลวได้ง่าย การหาค่าแรงตึงผิวพื้นของของแข็งสามารถทำได้โดยใช้ของเหลวที่ทราบค่าแรงตึงผิวเปียกบนผิวของแข็ง โดยมีการนิยามค่า “แรงตึงผิววิกฤต” (Critical surface tension,  $\gamma_c$ ) กล่าวคือของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิววิกฤตของของแข็ง ( $\gamma_{lv} < \gamma_c$ ) เท่านั้นที่สามารถเกิดการเปียกทันทีทันใด (Spontaneous wetting) ทำให้ค่า  $\theta = 0$  ค่าแรงตึงผิววิกฤตนี้จึงเป็นค่าที่สำคัญที่สามารถใช้ในการพิจารณาการเปียกของเรซินบนเส้นใยเสริมแรง



รูปที่ 2.6 มุมสัมผัส และแรงตึงผิวของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยเว็บไซต์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่างานการยึดเกาะ ( $W_A$ ) บ่งบอกถึงพันธะทางกายภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระจายตัวระหว่างโมเลกุล (Intermolecular dispersion forces) ที่สัมพันธ์กันและเกิดการเปียกหรือยึดเกาะกันตามทฤษฎีแรงยึดเกาะนี้มีความแข็งแรงสูงแต่ในทางปฏิบัติจะมีแรงเชิงกลนี้ต่ำเนื่องจาก

- พื้นผิวเส้นใยมีความสกปรก เกิดเป็นชั้นของสิ่งสกปรกที่มีค่าพลังงานพื้นผิวอิสระหรือแรงดึงผิวต่ำ

- ในขั้นตอนการขึ้นรูปคอมโพสิตเกิดฟองอากาศของฟองก๊าซถูกขังอยู่บนพื้นผิวเส้นใยทำให้พื้นผิวสัมผัสน้อยลง

- เกิดการหดตัวของเรซินเมทริกซ์หลังการเชื่อมโยง ทำให้เกิดแรงเค้น (Stresses) และเกิดช่องว่างระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์

2. การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion) การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่เข้าหากัน ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับปริมาณการพันกันของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) ว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นกับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุลที่เกิดการพันกัน เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟิวชันสามารถเพิ่มได้โดยการใช้ตัวทำละลาย (Solvent) ทาที่พื้นผิวหรือการใช้สารเติมแต่งจำพวกพลาสติกไซเซอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึดเกาะแบบนี้สามารถเกิดกับเส้นใยที่มีการเคลือบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวก่อนการผสมกับเมทริกซ์แต่ไม่เกิดกับคอมโพสิตที่มีพื้นผิวเส้นใยแข็ง ไม่มีการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล เช่น เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว ฯลฯ

3. แรงประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attraction) แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวสองชนิดที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้ามีพื้นผิวหนึ่งมีประจุบวก (Net positive charge) และอีกพื้นผิวเป็นประจุลบ (Net negative charge) ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยากรด-เบส และพันธะไอออนิก ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ (Charge density) แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตย์จะไม่ใช่แรงยึดเกาะหลักระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ในคอมโพสิต แต่แรงดึงดูดชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะในคอมโพสิตได้ดีขึ้น เช่น การยึดเกาะของสารคู่ควบประเภทซิลาน (Silane coupling agent) ที่มีหมู่ฟังก์ชันประจุบวก (Cationic function groups) มีการยึดติดที่ดีกับเส้นใยแก้วที่มีประจุลบของหมู่ไฮดรอกซี (-OH) บนพื้นผิว เป็นต้น

4. พันธะเคมี (Chemical bonding) เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญชนิดหนึ่ง เกิดขึ้นเมื่อเส้นใยมีหมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิว และเมทริกซ์มีหมู่ฟังก์ชันเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะเคมีได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไก การยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสถียรภาพของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อได้รู้เห็นแล้วโปรดอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมี ได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบ (Coupling agent) กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใย และเมทริกซ์ เป็นต้น

5. การยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking) เกิดเมื่อในกระบวนการผลิตขึ้นรูปคอมโพสิต เรซินเมทริกซ์เปียกบนพื้นผิวเส้นใยในขณะที่เป็นของไหลสามารถที่จะแทรกตัวไปตามพื้นผิวขรุขระของเส้นใย รวมทั้งซอก ร่อง รู และช่องว่างอื่น ๆ บนพื้นผิว เมื่อทำการเชื่อมโยงทำให้เกิดการแข็งตัวของเมทริกซ์ เป็นเหตุให้เมทริกซ์ถูกล็อคแข็งติดอยู่กับพื้นผิวเส้นใย ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวเส้นใยที่ทำให้เกิดการแทรกตัวของเรซินรวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสามารถของเรซินในการเปียกและแทรกตัวในพื้นผิวเส้นใย เช่น ความหนืดเรซิน พื้นผิวเส้นใยที่เรียบจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อยหรือไม่เกิดเลย

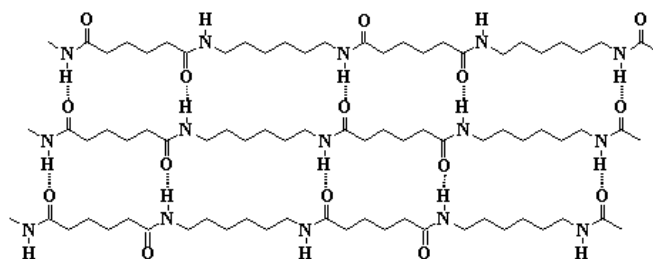
## 2.7 เส้นใยเสริมแรง

### 2.7.1 เส้นใยไนลอน

ไนลอน (Nylons) เรียกอีกชื่อว่า “พอลิเอไมด์ (Polyamide)” คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดแรกของโลก ปัจจุบันไนลอนมีหลายชนิดแต่ที่มีความสำคัญในด้านสิ่งทอคือไนลอน 66 ไนลอน 6 และไซคลิกไนลอน ไนลอนเป็นเส้นใยที่มีโมเลกุลยาว และเป็นสายตรงของ Polyamide พอลิเมอร์ที่จะทำเป็นเส้นใยได้จะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 12,000-20,000 ถ้าต่ำกว่า 6,000 ทำเป็นเส้นไม่ได้ เพราะ เส้นใยเปราะ แต่ถ้าสูงกว่า 20,000 จะหลอมซึ่งทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นเส้นใย จากโครงสร้างของไนลอนสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น [35] ดังรูปที่ 2.7

สมบัติของเส้นใยไนลอน [36] ดังนี้

1. สมบัติทางกายภาพ ลักษณะเส้นใยสีขาว ผิวเรียบ แข็งแรง สมบัติยืดหยุ่นที่ดี ความทนทานต่อการเสียดสีค่อนข้างดี ความสามารถดูดความชื้นต่ำ มีความเหนียว 4.6-5.8 กรัม/ดีเนียร์ (Denier) เมื่อเปียกความเหนียวจะลดลงเป็น 4.1-5.1 กรัม/ดีเนียร์
2. สมบัติทางเคมี ทนทานต่อสารฟอกขาวทุกชนิด ทนต่อการด่อนได้ดี แต่ละลายในกรดกำมะถันเข้มข้นและร้อน ไม่ทนต่อต่างแก่ นอกจากนี้ยังทนทานต่อราและแมลง รวมถึงแสงแดดได้ดี



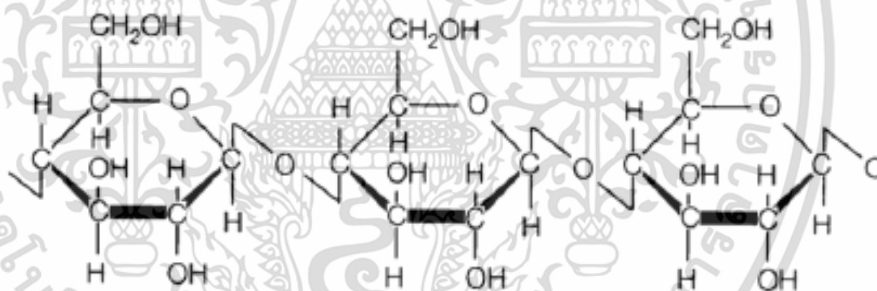
รูปที่ 2.7 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ Nylon 6,6 [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.2 เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) แบ่งได้หลายชนิดตามแหล่งที่มา เช่น พืช สัตว์ และแร่ต่าง ๆ เส้นใยจากพืชทุกชนิดประกอบด้วยเซลลูโลส และมาจากหลายแหล่ง เช่น ก้าน ใบ ผล เมล็ด เนื้อ และเปลือก เป็นต้น ในขณะที่เส้นใยจากสัตว์ประกอบด้วยโปรตีน เช่น เส้นผม ไหม และขนสัตว์ เป็นต้น การนำเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิตมีมานานหลายสิบปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากคอมโพสิตที่ได้มีราคาถูกลง นำมาใช้ใหม่ได้ มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา เส้นใยจากพืชเป็นเส้นใยที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เส้นใยจากพืชประกอบด้วยสายเซลลูโลส (Cellulose fibrils) หลาย ๆ สายรวมกัน และสารประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ลิกนิน (Lignin) เพคติน (Pectin) และแว็กซ์ (Wax) เป็นต้น [36] สายเซลลูโลสเหล่านั้นเรียงตัวตามแนวยาวของเส้นใย ซึ่งเป็นผลให้เส้นใยมีความทนต่อแรงดึง และความแข็ง (Rigidity) สูง อย่างไรก็ตามความสามารถในการเสริมแรงของเส้นใยธรรมชาติขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเซลลูโลสและความเป็นผลึกของเส้นใย [34]

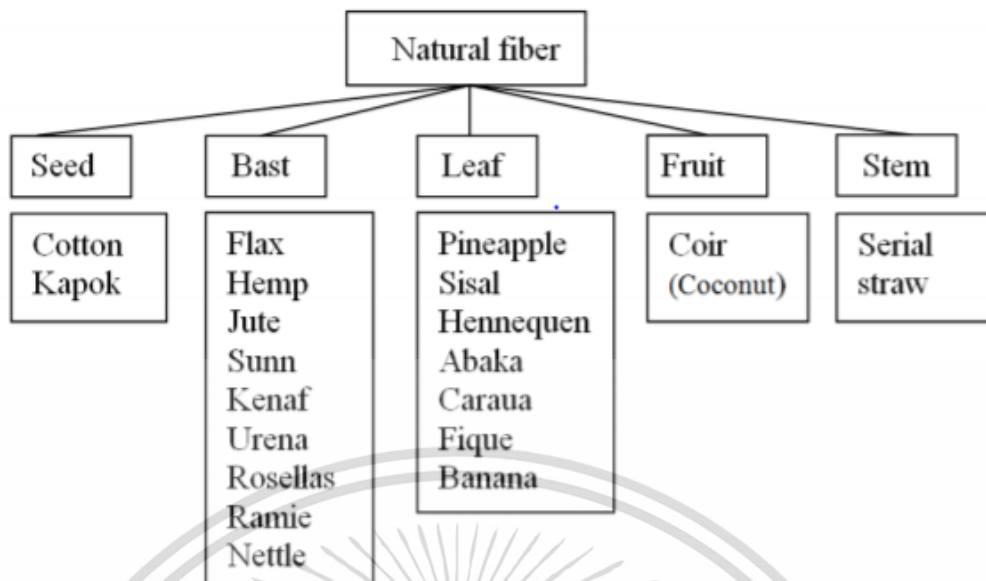
เซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วย หน่วยซ้ำ ๆ กัน มีสูตรโมเลกุลทั่วไปคือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  เซลลูโลสจะมีหน่วยโมเลกุลยาวและแข็งโดยเซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [35]

### 2.7.2.1 การจัดกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช

เส้นใยธรรมชาติจากพืชโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม [37] ขึ้นอยู่กับการได้มาหรือแหล่งของเส้นใย ดังรูปที่ 2.9 แสดงแผนภาพการแบ่งกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช



รูปที่ 2.9 แผนภาพการแบ่งกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช [38]

#### 2.7.2.2 เส้นใยใบสับประรด (Pineapple leaf fiber, PALF) [39]

สับประรดเป็นพืชที่อยู่ในจีนัส Ananas และเป็นพืชล้มลุก มีลำต้นที่อ้วน สั้น และมีใบอยู่โดยรอบ ซึ่งใบมีลักษณะแข็ง ยาว มีปลายแหลม และเคลือบด้วยแว็กซ์ สับประรดเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกเกือบ 600,000 ไร่ ในแต่ละรอบการผลิตจะมีใบสับประรดสดที่ถูกทิ้งรวมมากกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อไร่ ใบสับประรดเหล่านี้เป็นภาระต่อเกษตรกร ใบสับประรดสดมีเส้นใยโดยเฉลี่ยประมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นที่ทราบว่าใบสับประรดมีเส้นใยคุณภาพสูงและมีการนำมาใช้งานฝีมือหลายรูปแบบ เช่น การผลิตเสื้อผ้า การทำกระดาษ แต่ปริมาณการนำไปใช้ยังไม่มาก จึงทำให้ยังมีใบสับประรดเหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก

เส้นใยจากใบสับประรดมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกับเส้นใยธรรมชาติอื่น ๆ แต่สัดส่วนและการวางตัวของเซลลูโลสภายในเส้นใยแตกต่างกันมาก จึงทำให้เส้นใยแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ เทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการเสริมแรงพลาสติกและยาง จะเห็นว่าเส้นใยใบสับประรดมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างสูง มีมอดุลัสและความแข็งแรงสูง และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลจำเพาะ (Specific mechanical properties) ซึ่งเทียบกับความหนาแน่น พบว่ามีค่าอยู่ในระดับเดียวกันกับเส้นใยแก้วที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายชนิด การใช้เส้นใยใบสับประรดมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้เส้นใยแก้วในหลายด้าน เช่น ทำให้เครื่องจักรสึกหรอน้อยกว่า เส้นใยไม่เปราะหรือแตกหักทำให้ไม่เกิดฝุ่นหรือผงที่มีความระคายเคืองต่อผิวหนังและระบบทางเดินหายใจ มีความหนาแน่นน้อยกว่าทำให้น้ำหนักผลิตภัณฑ์น้อยกว่า สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สามารถเผาทิ้งหรือเผาเพื่อเอาพลังงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยไม่เหลือเศษเส้นใย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในเรื่องการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม การแยกเส้นใยจากใบสับปะรดสามารถทำได้ 2 วิธี [19] ดังนี้

1) การแยกเส้นใยจากใบสับปะรดแบบดั้งเดิม สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ

1.1 การขูดด้วยมือ เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด โดยการใช้วัสดุที่มีความแข็ง เช่น เศษกระเบื้องแตก โลหะ หรือของแข็งที่มีลักษณะเป็นแผ่นขูดลงบนใบสับปะรด เพื่อนำเนื้อเยื่ออ่อนในใบออกไป เหลือไว้เฉพาะเส้นใยที่มีความแข็งแรงที่มีความยาวเท่ากับ ความยาวของใบ จากนั้นนำมัดเส้นใยที่ได้ไปล้างทำความสะอาดแล้วตากให้แห้ง ซึ่งเส้นใยที่ได้จากกระบวนการนี้เป็นเส้นใยยาวและค่อนข้างหยาบ และวิธีการนี้ทำได้ค่อนข้างช้า อย่างไรก็ตามยังคงมีการใช้วิธีขูดด้วยมือในบางพื้นที่ที่ยังต้องการเส้นใยในปริมาณที่ไม่มากสำหรับงานหัตถกรรม

1.2 การแช่ฟอก ซึ่งอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ทำให้เนื้อเยื่ออ่อนของใบเกิดการเน่าเปื่อยและย่อยสลายไป เหลือไว้เฉพาะเส้นใย อย่างไรก็ตามการที่จะทำให้อายุขัยเหล่านี้ทำงานได้ดี ต้องนำใบสับปะรดมากดหรือทุบให้ใบเกิดรอยแตกก่อนจะทำการหมักหรือแช่ในน้ำจนกระทั่งเนื้อเยื่อเน่าเปื่อย การย่อยสลายนี้อาจใช้เอนไซม์ช่วยลดระยะเวลาได้ จากนั้นจึงนำเส้นใยที่เหลืออยู่มาล้างด้วยน้ำจนสะอาด แล้วนำไปตากให้แห้ง

1.3 การขูดด้วยเครื่อง โดยพัฒนาเครื่องจักรขนาดเล็กที่สามารถทำหน้าที่คล้ายกับการขูดด้วยมือ ซึ่งประกอบด้วยใบมีดสำหรับขูดที่มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะจำนวนหนึ่ง วางอยู่ในลักษณะทรงกระบอก มีระนาบของแผ่นตั้งฉากกับเส้นรอบวงของทรงกระบอก ขูดใบมีดถูกขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้า แกนหมุนของขูดใบมีดนี้วางตัวตั้งฉากกับทิศทางการป้อนใบสับปะรด เมื่อป้อนใบสับปะรดเข้าเครื่อง ใบมีดที่หมุนนี้จะขูดเนื้อเยื่อของใบออกไป เหลือทิ้งไว้เฉพาะมัดเส้นใย นำเส้นใยที่ได้ไปล้างทำความสะอาดและตากให้แห้ง ซึ่งวิธีการนี้สามารถทำได้เร็วกว่าการขูดด้วยมือมาก ในปัจจุบันมีผู้ผลิตเครื่องจักรประเภทนี้ขึ้นมาหลายรูปแบบ เพื่อนำไปใช้ผลิตเส้นใยสำหรับงานหัตถกรรมและสิ่งทอ

การแยกเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยวิธีการขูดทั้งด้วยมือ และด้วยเครื่องนั้นยังใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่ยังมีปัญหาและข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ใช้แรงงานมาก กำลังการผลิตต่ำ ในกรณีที่ต้องการใช้ใบยาว ตรง สมบูรณ์ และไม่มีรอยหัก หรือรอยพับ จะต้องเสียเวลาในการคัดเลือกเป็นอย่างมาก ทำให้ใช้เศษใบได้เพียงบางส่วนเท่านั้น หากต้องการนำเศษใบสับปะรดที่มีอยู่ในแปลงมาใช้ได้มากที่สุด จะต้องใช้หลักการใหม่ ที่สามารถรองรับใบสับปะรดได้ทุกรูปแบบ จึงได้มีการนำเสนอวิธีการใหม่ที่ง่ายสำหรับการผลิตเส้นใยสั้นจากใบสับปะรดที่เหมาะสมกับการใช้เสริมแรงพอลิเมอร์คอมโพสิตโดยเฉพาะ

2) การแยกด้วยวิธีบดเชิงกล แนวทางใหม่ในการแยกเส้นใยจากใบสับปะรด หลักการของวิธีการใหม่นี้ แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 2.10 โดยนำใบสับปะรดมาตัดให้เป็นท่อนสั้น ๆ ในแนวขวางใบตามความยาวของเส้นใยที่ต้องการ จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดใด ๆ ที่

เหมาะสม เช่น โม่หิน เนื้อเยื่ออ่อนของใบจะถูกบดจนละเอียด เส้นใยที่ได้มีความแข็งแรงสูง สามารถ

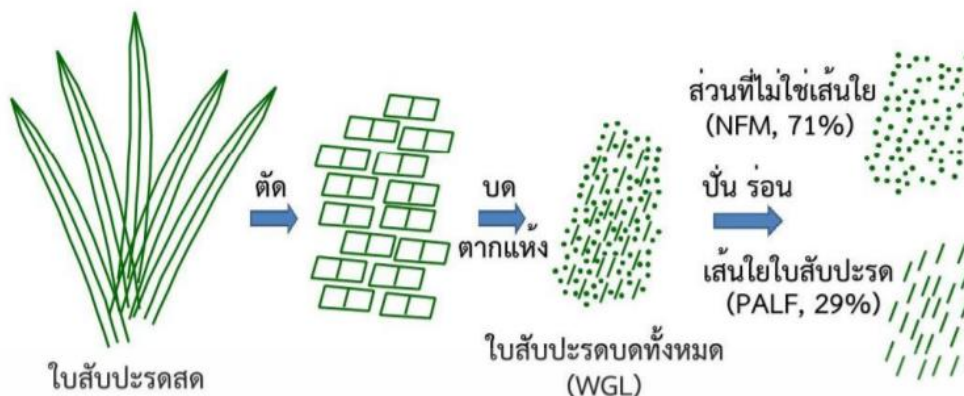
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทนแรงบิดและไม่ขาด แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง วัสดุที่ได้ในขั้นนี้ เรียกว่า ใบบดทั้งหมด (Whole ground leaf, WGL) ต่อจากนั้นนำใบบดทั้งหมดไปตากแห้ง แล้วจึงนำวัสดุแห้งที่มีลักษณะ กรังเป็นก้อนไปขยี้ให้ป่น ร่อนด้วยตะแกรง จะสามารถแยกเส้นใยที่มีลักษณะยาว (Pineapple leaf fiber, PALF) และจับกันเป็นกลุ่ม ๆ คล้ายก้อนสำลี ค้างอยู่บนตะแกรง ขณะที่ส่วนที่ไม่เป็นเส้นใย (Non fibrous materials, NFM) ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคจะลอดผ่านช่องตะแกรงออกไปได้ ลักษณะของเส้นใยที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.11 ขนาดเส้นใยที่ได้จากวิธีนี้เล็กกว่าเส้นใยที่เตรียมจากวิธีดั้งเดิม ซึ่งตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบผลผลิตที่ได้จากการแยกเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ เทียบกับเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการเสริมแรงพลาสติกและยาง [19]

ชนิดของเส้นใย	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	เส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	ความทนแรงดึงสูงสุด (MPa)	มอดุลัสของยัง (GPa)	ระยะยืด ณ จุดขาด (%)
Ramie	1.5	-	400-938	61.4-128	1.2-3.8
PALF	1.44	20-80	413-1627	34.5-82.5	1.6
Flax	1.5-3	-	450-1100	27.6	2.7-3.2
Jute	1.3-1.45	20-200	393-773	13-26.5	7.0-8.0
Hemp	-	-	690	-	1.6
Sisal	1.45	50-200	468-640	9.4-22	3-7
Cotton	1.5-1.6	-	287-800	5.5-12.6	7-8
Coir	1.15	100-450	131-175	4-6	15-40
E-glass	2.5	-	2000-3500	70	2.5
S-glass	2.5	-	4570	86	2.8
Aramid	1.4	-	3000-3150	63-67	3.3-3.7
Carbon	1.7	-	4000	230-240	1.4-1.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการแยกเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยวิธีบดเชิงกล [19]



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเส้นใยใบสับปะรดที่แยกด้วยวิธีการบดเชิงกล (ซ้าย) หลังจากการขึ้นเป็นแผ่น เส้นใยแบบไม่ทอ (กลาง) และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของแผ่นเส้นใย (ขวา) [19]

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบผลผลิตเส้นใยที่ได้จากกระบวนการต่าง ๆ [19]

วิธีการแยก	ผลผลิตเส้นใย (%)	ช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลาง (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)
การแช่ฟอก	1.17	5-272	37.86
การชูดด้วยมือ	1.38	5-169	39.51
การบดด้วยลูกบด	2.92	3-164	12.69
การบดด้วยเครื่อง	2.75	3-138	13.22

## 2.8 สารเติมแต่งสำหรับยาง

### 2.8.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent)

สารเชื่อมโยงหรือสารเชื่อมขวางทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3D Network) โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ยาง ที่เป็นวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) เป็นวิธีการที่นิยมที่สุดเนื่องจาก กำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นอย่างดีไม่อึดตัว มีพันธะ คู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางไอโซพรีน (IR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBS) และยางบิวตะ ไดอิน (BR) ฯลฯ จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activator) ได้แก่ กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ (Stearic acid/ZnO) กำมะถันที่นิยมใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิด คือ

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปผลึกรวมบิก (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม ( $S_8$ ) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิ สูงประมาณ  $150^{\circ}C$  เป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถัน ในปริมาณ 1-3 phr ถ้าใส่กำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการ “บลูม” (Bloom) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ ที่กำมะถันเกิดการแพร่จากภายในออกมาสะสมเป็นผลึกที่ผิวของผลิตภัณฑ์เห็นเป็นรอยคราบสี ขาวเหลือง

2. กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ละลายในตัวทำละลายและยาง ผสมเข้ากันได้ยากกว่ากำมะถันชนิดละลายแต่เมื่อ ผสมเข้ากันแล้ว เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนกับยาง ทำให้ไม่เกิดการบลูม จึงนิยมใช้กำมะถันชนิดนี้เมื่อ ต้องการใช้กำมะถันจำนวนมาก เช่น ยางชนิดแข็งมาก ข้อจำกัดของกำมะถันชนิดนี้คือมีราคาแพง นอกจากนี้อาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ที่อุณหภูมิสูงเกิน  $100^{\circ}C$  จึงต้องควบคุม อุณหภูมิไม่ให้สูงเกิน ถ้าต้องการจะใช้ประโยชน์กำมะถันชนิดไม่ละลาย

### 2.8.2 สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ทำหน้าที่ช่วยสารเชื่อมโยงให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Rate of vulcanization) เร็วขึ้น ลดเวลาการเชื่อมโยง (Cure time) เกิดการเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กำมะถันน้อยลง [23]

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM เป็น 6 กลุ่มดังนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

CBS เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มซัลเฟนาไมด์ ซึ่งเป็นสารเร่งที่มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) ยาวกว่าไทเอโซล การใส่ซัลเฟนาไมด์เพิ่มขึ้นทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงสั้นลงบ้าง แต่ทำให้มีเวลาเชื่อมโยง (Cure rate) สั้นลงมากและมอดุลัสสูงขึ้นมากด้วย เนื่องจากซัลเฟนาไมด์มีเวลาเริ่มเชื่อมโยงยาว ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในแม่แบบดี เพราะมีเวลาให้ยางไหลได้เต็มแม่แบบและไม่เหมาะต่อการเชื่อมโยงแบบใช้อากาศร้อน แต่เมื่อนำซัลเฟนาไมด์ผสมกับเตตระเมทิลไทยูแรมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethyl-thiuram monosulfide, TMTM) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

TMTD เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มไทยูแรมไดซัลไฟด์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดและนิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มนี้ ยางที่ใช้ไทยูแรมเป็นสารเร่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้หลายวิธี เช่น ใช้เครื่องอบไอน้ำและอากาศร้อน ซึ่งทำให้ยางเกิดการจับตัวก่อนที่จะเสียรูปในขณะเชื่อมโยงในบางครั้ง อาจใช้ไทยูแรมเป็นสารเร่งทุติยภูมิร่วมกับสารเร่งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์

### 2.8.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในการอุตสาหกรรมยางในปัจจุบันได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรด สเตียริกเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงเนื่องจากเป็นซิงค์ไอออนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง [24]

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่เป็นอนินทรีย์ที่สำคัญและนิยมใช้ เมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มอดุลัสจะเพิ่มขึ้นและปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ให้มอดุลัสสูงสุดคือมากกว่า 3 phr โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีอนุภาคเล็ก สามารถใช้ในปริมาณ 1 phr ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีมอดุลัสสูงและใส

กรดไขมันเป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ สำหรับสารเร่งการเชื่อมโยงบางตัว เช่น กรดสเตียริก กรดลอริก เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรดอะลิฟาติกอิ่มตัวที่มีคาร์บอน 12 ถึง 18 อะตอม ปริมาณการใช้กรดไขมันในยางขึ้นกับชนิดของยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ในปริมาณที่น้อย สำหรับยางธรรมชาติมีกรดไขมันอยู่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งอยู่ในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่อยู่ในยางธรรมชาติมีปริมาณต่างกันมาก ซึ่งทำให้เวลาการเชื่อมโยงแตกต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปปริมาณของกรดสเตียริกที่ใช้ในยางธรรมชาติจะใช้ปริมาณ

1-4 phr อย่างไรก็ตามกรดไขมันทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ทำให้ความหนืดของยางลดลงและเกิดการผสมง่ายขึ้น

#### 2.8.4 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายประการ เช่น เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เพื่อให้ยางผสมสูตรมีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต เพื่อลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น สารตัวเติมสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด [20] 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

##### 2.8.4.1 เขม่าดำ (Carbon black)

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

ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยางมีดังนี้

1. ความแข็งแรงดึง เขม่าดำเกือบทุกตัวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่เขม่าดำปริมาณ 40-50 phr จะทำให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด

2. ความทนทานต่อการขีดถู ขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีผลอย่างมากต่อความทนทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการขีดถูจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคเขม่าดำเล็กลง โดยที่ปริมาณเขม่าดำ 60 phr จะความทนทานต่อการขีดถูสูงสุด

3. ความแข็งกด (Hardness) ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ และถ้าขนาดอนุภาคเขม่าดำลดลงความแข็งกดจะเพิ่มขึ้น เขม่าดำจะทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง เมื่อใส่เขม่าดำเพิ่มขึ้นความทนทานต่อการฉีกขาดจะลดลง

### 2.8.5 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants)

สารป้องกันออกซิเดชันเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสภาพได้ เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ซึ่งออกซิเจนเป็นตัวการสำคัญของการเสื่อมสภาพของยาง โดยที่โลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยาง เป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น [21]

สารป้องกันออกซิเดชัน สามารถแบ่งตามสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น 3 ชนิด

1. สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์
2. สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์
3. Imidazyl derivative

สารป้องกันโอโซนเป็นสารที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ตั้งยาง เมื่อนำยางไปยึดไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง ยางชนิดไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ จะเกิดการแตกของยางเนื่องจากโอโซนมากกว่ายางชนิดอิ่มตัว เช่น ยางบิวทิล (IIR) หรือยางอีพียาร์ (EPR) สารป้องกันโอโซนที่ดีคือ P-Phenylene diamine (PPD) นอกจากนี้ยังพบว่าขี้ผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax) ยังเป็นสารที่ใช้ป้องกันโอโซนได้ด้วย โดยปริมาณขี้ผึ้งที่ต้องการใช้มากพอที่จะซึมออกมาที่ผิว ซึ่งขี้ผึ้งที่ซึมออกมาที่ผิวทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับผิวยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน

### 2.8.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

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

### 2.8.7 สารให้ฟอง (Blowing agents)

สารให้ฟอง คือ สารที่ใส่เข้าไปในยางเมื่อให้ความร้อนแก่ยางในขณะทำการเชื่อมโยง โมเลกุลของสารให้ฟองจะสลายตัวให้ก๊าซออกมา ซึ่งทำให้ยางเกิดรูพรุนในรูปของฟองน้ำ (Sponge) หรือยางรูพรุนขนาดเล็ก (Micro cellular rubber)

สารให้ฟองที่ดีมีลักษณะดังนี้

- ควรปล่อยก๊าซ ออกมาในช่วงอุณหภูมิแคบและแน่นอน เพื่อสามารถควบคุมได้ง่าย และรวดเร็วพอสมควร

- ก๊าซที่ออกมาไม่ควรกัดกร่อนโลหะ เช่น ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ควรเป็นก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

- สามารถกระจายและละลายในยางได้ดี
- มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง
- ไม่มีผลต่ออัตราการเชื่อมโยงยาง
- ไม่ควรทำให้ยางหดตัวหรือยุบตัวภายหลังการเชื่อมโยง
- ราคาถูก

สารให้ฟองสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต และ แอมโมเนียมคาร์บอเนต ซึ่งสารทั้ง 3 ชนิดนี้จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันนิยมใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตมากที่สุด เนื่องจากแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต่างและกรดตามลำดับ ก๊าซเหล่านี้ถ้าเก็บในยางจะรวมตัวกันได้ ดังนั้นโอกาสของยางที่ขยายตัวจะยุบตัวกลับเล็กน้อยอีกได้ นอกจากนี้ความเป็นต่างทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

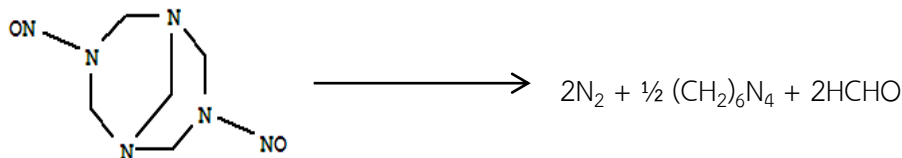
2. สารให้ฟองชนิดอินทรีย์ ปัจจุบันใช้สารชนิดอินทรีย์เกือบทั้งหมด เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถละลายในยางได้ดี ทำให้การกระจายของสารให้ฟองเป็นไปได้อย่างสม่ำเสมอ ฟองอากาศในยางจะกระจายทั่วถึงกันตลอด สามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามโครงสร้างดังนี้

- 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)

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

DNPT มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอ่อน สลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 205°C เมื่อสลายตัวให้ก๊าซต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอรั่มัลดีไฮด์ และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน แสดงดังรูป 2.12 อย่างไรก็ตามฟอรั่มัลดีไฮด์และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่น DNPT สามารถทำให้เจือจางได้โดยไม่เกิดอันตราย ที่ความเข้มข้น 80% จะให้ก๊าซมาเป็นพิเศษ (ประมาณ 260 cm<sup>3</sup>/g ภายใต้สภาวะปกติ) เนื่องจาก DNPT เมื่อสลายตัวให้ก๊าซปริมาณมากจึงนิยมใช้กันแพร่หลาย สำหรับผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ DNPT ได้แก่ พื้นรองเท้าฟองน้ำ (Porous soles) และ

Micro cellular rubber แต่ไม่เหมาะกับการทำ Sponge rubber เนื่องจาก DNPT สลายตัวที่อุณหภูมิสูง [24]



รูปที่ 2.12 กลไกปฏิกิริยาการสลายตัวของ DNPT [40]

### 2.8.8 คิกเกอร์ (Kickers)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) หรือ คิกเกอร์ เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาของสารให้ฟอง และทำให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง คิกเกอร์มีหลายชนิด การเลือกคิกเกอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานมีความสำคัญมาก ปัจจัยที่พิจารณาในการเลือก ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง สภาพะของการใช้งาน ความสามารถการผสมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หรือความเข้ากันได้ สารกระตุ้นปฏิกิริยาที่ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้สามารถใช้สารให้ฟองได้ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้าง และสามารถใช้งานได้กับสารให้ฟองหลายชนิด

คิกเกอร์ที่ใช้งานกับ DNPT มีหลายชนิดได้แก่

1. สารที่เป็นกรด เช่น กรดซาลิไซลิก และกรดพาทาลิก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกลิ่นและกรดทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลง
2. สารที่เป็นด่าง เช่น ยูเรีย (Urea) และสารผสมที่มียูเรีย ซึ่งทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น
3. สารที่เป็นกลาง เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล การใช้สารที่เป็นกลาง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกลิ่น และยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

### 2.8.9 พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol; PEG)

พอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากเอทิลีนไกลคอลที่ทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลีนไดออกไซด์ พอลิเอทิลีนไกลคอล มีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น จุดเดือดสูง นิยมใช้เพิ่มความหนืดในสารต่าง ๆ เช่น ครีมทาผิว ยาระดม ในอุตสาหกรรมยางใช้ PEG เคลือบบนพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อป้องกันสารตัวเติมดูดสารเคมีที่มีขี้ เช่น ซิงค์ออกไซด์ สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 ท่อยางน้ำซึม

ท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe) เป็นวัสดุสำหรับการให้น้ำพืชแนวใหม่ ตัวท่อยางผลิตจากผงยางเก่าที่ใช้แล้วผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ และทำให้เกิดรูพรุนโดยสารให้ฟอง (Blowing agent) และสารอื่น ๆ ที่จำเป็น (ขึ้นกับสูตรของบริษัทผู้ผลิต) ทำการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการรีด (Extrusion) ภายใต้ความร้อนและแรงดันที่ออกแบบ เมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้วสายยางจะมีลักษณะเป็นท่อกลมที่มีความยืดหยุ่นสูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความยาวจะมีความแตกต่างกันตามความต้องการของผู้ใช้งานและผู้ผลิต โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่นิยมผลิตในประเทศไทยเพื่อการจำหน่ายเท่ากับ 16 มิลลิเมตร และความยาวที่นิยมผลิตคือ 15, 30, 50 และ 100 เมตร ผงของสายยางมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ซึ่งมองไม่เห็นด้วยสายตา เมื่อมีการจ่ายน้ำเข้าสู่ท่อยาง น้ำจะหยดออกมาตามรูพรุนเหล่านี้ ดังรูปที่ 2.13 อัตราการจ่ายน้ำของท่อยางน้ำซึมขึ้นอยู่กับความดันน้ำต้นสาย ความยาวของท่อยางและคุณสมบัติของท่อยางแต่ละรุ่น [42]



รูปที่ 2.13 ท่อยางน้ำซึม [42]

### 2.9.1 หลักการทำงาน

น้ำจะเริ่มซึมออกจากรูพรุนของผนังอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ต้นไม้ หญ้า หรือพืชอื่น ๆ ได้รับความชุ่มชื้นอย่างเพียงพอและสามารถดูดซึมน้ำทัน โดยใช้แรงดันน้ำน้อยหรือจากก๊อมน้ำก็สามารถใช้งานได้

ข้อดีของการใช้งานท่อยางน้ำซึม [43]

1. ช่วยในการประหยัดการใช้น้ำ เนื่องจากสามารถควบคุมปริมาณการให้น้ำได้ง่ายและมีความแม่นยำ
2. สามารถใช้ได้ทั้งบนดิน และใต้ดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ติดตั้ง และดูแลรักษาง่าย
4. ช่วยป้องกันการไหลของดินและการพังทลายของหน้าดินได้ เนื่องจากท่อขายน้ำซีมีอัตราการไหลของน้ำช้า
5. สามารถควบคุมความชื้นในดินได้
6. ประหยัดเวลาในการทำงาน

### 2.9.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการให้น้ำ

อัตราการจ่ายน้ำนับว่าเป็นตัวแปรสำคัญที่ออกแบบการให้น้ำใช้ในการตัดสินใจวางแผนการให้น้ำกับพืช สำหรับสายยางน้ำซีมีนั้นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลกระทบต่ออัตราการจ่ายน้ำคือ ช่วงเวลา ความยาวสายยาง และความดันน้ำต้นสาย [43] โดยมีรายละเอียดดังนี้

- อัตราการจ่ายน้ำของสายยางน้ำซีมีเปรียบเทียบกับเวลา พบว่าเมื่อจ่ายน้ำเข้าสายยางที่ยังไม่เคยใช้งานมาก่อนด้วยความดันน้ำต้นสายคงที่ อัตราการจ่ายน้ำของสายยางน้ำซีมีปริมาณที่สูงมากในช่วงแรกและเริ่มลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนมีปริมาณที่เกือบคงที่
- อัตราการจ่ายน้ำของสายยางน้ำซีมีตามความยาวสายยาง พบว่าสำหรับสายยางที่ยังไม่เคยใช้งานเมื่อเริ่มต้นจ่ายน้ำเข้าสาย อัตราการจ่ายน้ำในช่วงต้นสายมีปริมาณสูงมากและลดลงตามความยาวของสายยาวของสายยางที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานการไหลระหว่างการไหลสูงมากในช่วงเริ่มต้นของการจ่ายน้ำ
- อัตราการจ่ายน้ำของสายยางน้ำซีมีเปรียบเทียบกับความดัน พบว่าหากสายยางมีสมบัติเหมือนกัน และความยาวที่ใช้กันมีค่าเท่ากัน อัตราการจ่ายน้ำขึ้นอยู่กับความดันน้ำต้นสายที่จ่ายเข้าสายยาง และยังพบอีกด้วยว่าความดันน้ำต้นสายเป็นตัวแปรที่ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการจ่ายน้ำของสายยางน้ำซีมีมากที่สุด

### 2.10 การเกษตรอัจฉริยะ

การเกษตรอัจฉริยะ (Smart agriculture) คือการทำเกษตรที่นำระบบเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการบริหารจัดการดูแลและการเพาะปลูก รวมถึงกระบวนการผลิตเพื่อนำไปสู่เกษตรเชิงธุรกิจ ด้วยการผสมผสานศาสตร์ทางวิทยาศาสตร์การเกษตรและศาสตร์ทางวิศวกรรมเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาผสมผสานเข้ากับงานด้านการเกษตรเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้กับเกษตรกร อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะตั้งอยู่บนแนวคิดของการทำเกษตรสมัยใหม่ที่เรียกว่า “เกษตรแม่นยำสูง (Precision agriculture)” ซึ่งเป็นการทำเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยทำให้เกษตรกรสามารถปรับการใช้ทรัพยากรให้สอดคล้องกับสภาพของพื้นที่มากที่สุด รวมถึงเรื่องการดูแลอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยลดการสูญเสียทรัพยากรและได้ผลผลิตที่ตรงตามความต้องการของผู้ดูแลมากที่สุด โดยนำเทคโนโลยีที่เรียกว่า “อินเทอร์เน็ตแห่งสรรพสิ่ง (Internet of Things)” เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

of things, IoT)” เข้ามาช่วยในการบริหารจัดการฟาร์มอย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2.14 เป็นที่มาของคำว่า เกษตรอัจฉริยะหรือสมาร์ทฟาร์ม (Smart farm) ซึ่งได้นำเทคโนโลยี RFID sensors เข้ามาใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทางการเกษตรต่าง ๆ เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ควบคุมหลักได้ ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) เซนเซอร์วัดดิน (Soil sensor) และเซนเซอร์ตรวจโรคพืช (Disease sensor) เป็นต้น [44-45]



รูปที่ 2.14 การใช้ IoT เพื่อทำการเกษตรอัจฉริยะ [44]

## 2.11 ท่อน้ำซึมเชิงพาณิชย์

ตัวอย่างบริษัทที่จำหน่ายท่อน้ำซึมทั้งในประเทศและต่างประเทศ มีดังนี้

Leaky pipe systems [5] ผลิตท่อน้ำซึมจากยางรีเคลม ใช้ในการให้น้ำพืชโดยมีน้ำซึมออกมา รอบ ๆ ท่อน้ำซึมถูกนำมาใช้ในการให้น้ำในด้านการเกษตร สวนหย่อม การทำงานของท่อน้ำซึมเป็นการให้น้ำที่ละน้อย ๆ ที่ความดันต่ำต่อก๊อกน้ำหรือถึงน้ำที่ถูกวางไว้บนที่สูง สามารถให้น้ำโดยไม่จำกัดพื้นที่แต่ขึ้นกับความแรงของแหล่งน้ำที่ใช้ ความดันที่ใช้ในการให้น้ำประมาณ 1-2 bar ต่อปริมาณที่ออกมา 2-4 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง รายละเอียดของท่อแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky pipe systems [5]

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในและภายนอก (mm)	ความยาวท่อ สูงสุดในการใช้ งาน	ลักษณะการใช้งาน
LP12H	9, 14	50	ใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน โดยทั่วไป ใช้กับสวนหย่อม สามารถใช้ได้ทั้ง โครงการใหญ่และเล็ก
LP12L	9, 14	100	ใช้งานบริเวณใต้ดิน รั้วต้นไม้เดี่ยว ๆ ที่มีการคดเคี้ยว สนามหญ้า บริเวณ ที่เป็นเนิน

บริษัท กลสินธรรัต จำกัด [6] ผลิตท่อน้ำซึมเพื่อใช้ในการเกษตร และสวนหย่อม ใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน การทำงานของท่อน้ำซึม คือ ให้น้ำอย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ น้ำจะกระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของรากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดน้ำ มีความยืดหยุ่น ท่อน้ำซึมมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 16 มิลลิเมตร ความดันที่ใช้ในการให้น้ำประมาณ 0.4-1.0 bar ต่อปริมาณน้ำที่ออกมา 1.2-7.2 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท กลสินธรรัต จำกัด [6]

LBS global company [7] ผลิตท่อน้ำซึมจากวัสดุรีไซเคิล เพื่อใช้งานในการเกษตร สวนหย่อม และในโรงเรือน (Greenhouse) ให้การรดน้ำที่แม่นยำ ประหยัดน้ำ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความดันที่ใช้ในการให้น้ำประมาณ 0.5-3 bar ต่อปริมาณที่ออกมา 2-6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม Porous pipe Ltd. [7]

#### ตารางที่ 2.4 ข้อมูลความดันในการใช้งาน ปริมาณน้ำ และราคาท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า

บริษัท	ความดัน (bar)	ปริมาณน้ำ (l/m/h)	บาท/เมตร
Leaky pipe	1-2	2-4	68
บริษัท กสิพันธ์ จำกัด	0.4-1	1.2-7.2	48
LBS global company	0.5-3	2-6	35

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัฐวี พินิจกุล [18] ศึกษาสมบัติและการประยุกต์ใช้งานท่อน้ำซึมชนิดเสริมแรงที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลม และผงยางรถยนต์ (GRT) โดยมีเศษเส้นใยยางรถยนต์ (WTF) ชนิดเส้นใยสั้นจากชั้นพลาย (Ply) ของยางรถยนต์ที่ใช้แล้วเป็นสารเสริมแรง สารให้ฟองไดโนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) และคิกเกอร์ยูเรียถูกใช้เพื่อสร้างโครงสร้างเซลล์เปิด การผสมสูตรทำด้วยเครื่องผสมชนิดเคอร์ ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคนเดียว และทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อน อัตราส่วนของ GRT และยาง (NR และ RR) เท่ากับ 60:40 (โดยน้ำหนัก) แล้วศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ เวลาการเชื่อมโยง, อัตราส่วนระหว่าง NR:RR, ปริมาณสารให้ฟอง และศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง เช่น ปริมาณเขม่าดำ, เปรียบเทียบปริมาณการใช้เส้นใยด้วยวิธีการนำมาใช้โดยตรง และการทำมาสเตอร์แบทช์ และเขม่าดำร่วมกับเส้นใย สมบัติของท่อน้ำซึมที่ศึกษา ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัมฐานวิทยา อัตราการซึมผ่านของน้ำ เปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม และค่าความดันระเบิดของท่อน้ำซึม จากการทดลองพบว่า เวลาเชื่อมโยงที่เหมาะสมคือ 20 นาที ในการศึกษาอัตราส่วนของยาง NR:RR พบว่าสมบัติเชิงกลของท่อไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเลือกสูตรที่มีอัตราส่วน 50:50 ซึ่งเป็นสูตรที่เหมาะสมในการผลิตเป็นท่อน้ำซึม จากนั้นศึกษาอิทธิพลของสารเสริมแรง (เขม่าดำและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใย) พบว่าสมบัติบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่เขม่าดำ 50 phr และเส้นใย 6 phr แต่ความหนืดมูนี้ มอดูลัสที่ 100% และความแข็งกตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสารเสริมแรง อย่างไรก็ตามการใช้เขม่าดำ 50 phr และปริมาณเส้นใย 4 phr ทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรสูงสุด ซึ่งการใช้เส้นใยร่วมกับเขม่าดำส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซึม และอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่น ๆ นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความดันระเบิดของท่อน้ำซึมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากการทดสอบท่อระยะยาว 50 เมตร พบว่าท่อน้ำซึมมีอัตราการซึมผ่านน้ำและความดันในแต่ละตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยมีต้นทุนการผลิตประมาณ 13 บาท/เมตร

**ณภัทร รัตนภักดี และปิยธิดา ปลื้มภาณุภัทร [46]** ศึกษาประสิทธิภาพการใช้ท่อน้ำซึมชนิดเสริมแรงสูตรที่ดีที่สุดของปฐวี พินิจกุล [18] ทั้งบนดินและใต้ดิน โดยศึกษาการเสื่อมสภาพของท่อที่สภาวะต่าง ๆ การเกิดตะไคร่ จำลองสภาวะการใช้งานใต้ดินเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งาน เช่น การยุบตัวและอัตราการไหลของน้ำ รวมทั้งการเปรียบเทียบการใช้งานแปลงปลูกจริง จากการศึกษาการเสื่อมสภาพของท่อในสภาวะต่าง ๆ พบว่าสภาวะดินแห้ง ดินเปียก สารละลายปุ๋ยเคมี น้ำ และความร้อน ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซึมในช่วงเวลาที่ศึกษา 2 เดือน แต่ในสภาวะที่โดนแสงแดดมีผลต่อสมบัติเชิงกลเล็กน้อย เช่น ค่าความแข็งแรง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพ ในการศึกษาการเกิดตะไคร่ในน้ำนิ่งพบว่า เกิดตะไคร่ 0.117 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำลดลง 12.5 เปอร์เซ็นต์ การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 118.8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการอุดตันของตะไคร่ในรูพรุน จากการทดสอบการใช้งานใต้ดิน พบว่าอัตราการซึมผ่านน้ำใต้ดินน้อยกว่าบนดิน ซึ่งสอดคล้องกับกับค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของท่อใต้ดินที่มีค่าน้อยกว่าบนดิน เนื่องจากผลของการกดอัดของดิน อัตราการซึมผ่านน้ำและระยะทางการแพร่ของน้ำในดินร่วนและดินทรายมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ น้ำหนักกดสูงสุดที่ทำให้ท่อน้ำซึมถูกทับแบนประมาณ 7 กิโลกรัม แต่น้ำยังสามารถซึมออกได้ พบว่าท่อสามารถใช้งานได้ทั้งบนดินและใต้ดินและมีศักยภาพสูงที่จะจำหน่ายเชิงพาณิชย์

**สมนา แจ่มเหมือน [16]** ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมที่เตรียมจากยางธรรมชาติ (NR) และผงยางรถยนต์ โดยใช้ DNPT เป็นสารให้ฟองและสารประกอบยูเรียเป็นคิกเกอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อน โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง ปริมาณเขม่าดำ ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์และความยาวท่อ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับการเชื่อมโยงคือ 160°C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำพบว่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ปริมาณเขม่าดำ 50 phr จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง ส่วนความหนืดมูนี้ มอดูลัส ความแข็งกตและความหนาแน่นมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณผงยางรถยนต์ ทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง และเมื่อใช้ขนาด  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเผยแพร่หรือการศึกษานี้เป็นไปโดยอิสระโดยไม่มีการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคของผงยางรถยนต์เล็กกลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง เมื่อศึกษาความยาวของท่อพบว่าอัตราการซึมผ่านน้ำแต่ละตำแหน่งของท่อมีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษาพบว่าท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:Carbon black เท่ากับ 40:60:3:50 มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการใช้งานในด้านเกษตรกรรม

**วคิน จิรไพศาลกุล และคณะ [17]** ศึกษาท่อน้ำซึมที่เตรียมได้จากยางรีเคลม (RR) และผงยางรถยนต์ โดยใช้สารให้ฟอง DNPT และสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน และทำการเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที โดยศึกษาปริมาณเขม่าดำ และปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกลต่าง ๆ พบว่าปริมาณเขม่าดำรวม 70 phr เป็นปริมาณที่มีค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการซึมผ่านของน้ำเหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตามปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไป ทำให้เขม่าดำกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง จากการศึกษาเรื่องปริมาณสารให้ฟอง พบว่าปริมาณสารให้ฟองที่ร้อยละ 3 เหมาะสมกับเวลาการเชื่อมโยงที่ 20 นาที ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึงและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมที่สุด

**เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์ และคณะ [47]** ศึกษาสมบัติของท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยมีเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ อัตราส่วนของ GRT:LDPE (50:50 60:40 และ 70:30) และปริมาณสารให้ฟอง (0-3%) จากการทดลองพบว่า สูตรที่เหมาะสมในการผลิตท่อน้ำซึมคือ GRT:LDPE:AZ เท่ากับ 60:40:3

**สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล [48]** ศึกษาการผลิตและสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และผงยางรถยนต์ (GRT) โดยใช้ AZ เป็นสารให้ฟอง พบว่าสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือใช้เวลาในการอัดแบบ 5 นาทีที่อุณหภูมิ 230°C ซึ่งอัตราส่วน GRT:HDPE ที่เหมาะสมคือ 60:40 เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองทำให้สมบัติเชิงกลลดลง เช่น ความแข็งแรงดึงมอดูลัส และความแข็งกด เมื่อศึกษาสัญญาณวิทยาพบว่า GRT และ HDPE สามารถผสมเข้ากันได้ดี มีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อเปรียบเทียบการซึมผ่านของน้ำพบว่า GRT:HDPE:AZ ที่อัตราส่วน 60:40:8 ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำ 24-25 ลิตร/ชั่วโมง/ตารางเมตร ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นท่อน้ำซึม

**Soltani S. and Ghoreishy M. [49]** ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยสั้นไนลอนและสารช่วยยึดเกาะ (Bonding agent) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการไหลของคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) ผสมเส้นใยสั้นไนลอน 66 ความยาว 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.18 มิลลิเมตร และเส้นใยสั้นไนลอนจากของเสียในระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลมของล้อยาง ความยาว 6 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 มิลลิเมตร โดยผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะระหว่างยางกับเส้นใย ซึ่งสารช่วยยึดเกาะประกอบด้วย Resorcinol, Hexamethylenetetramine และ Hydrated silica (HRH) จากการศึกษาเส้นใยสั้น

ไนลอน ที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40 phr พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใย  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงตามแนวเครื่องจักรมีค่ามากกว่าตามแนวขวางเครื่องจักร จากการศึกษาชนิดของเส้นใย พบว่าเส้นใยสั้นไนลอน 66 มีค่าความแข็งแรงดึงมากกว่าเส้นใยสั้นไนลอนจากของเสีย ในระหว่างกระบวนการผลิตยางรีคอมของล้อยาง และเมื่อศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะ พบว่าคอมโพสิตที่ใช้สารช่วยยึดเกาะทำให้เวลาการเชื่อมโยงสั้นลง และสมบัติเชิงกลดีขึ้น

**อุกฤษฏ์ วิสิฐธนวรรธ และคณะ [50]** ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยใบสับปะรดและสารคู่ควบ (Coupling agent) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างยางไนไตรล์และเส้นใยจากใบสับปะรดชนิดเส้นใยสั้นที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเป็นสารเสริมแรง โดยทำการใส่ปริมาณเส้นใยใบสับปะรด 0, 10, และ 30 phr ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยาง และการเติมสารคู่ควบมีผลต่อความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางและเส้นใยใบสับปะรด พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) สั้นลง ส่วนค่าแรงบิดสูงสุด (Maximum torque,  $M_H$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมสารคู่ควบพบว่า เวลาเริ่มเชื่อมโยงและค่าแรงบิดสูงสุดมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับไม่มีการเติมสารคู่ควบ เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงดึง พบว่าพฤติกรรมแรงดึงทั้งทิศทางตามยาวและทิศทางตามขวางมีผลแตกต่างกัน จึงสังเกตได้ว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใยใบสับปะรดในคอมโพสิตมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย ทำให้ค่าความแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติมสารคู่ควบทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มีการเติมสารคู่ควบ ส่วนค่ามอดุลัสที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 10 เปอร์เซ็นต์ ( $M_{10}$ ) ความแข็งแรงฉีกขาด และความแข็งกดมีแนวโน้มเดียวกับค่าความแข็งแรงดึง และเมื่อนำไปส่องด้วยกล้อง SEM เพื่อทดสอบดูการแตกหักบริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน (Fracture surfaces) พบว่า คอมโพสิตที่มีการเติมสารคู่ควบบริเวณพื้นผิวมีความเรียบคล้ายแก้ว ส่วนคอมโพสิตที่ไม่มีการเติมสารคู่ควบบริเวณพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่า และส่วนที่ยื่นออกมาของเส้นใยมีความยาวมากกว่า

**Nuttapong H. [51]** ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยใบสับปะรดที่ผสมกับยางอะครีโลไนไตรล์ โดยการใส่ยางอะครีโลไนไตรล์แทนที่ยางธรรมชาติในปริมาณ 0-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใส่เส้นใยใบสับปะรดที่ 30 phr ผลการศึกษา พบว่าการแทนที่ด้วยยางอะครีโลไนไตรล์ทำให้ความเค้น (Stress) และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากความถี่ช่วงระหว่างยางอะครีโลไนไตรล์และเส้นใยใบสับปะรด และเมื่อศึกษาขั้นตอนการผสมคอมโพสิตพบว่า การทำให้เส้นใยกระจายตัวในยางอะครีโลไนไตรล์ก่อนที่จะใส่ยางธรรมชาติ สามารถปรับปรุงการถ่ายโอนความเครียด (Stress transfer) จากเมทริกซ์ไปยังยางได้ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัสที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ ( $M_{100}$  และ  $M_{300}$ ) เพิ่มขึ้น ดังนั้นขั้นตอนการผสมจึงมีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

**ณัฐนิ โฉ่ทัพพัฒนานนท์ และคณะ [52]** ศึกษาประสิทธิภาพของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยใบสับปะรด โดยทำการใส่ปริมาณเส้นใยใบสับปะรด 10, 20, 30 และ 40 phr ผลการศึกษาพบว่า การใส่เส้นใยใบสับปะรดทำให้ความเค้น (Stress) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมทริกซ์ยางมีความแข็ง (Stiffness) ขึ้น แต่ความแข็งแรงดึงมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่ได้ใส่เส้นใย

ใบสับปะรด โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงในทิศทางตามยาวมีค่ามากกว่าในทิศทางตามขวาง และจากการที่เมทริกซ์ยางมีความแข็งขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น และจากการศึกษาการจัดเรียงตัวของเส้นใย พบว่า คอมโพสิตยางธรรมชาติที่ผสมเส้นใย 20 phr มีการจัดวางแนวเส้นใยที่ดีที่สุดและมีสมบัติเชิงกลในระดับที่กระบวนการสามารถยอมรับได้ จึงเลือกสูตรนี้มาทำการศึกษาต่อ โดยศึกษาผลของการดัดแปรพื้นผิว (Surface treatments) ของเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 และ 7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และดัดแปรพื้นผิวเส้นใยด้วยเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5% โดยน้ำหนักของเส้นใย ผลการศึกษา พบว่าการดัดแปรพื้นผิวด้วย NaOH ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากขึ้น ส่งผลให้ยางธรรมชาติและเส้นใยมีการยึดเกาะเชิงกล (Mechanical interlocking) ดีขึ้น ส่วนการดัดแปรพื้นผิวด้วย BPO ทำให้พื้นผิวของของเส้นใยมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยกับยางธรรมชาติสามารถเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สุดในการดัดแปรพื้นผิวของเส้นใยใบสับปะรด โดยใช้ NaOH ที่ความเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ BPO ที่ความเข้มข้น 1% โดยน้ำหนักของเส้นใย

Ismail, H. *et al.* [53] ศึกษาผลของเส้นใยและสารคู่ควบที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและลักษณะการวัลคาไนซ์ของคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับเส้นใยจากไผ่ (Bamboo fiber) โดยผสมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ จากการศึกษาปริมาณเส้นใยที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 50 phr พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงสั้นลง อาจมีสาเหตุจากการที่ปริมาณเส้นใยมากขึ้น ทำให้ต้องใช้เวลาผสมมากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนสูงขึ้นเนื่องมาจากแรงเสียดทาน และจากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยไผ่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงและค่าทนต่อแรงฉีกขาดลดลง แต่ความแข็ง (Hardness) และมอดูลัสที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัว 100 และ 300 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาผลของสารช่วยยึดเกาะระหว่างยางกับเส้นใย ซึ่งสารคู่ควบประกอบด้วย Phenol formaldehyde, Hexamethylenetetramine และ Silica พบว่าเมื่อใส่สารคู่ควบ ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงสั้นกว่า และการใส่สารคู่ควบทำให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารคู่ควบ เนื่องจากยางและเส้นใยมีความเข้ากันได้มากขึ้น

Ismail, H. *et al.* [54] ศึกษาผลของสารคู่ควบที่มีผลต่อลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติผสมกับเส้นใยโปแก้ว (Kenaf fiber) โดยใช้ บิส-(3-ไตรเอทอกซีซิลิลโพรพิล) เตตระซัลไฟด์ (Si-69) เป็นสารคู่ควบ ปริมาณเส้นใยที่ใช้ 10, 20, 30 และ 40 phr ผสมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ ผลการศึกษา พบว่า การใส่สารคู่ควบ Si-69 ทำให้เวลาเริ่มเชื่อมโยงและเวลาเชื่อมโยงสั้นลงเมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารคู่ควบ เนื่องจากการใส่สารคู่ควบทำให้เส้นใยกระจายตัวได้ดีขึ้น และในโครงสร้างของ Si-69 มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้ช่วยในการเชื่อมโยงเร็วขึ้น ส่งผลให้เวลาในการเชื่อมโยงสั้นลง ทั้งนี้สารคู่ควบช่วยให้ค่าแรงบิดสูงสุด ( $M_H$ ) มากขึ้น และจากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การใส่สารคู่ควบ Si-69 ทำให้

ค่าความแข็งแรงดึง เพอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัสที่ 100 และ 300 เพอร์เซ็นต์การดึงยืดเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารคู่ควบ เนื่องจากการใส่สารคู่ควบทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและเส้นใยดีขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากภาพ SEM เห็นได้ว่าคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารคู่ควบ จะเห็นช่องว่างและเส้นใยที่หลุดออกจากเมทริกซ์อย่างมากกว่าเส้นใยแตกหัก อย่างไรก็ตามเมื่อใส่ สารคู่ควบ เห็นได้ว่าเส้นใยมีการแตกหักมากขึ้น จำนวนช่องว่างที่เส้นใยหลุดออกจากเมทริกซ์น้อยลง

Jacob, M. *et al.* [55] ศึกษาสมบัติทางกลเชิงพลวัต (Dynamic mechanical properties) ของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านครนารายณ์ความยาว 10 มิลลิเมตร เส้นใยปาล์มความยาว 6 มิลลิเมตร และยางธรรมชาติ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยทั้งสองชนิด ค่ามอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มที่คล้ายกันกับค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยในคอมโพสิต การใส่เส้นใยทำให้สมบัติการกระจายพลังงาน (Damping properties) ของคอมโพสิตลดลง เพราะเส้นใยเข้าไปลดความสามารถในการเคลื่อนที่อย่างอิสระของโมเลกุลยางธรรมชาติ

#### สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1) การผลิตท่อน้ำซีมจาก NR ผสม RR และ GTR (30 เมช) เสริมแรงด้วย WTF โดยใช้สารให้ฟอง DNPT และยูเรียเป็นคิกเกอร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการเชื่อมโยงคือ อุณหภูมิ 160°C ที่เวลา 20 นาที และอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางผสมสูตร คือ NR:RR:GTR-20:20:60
- 2) การผลิตท่อน้ำซีมจาก NR ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็น GTR (40 เมช) โดยใช้สารให้ฟอง DNPT และยูเรียเป็นคิกเกอร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการเชื่อมโยงคือ อุณหภูมิ 160°C ที่เวลา 20 นาที และอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางผสมสูตร คือ NR:GTR-40:60
- 3) การผลิตท่อน้ำซีมจาก RR ผสม GTR (30 เมช) ในอัตราส่วน RR:GTR-50:50 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการเชื่อมโยงคือ อุณหภูมิ 160°C ที่เวลา 20 นาที โดยปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่เหมาะสมต่อการผลิตท่อน้ำซีม คือ 3% (เทียบกับ RR)
- 4) การศึกษาเส้นใย PALF และสารคู่ควบในยางไนไตรล์ พบว่าสารคู่ควบมีผลต่อการยึดติดเส้นใยกับยาง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดุลัสที่ 10 เพอร์เซ็นต์การดึงยืด (M10) มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 12 เท่า และการใช้สารคู่ควบส่งผลให้เวลาการเชื่อมโยงสั้นลงเล็กน้อย
- 5) การศึกษาผลของเส้นใยไผ่และสารคู่ควบในยางธรรมชาติ พบว่าการใส่เส้นใยทำให้ค่าความแข็งแรงดและมอดุลัสที่ 100 และ 300 เพอร์เซ็นต์การดึงยืด (M100 และ M300) เพิ่มขึ้น และการใช้สารคู่ควบทำให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าคอมโพสิตที่ไม่ใส่สารคู่ควบ
- 6) การศึกษาสมบัติทางกลเชิงพลวัตของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านครนารายณ์ เส้นใยปาล์ม และ NR พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ค่ามอดุลัสสะสมและมอดุลัสสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้น

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาท่อยางน้ำซึมชนิดเสริมแรงที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลม และผงยางรถยนต์ ซึ่งทำการศึกษาเปรียบเทียบชนิดและปริมาณเส้นใยระหว่างเส้นใยขะยงรถยนต์ และเส้นใยใบสับปะรด และศึกษาปริมาณสารให้ฟอง มีแผนการดำเนินการดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณเส้นใยขะยงรถยนต์และเส้นใยใบสับปะรด

ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำ

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติการไหลพลวัต (RPA)

ตอนที่ 4 ศึกษาและเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำและการทนความดันสูงสุดของท่อยางน้ำซึม

ตอนที่ 5 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของความยาวที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อยางน้ำซึมต่ออัตราการซึมผ่านน้ำและความดัน

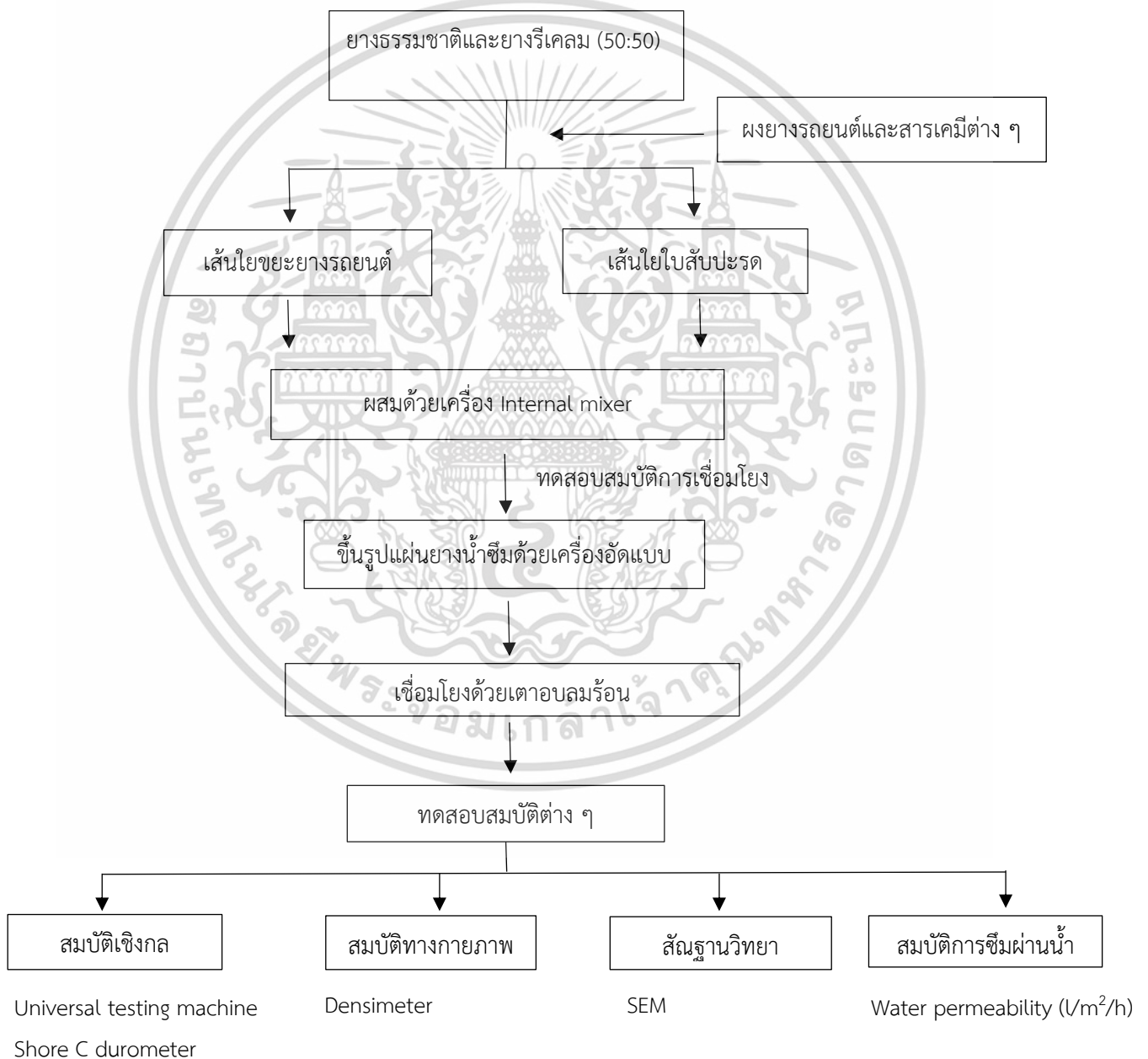
ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 โดยขึ้นรูปชิ้นงานทุกสูตรด้วยเครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine) จากนั้นศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) เพื่อทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสที่ 10 และ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด นอกจากนี้ใช้ดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ C (Shore C durometer) เพื่อทดสอบค่าความแข็งกด
- การศึกษาสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter) เพื่อหาความหนาแน่นของชิ้นงาน
- การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฟองอากาศ
- การศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำ
- การศึกษาสมบัติพลวัตของยางด้วยเครื่อง Rubber Processing Analyzer (RPA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

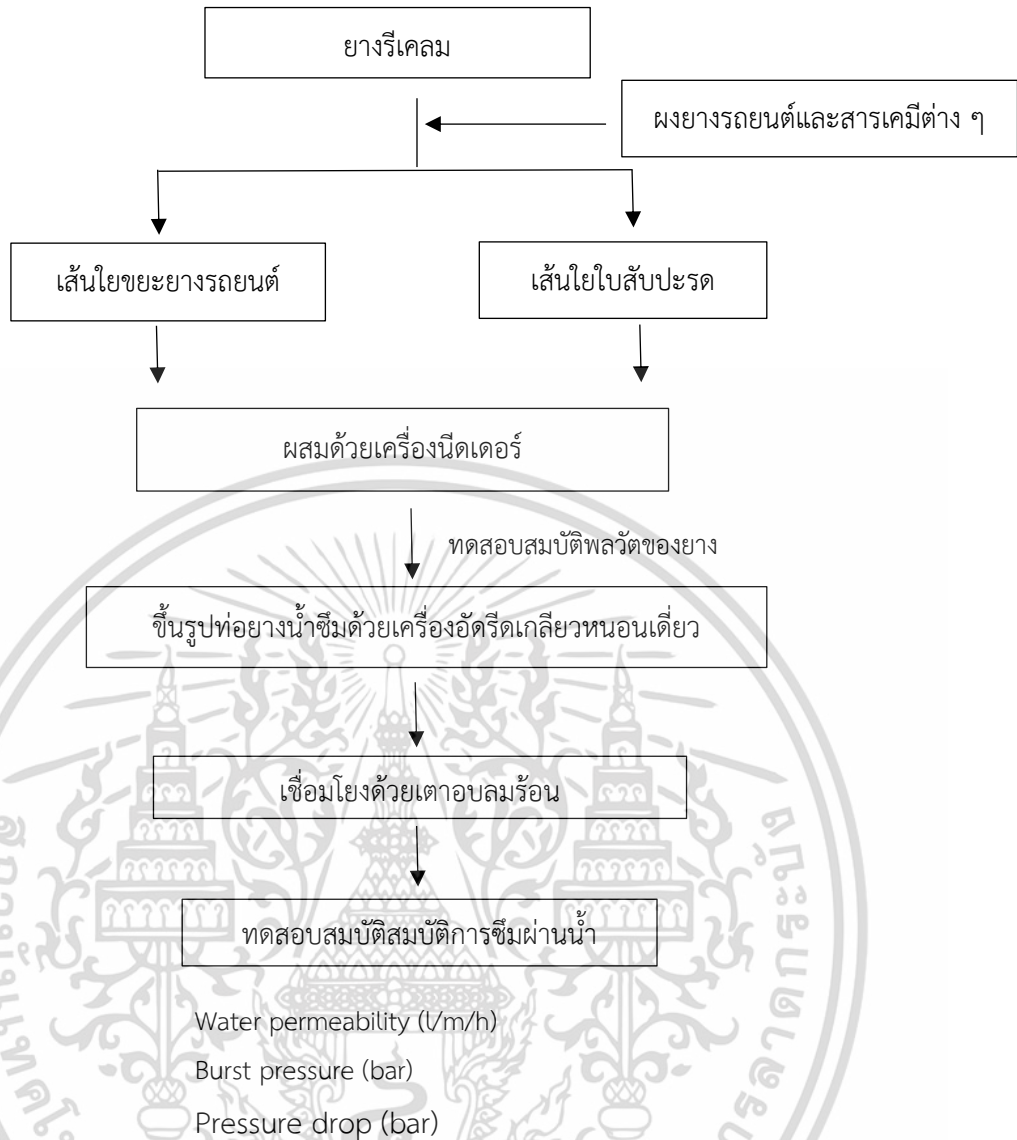
หลังจากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ เลือกยางผสมสูตรที่มีสมบัติเชิงกลดีของการศึกษาในแต่ละตอนจากแผนดำเนินการ นำมาขึ้นรูปท่อน้ำซึมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมดังนี้

- ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) ที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 และ 1.8 bar
- ทดสอบความดันระเบิด (Burst pressure)
- ทดสอบความดันลด (Pressure drop) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อน้ำซึม และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความยาวท่อน้ำซึม 20 เมตร เช่น 10 และ 20 เมตร



### รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของแผ่นยางน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของท่ออย่างน้ำซึม

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ยางธรรมชาติ (NR) เกรด STR 5L ห้างหุ้นส่วนจำกัด ยงแสง เอ็นเตอร์ไพรส์ สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1
- ยางรีเคลม (RR) เกรด UCD-105 บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.2
- ผงยางรถยนต์ (GTR) ขนาด 30 เมช ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด
- เส้นใยจากผ้าใบยางรถยนต์ (WTF) บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนกิจ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เส้นใยจากใบสับปะรด (PALF) มหาวิทยาลัยมหิดล สมบัติทางเคมีบางประการ แสดงดังตารางที่ 3.3

- เขม่าดำ เกรด N550 บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด
- สารเชื่อมโยงกำมะถัน เกรดการค้า บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี 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) น้ำมันแนพทาณิก (Naphthenic oil) เกรดการค้า บริษัท พี.เอส.พี สเปเชียลตีง จำกัด
- 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® DPT บริษัท เอ.เอฟ.ซูเปอร์เซลล์ จำกัด สมบัติบางประการของสารให้ฟอง DNPT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.4
- สารกระตุ้นสารให้ฟอง ยูเรีย ชื่อทางการค้า Promotor® บริษัท เอ.เอฟ.ซูเปอร์เซลล์ จำกัด สมบัติบางประการของสารกระตุ้นสารให้ฟอง ยูเรีย ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ เกรด STR 5L

สมบัติ	ค่าที่ได้
สิ่งสกปรก (%wt)	0.04
เถ้า (%wt)	0.40
ไนโตรเจน (%wt)	0.60
สารระเหย (%wt)	0.80
ความหนืดมูนิ [ML 1+4 (100 °C)]	88.3

หมายเหตุ: ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของยางรีเคลมเกรด UCD-105 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
การสกัดด้วย อะซิโตน (%wt)	17
เถ้า (%wt)	3
เขม่าดำ (%wt)	30
ปริมาณเนื้อยาง (%wt)	50
ความหนืดมูนิ [ML 1+4 (100 °C)]	50±15

หมายเหตุ: ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางเคมีบางประการของเส้นใยใบสับปรด (PALF) ที่ใช้ในงานวิจัย [56]

คุณสมบัติทางเคมี	ผลการทดสอบ (%)	มาตรฐานทดสอบ
1. Acid-insoluble lignin	7.82	TAPPI T 222 [57]
2. Acid-soluble lignin	2.61	TAPPI UM 250 [58]
3. Holocellulose	85.49	(Wise et al., 1946) [59]
4. Cellulose	57.19	(Updegraff, 1969) [60]

ตารางที่ 3.4 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
Gas yield (cm <sup>3</sup> /g)	210

หมายเหตุ: ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.5 สมบัติบางประการของ Urea ที่ใช้ในงานวิจัย

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

หมายเหตุ: ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90; Chareon Tut Co., Ltd.)
2. เครื่องผสมนืดเคอร์ (Kneader, รุ่น SK-6; Yong Fong Machinery Co., Ltd.)
3. เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill, รุ่น RM 200; Lab Tech Engineering Co., Ltd.)
4. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer, รุ่น SMV-201; Shimadzu Corporation.)
5. เครื่องวัดการเชื่อมโยงไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, รุ่น 2F-150; Nichigo Shoji Co., Ltd.)
6. เครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine, รุ่น MGLP-20AT; Match Group (1992) Co., Ltd.)
7. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder, รุ่น SE-75; Moriyama Mfg. Works, Ltd.)
8. เตาอบลมร้อน (Hot air oven, รุ่น 30-750; Memmert GmbH + Co. KG)
9. เครื่องฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, รุ่น IRTracer-100, Shimadzu Corporation)
10. เครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่างแบบอเนกประสงค์ (Universal sample cutter, รุ่น 6052; Instron Corporation)
11. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, รุ่น QC-536M1; Cometech Testing Machines Co., Ltd.)
12. เครื่องวัดความแข็งชอร์ซี (Shore C Hardness, รุ่น GS-751G; Teslock Co., Ltd.)
13. เครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter, รุ่น MH-300T; Merit Tech Co., Ltd.)
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, รุ่น LEO 1455VP; Carl Zeiss Co., Ltd.)
15. เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 สูตรที่ใช้การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)					
	ศึกษาปริมาณเส้นใย		ศึกษาปริมาณสารให้ฟอง		ศึกษา RPA และสมบัติการซึมผ่านน้ำ	
	WTF	PALF	WTF	PALF	WTF	PALF
ยางธรรมชาติ STR5L	50	50	50	50	-	-
ยางรีโคลม UCD 105	100	100	100	100	200	200
ผงยางรถยนต์ 30 เมช	150	150	150	150	150	150
มาสเตอร์แบทช์ เส้นใย 40 %wt	0, 15, 22.5, 30, 37.5, 45	0, 15, 22.5, 30, 37.5, 45	0, 15, 22.5, 30, 37.5, 45	0, 15, 22.5, 30, 37.5, 45	0, 22.5, 37.5	0, 22.5, 37.5
เขม่าดำ N550	-	-	-	-	40	40
DNPT:Urea	2:2	2:2	1:1, 2:2	1:1, 2:2	2:2	2:2
สารเติมแต่งอื่น ๆ : กรดสเตียริก 2, ซิงค์ออกไซด์ 5, น้ำมันแชนพทานิก 3, 6PPD 1, CBS 1, TMTD 0.5 และกำมะถัน 2.5						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 สูตรการผลิตท่อน้ำซีเมนต์

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)				
	C40D2F0	C40D2 WTF6	C40D2 WTF12	C40D2 PALF6	C40D2 PALF12
ยางรีเคลม UCD 105	200	200	200	200	200
ผงยางรถยนต์ 30 เมช	150	150	150	150	150
มาสเตอร์แบทช์ เส้นใย 40 %wt	0	22.5	37.5	22.5	37.5
เขม่าดำ N550	10	10	10	10	10
DNPT:Urea	2:2	2:2	2:2	2:2	2:2
สารเติมแต่งอื่น ๆ : กรดสเตียริก 2, ซิงค์ออกไซด์ 5, น้ำมันแวนทานิก 3, 6PPD 1, CBS 1, TMTD 0.5 และกำมะถัน 2.5					

หมายเหตุ C แทนเขม่าดำ  
WTF แทนเส้นใยขยะยางรถยนต์  
PALF แทนเส้นใยใบสับปะรด  
D แทนสารให้ฟอง DNPT

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย

##### 3.4.1.1 การเตรียมเส้นใยขยะยางรถยนต์ (WTF)

- นำเส้นใยขยะยางรถยนต์มาร้อนเส้นใยขนาดใหญ่และเศษผงยางออกด้วยตะแกรงขนาด 30 Mesh
- ชั่งน้ำหนักเส้นใยแล้วนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อกำจัดความชื้นจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก อบจนกว่าน้ำหนักเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลง
- เตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย 40 %wt โดยนำเส้นใยผสมกับยางธรรมชาติและสารเคมีต่าง ๆ เช่น PEG 3 %wt และ Mercapto silane 3 %wt ผสมด้วยเครื่องนวดที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.2 การเตรียมเส้นใยไบสัปประรด (PALF)

1. ชั่งน้ำหนักเส้นใยไบสัปประรดแล้วนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อกำจัดความชื้นจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนัก อบอุ่นกว่าน้ำหนักเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลง

2. เตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใย 40 %wt โดยนำเส้นใยผสมกับยางธรรมชาติ และ สารเคมีต่าง ๆ เช่น PEG 3 %wt และ Mercapto silane 3 %wt ผสมด้วยเครื่องนิตเตอร์ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที

หมายเหตุ : การเตรียมมาสเตอร์แบทช์เส้นใยในการผลิตท่อน้ำซึม ใช้ยางรีเคลมแทนยางธรรมชาติ

### 3.4.2 การผสมสูตรยาง

1. ชั่งยางและสารเคมี ตามตารางที่ 3.6
2. ทำการบดยางรีเคลมและยางธรรมชาติด้วยเครื่องผสมนิตเตอร์เป็นเวลา 2 นาที ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 70°C เติมผงยางรถยนต์ครึ่งละประมาณ 1 ใน 4 ของทั้งหมดสลับกับน้ำมันเนฟทานิก (ใช้เวลาประมาณ 6 นาที)
3. ใส่มาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 เติม Stearic acid และ ZnO (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติม 6PPD, CBS และ TMTD (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)
4. เติม DNPT และยูเรีย (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติมกำมะถัน (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที) แล้วรีดยางให้เป็นแผ่น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืนก่อนนำไปใช้งาน

### 3.4.3 การขึ้นรูปชิ้นงานและเวลาการเชื่อมโยง

ชั่งยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.6 โดยทำการผสมยางตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4.2 โดยมีการขึ้นรูปชิ้นงาน 2 วิธี คือ การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ และการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว

1. การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ นำยางผสมสูตรมารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งให้มีความหนาประมาณ 4 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอัดในแม่พิมพ์ 4 เหลี่ยม ขนาด 150 x 150 x 4 mm<sup>3</sup> ที่อุณหภูมิ 60°C โดยทำการอัดซ้ำ 5 ครั้ง แล้วนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

2. การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว นำยางผสมสูตรที่ตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 5 cm ใส่เข้าไปในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวโดยมีอุณหภูมิของสกรู (Screw) กระบอกลใส่สกรู (Barrel) และอุณหภูมิของตาย (Die) 60°C ปรับความเร็วสกรู (Screw speed) 30 รอบต่อนาที ยางที่ออกจากตายจะมีลักษณะเป็นท่อ โดยมีรายละเอียดของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวดังนี้

- ความยาว : เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L:D) = 12:1
- เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diametrical screw clearance) = 0.13-0.20 mm
- ดาย (Die) มีลักษณะเป็นวงกลม 2 อันซ้อนกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 และ 18 mm

เมื่อได้ท่ออย่างน้ำซึมจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเรียบร้อยแล้วทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

### 3.4.4 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่ออย่างน้ำซึม

#### 3.4.4.1 ผลของปริมาณเส้นใยขยะยางรถยนต์และเส้นใยใบสับปะรด

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน GTR:NR:RR เท่ากับ 60:20:20, สารให้ฟอง DNPT 2 phr และเส้นใยขยะยางรถยนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 phr และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สัมฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึม

หมายเหตุ : ผลของเส้นใยใบสับปะรด ขั้นตอนการผสมเปลี่ยนจากเส้นใยขยะยางรถยนต์เป็นเส้นใยใบสับปะรด

#### 3.4.4.2 ผลของปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำ

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน GTR:NR:RR เท่ากับ 60:20:20, เส้นใยขยะยางรถยนต์ปริมาณ 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 phr และปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่แตกต่างกัน คือ 1 และ 2 phr และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สัมฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึม

หมายเหตุ : ผลของเส้นใยใบสับปะรด ขั้นตอนการผสมเปลี่ยนจากเส้นใยขยะยางรถยนต์เป็นเส้นใยใบสับปะรด

#### 3.4.4.3 การศึกษาสมบัติการไหลพลวัตของยาง (RPA)

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน GTR:RR เท่ากับ 60:40 โดยควบคุมปริมาณสารให้ฟอง 2 phr และเคมีดำ 40 phr และเส้นใยขยะยางรถยนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 6 และ 12 phr และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.6 ด้วยเครื่องเครื่องฉีดเอ็กสตรูชันนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติการไหลและวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic properties) ในโหมด Frequency sweep และ Strain sweep

หมายเหตุ : ผลของเส้นใยใบสับปะรด ขั้นตอนการผสมเปลี่ยนจากเส้นใยขยะยางรถยนต์เป็นเส้นใยใบสับปะรด

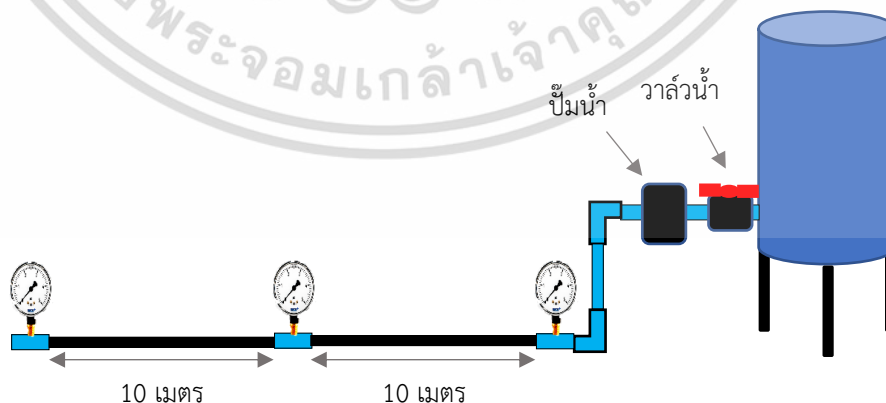
#### 3.4.4.4 การเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำและการทนความดันสูงสุดของท่ออย่างน้ำซึม

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน GTR:RR เท่ากับ 60:40 โดยควบคุมปริมาณสารให้ฟอง 2 phr และเคมีดำ 40 phr และเส้นใยขยะยางรถยนต์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 6 และ 12 phr และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.7 ด้วยเครื่องนิตเตอร์ และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นนำชิ้นงานเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ และการทดสอบความดันสูงสุดของท่ออย่างน้ำซึม

#### 3.4.4.5 ผลของความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อและผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

นำท่ออย่างน้ำซึมจากหัวข้อ 3.4.4.4 มาทดสอบความดันท่ออย่างน้ำซึมที่ความยาว 20 เมตร โดยวัดความดันที่ตำแหน่งต่าง ๆ เช่น ก่อนเข้าท่อน้ำซึม 10 และ 20 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 พร้อมทั้งวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันแตกต่างกัน 0.6 และ 1.2 bar



รูปที่ 3.3 การทดสอบความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อและผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 การทดสอบและวิเคราะห์

#### 3.4.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของเส้นใย

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใย วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบเส้นใย ด้วยเครื่องฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectrophotometer, FTIR) แบบ ATR-FTIR ในช่วงเลขคลื่น  $700\text{ cm}^{-1}$  ถึง  $4000\text{ cm}^{-1}$

#### 3.4.5.2 การทดสอบความเหนียว

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D1646 [61] วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบยางผสมสูตรด้วยเครื่องวัดความเหนียว (Mooney viscometer) โดยใช้จานหมุนขนาดใหญ่ (L) ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$  เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 4 นาที [ML 1+4 ( $100^{\circ}\text{C}$ )]

#### 3.4.5.3 การทดสอบความหนาแน่น

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนแล้ว ให้ได้ขนาดประมาณ  $10 \times 10 \times 4\text{ mm}^3$  ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น (Densimeter) จำนวน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่น

#### 3.4.5.4 การทดสอบสมบัติรับแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D412 [62] การเตรียมชิ้นงานทดสอบทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงแล้วให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะ Die C เป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ซึ่งกำหนดสถานะในการทดสอบดังนี้

ระยะทดสอบ (Gauge length) 25 mm

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed) 500 mm/min

โหลดเซลล์ (Load cell) 1 kN

ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบขาด

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะเริ่มต้น ( $\text{mm}^2$ )

$$10\% \text{ Modulus} = F/A \quad (3.2)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบยืด 10%

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะเริ่มต้น ( $\text{mm}^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$100\% \text{ Modulus} = F/A \quad (3.3)$$

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

$$\text{Elongation at break (\%)} = 100 \times ((L-L_0) / L_0) \quad (3.4)$$

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

### 3.4.5.5 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D624 [63] การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงแล้วให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็น Die C เป็นรูปปีกนก ซึ่งกำหนดสภาวะในการทดสอบดังนี้

โหลดเซลล์ (Load cell) 1 kN

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed) 0.5 m/min

ค่าความแข็งแรงฉีกขาดสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$T_s = F/d \quad (3.5)$$

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

### 3.4.5.6 การทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240 [64] วิธีการทดสอบ ทดสอบด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ C (Shore C durometer) โดยชิ้นงานทดสอบความแข็งกดจำนวน 5 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) วางซ้อนกันบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานข้างล่างให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 15 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด ค่าที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 5 ครั้ง

### 3.4.5.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่มีการเชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก นำชิ้นงานทดสอบแช่ไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 10 นาที หักชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานเรียบ ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบได้ชัดเจน วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่าง และการกระจายตัวของรูพรุน

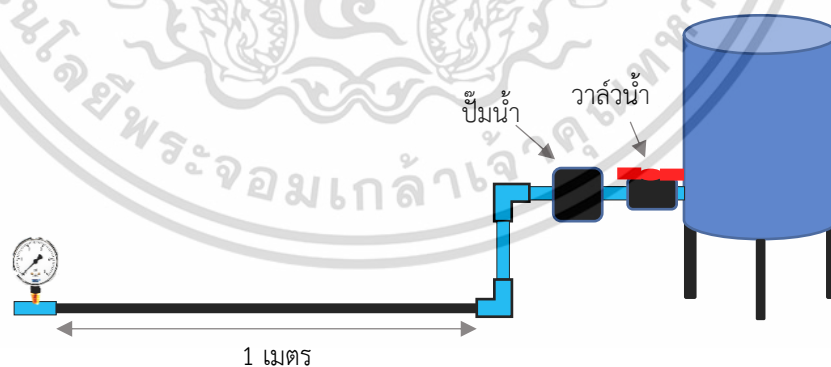
#### 3.4.5.8 การทดสอบพลวัตของยาง

วิธีการทดสอบทำการทดสอบยางผสมสูตรด้วยเครื่องทดสอบสมบัติพลวัตของยาง (Rubber process analyzer, RPA) ที่อุณหภูมิ 60°C เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 2 นาที ใช้น้ำหนักยางคอมปาวด์ประมาณ 0.1 กรัม ด้วยโหมด Frequency sweep 0.5-50 Hz ที่ความเครียด 0.5% และโหมด Strain sweep 0.1-1000% ที่ความถี่ 0.5 Hz เพื่อศึกษาสมบัติการไหลและวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic properties)

#### 3.4.5.9 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ

วิธีการทดสอบตัวอย่างแผ่นยางน้ำซึม สุ่มเลือกตัวอย่างจำนวน 3 แผ่น ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) โดยติดตั้งเกจวัดความดัน (Pressure gauge) ที่เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านน้ำ ที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 bar โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งตัวอย่างแผ่นยางน้ำซึมมีลักษณะเป็นวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 cm รายงานผลในรูปของปริมาณการซึมผ่านของน้ำต่อพื้นที่ของแผ่นยางต่อเวลา ( $\text{L}/\text{m}^2/\text{h}$ )

วิธีการทดสอบตัวอย่างท่อยางน้ำซึม ทำการสุ่มตัดท่อที่มีความยาว 1 เมตร จำนวน 3 เส้น ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ โดยติดตั้งเกจวัดความดันเพื่อทดสอบที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.6, 0.8, 1.2, 1.4, 1.6 และ 1.8 bar โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที รายงานผลในรูปของปริมาณการซึมผ่านของน้ำต่อความยาวท่อต่อเวลา ( $\text{L}/\text{m}/\text{h}$ ) แสดงวิธีการทดสอบดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อยางน้ำซึม

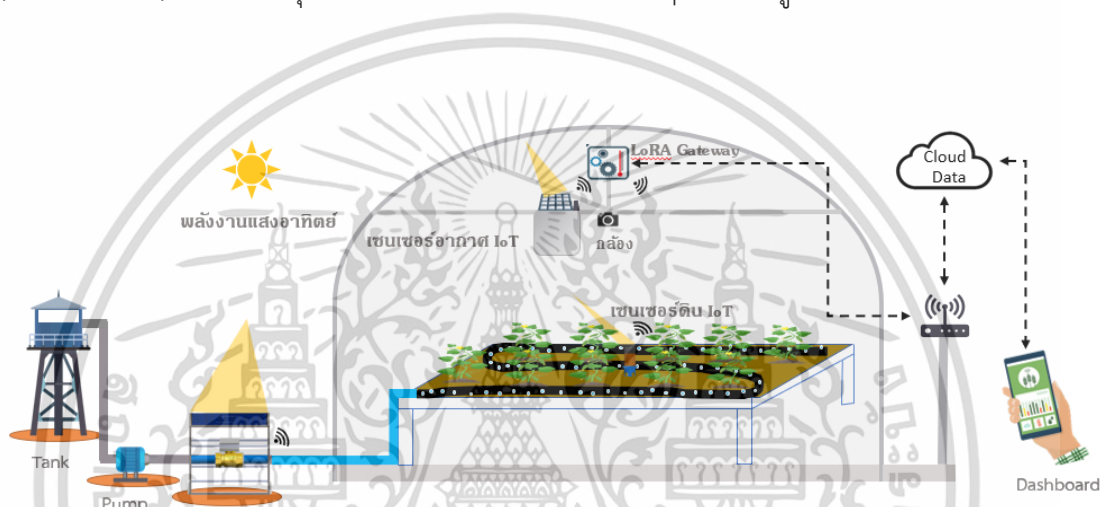
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5.10 การทดสอบความดันระเบิด (Burst pressure test)

วิธีการทดสอบทำการสูบลมอัดท่อยางน้ำซีมที่มีความยาว 1 เมตร จำนวน 3 เส้น ทดสอบความดันระเบิด เปิดปั้มน้ำเพื่ออัดน้ำเข้าไปในท่อยางน้ำซีม โดยความดันจะถูกเพิ่มขึ้นจนท่อยางน้ำซีมระเบิด รายงานผลในรูปของความดันสูงสุด (bar) ก่อนท่อยางน้ำซีมระเบิด

### 3.4.5.11 การทดลองสาธิตการใช้งานจริงร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะ

1. เตรียมโต๊ะแปลงเพาะปลูก (ขนาด 1.2x2.4 ตารางเมตร) ในโรงเรือน (Greenhouse) และติดตั้งอุปกรณ์ระบบเกษตรอัจฉริยะต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังแปลงสาธิตการใช้งานจริงร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะ

2. เพาะต้นกล้าผักสลัดเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตให้เท่า ๆ กัน



รูปที่ 3.6 การเพาะต้นกล้าในถาดหลุม a) กรีนโอ๊ค (Green oak) และ b) เรดโอ๊ค (Red oak)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำต้นกล้าที่เพาะไว้ย้ายลงแปลง ทำการให้น้ำ โดยสังการผ่านเว็บไซต์ [skmfarm.com](http://skmfarm.com) จนกระทั่งต้นผักสลัดเจริญเต็มที่พร้อมเก็บเกี่ยว (ประมาณ 30-40 วัน)



รูปที่ 3.7 ต้นกล้าในแปลงเพาะปลูกในโรงเรือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ผลิตท่ออย่างน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ (GTR) ยางรีเคลม (RR) และเสริมแรงด้วยเส้นใย นวัตกรรมนี้เป็นการใช้ประโยชน์จากขยะยางรถยนต์ใช้แล้ว นำกลับมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า (Upcycling) และตอบโจทย์เกษตรกรอัจฉริยะ ที่มีความต้องการใช้อุปกรณ์ให้น้ำแบบแม่นยำ เพื่อการ ปลูกพืชและใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังมีการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการแปรรูปเกษตร โดยนำใบสับปะรดมาแปรรูปเป็นเส้นใยใบสับปะรด (PALF) เพื่อใช้ในการเสริมแรงกับท่ออย่าง ใน งานวิจัยนี้เน้นศึกษาประสิทธิภาพการเสริมแรงของเส้นใยในท่ออย่างน้ำซึม เพื่อลดการบวมตัวของท่อ ให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมีค่าคงที่เมื่อเพิ่มความดันน้ำ ทนต่อแรงดันน้ำทั่วไปและลดต้นทุนในการ ผลิต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพและปริมาณระหว่างเส้นใยขยะยางรถยนต์ (WTF) และเส้นใยใบสับปะรด (PALF) โดยแบ่งขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณเส้นใยขยะยางรถยนต์และเส้นใยใบสับปะรด

ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำ

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติการไหลแบบพลวัต (RPA) และอัตราการซึมผ่านน้ำของท่ออย่างน้ำซึม

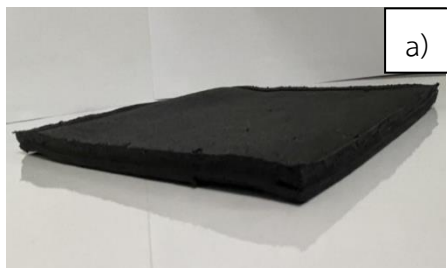
ตอนที่ 4 การทดลองสาธิตการใช้งานจริงของท่ออย่างน้ำซึม

ตอนที่ 5 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและสรุปสูตรที่เหมาะสมของท่ออย่างน้ำซึม

ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมตัวอย่าง 2 ลักษณะ คือ

1. การเตรียมตัวอย่างเป็นแผ่นยางน้ำซึม (Porous rubber sheet) แบบจำลอง (Model study) ด้วยเครื่องอัดแบบเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 150x150x4 mm แสดงดังรูปที่ 4.1(a) เพื่อใช้ ศึกษาในตอนที่ 1 และ 2

2. การเตรียมตัวอย่างเป็นท่ออย่างน้ำซึม (Porous rubber pipe) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียว หนอนเดี่ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 18.0±1 mm ความหนา 3.0±0.5 mm แสดงดังรูปที่ 4.1(b) เพื่อใช้ศึกษาในตอนที่ 3 และ 4 โดยเลือกเฉพาะสูตรที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ a) แผ่นยางน้ำซึม และ b) ท่ออย่างน้ำซึม

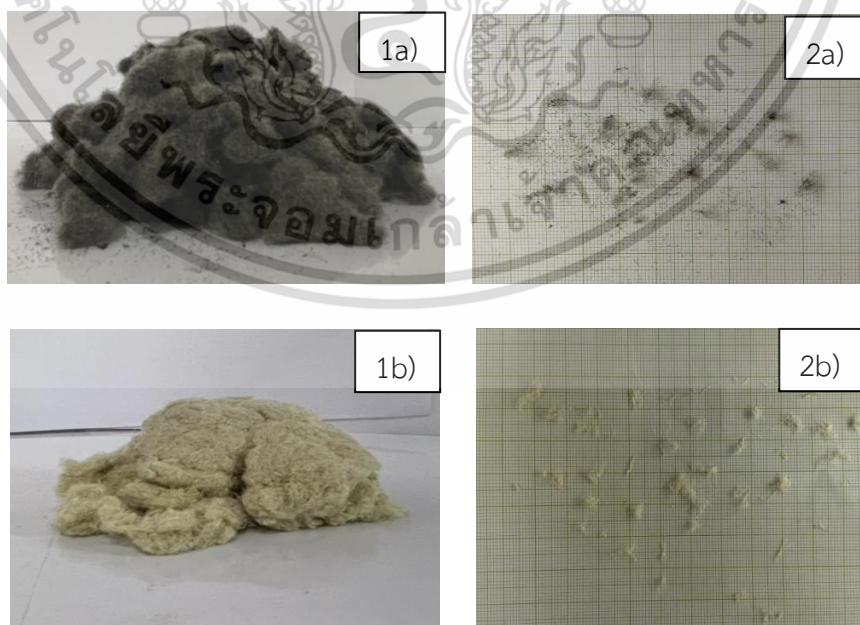
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสัณฐานวิทยา เพื่อวิเคราะห์ผลโดยเลือกสูตรที่น่าสนใจนำมาขึ้นรูปท่อน้ำซีเมนต์เพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ และเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อน้ำซีเมนต์ โดยสูตรการขึ้นรูปขึ้นงานมีตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบสมบัติ ได้แก่ เชม่าดำ : C, เส้นใยขะยะยางรถยนต์ : WTF, เส้นใยใบสับปะรด : PALF และสารให้ฟอง : D ตัวอย่าง เช่น C30WTF6D2 เท่ากับมีเชม่าดำ 30 phr เส้นใยขะยะยางรถยนต์ 6 phr และสารให้ฟอง 2 phr ตามลำดับ

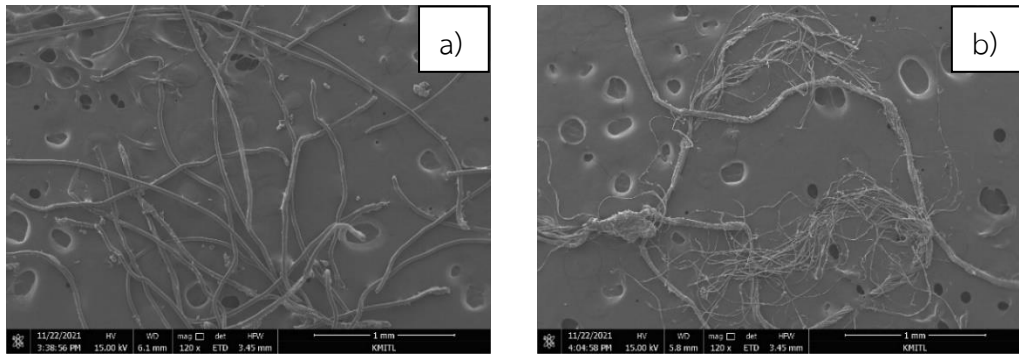
#### 4.1 การเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของเส้นใย โดยขึ้นรูปเป็นแผ่นยางน้ำซีเมนต์

งานวิจัยนี้นำเส้นใยสั้น (Short fibers) มาใช้เพื่อเสริมแรงให้กับท่อน้ำซีเมนต์ โดยเส้นใยที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบมี 2 ชนิดคือ เส้นใยขะยะยางรถยนต์ (WTF) (รูปที่ 4.2a) มีความยาวประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และความกว้าง 0.014-0.017 มิลลิเมตร [18] มีลักษณะโค้งงอ มีเศษผงยางปนเปื้อนเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยนี้ได้จากกระบวนการผลิตยางรีเคลมจากขะยะยางรถยนต์ (จากบริษัท ยูเนี่ยนพัฒนา จำกัด) แสดงดังรูป SEM ที่ 4.3a ส่วนเส้นใยใบสับปะรด (PALF) (รูปที่ 4.2b) มีความยาวประมาณ 6 มิลลิเมตร และความกว้าง 0.005-0.194 มิลลิเมตร [60] เส้นใยมีความสะอาด ไม่พบเศษผงปนเปื้อน เนื่องจากเป็นเส้นใยที่ได้จากกระบวนการบดเชิงกล (ได้รับความเอื้อเฟื้อจาก มหาวิทยาลัยมหิดล) มีลักษณะมัดเส้นใยติดกันแน่นด้วยสารประสาน (Cement component) เช่น ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส [52] แสดงดังรูป SEM ที่ 4.3b เมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของเส้นใย WTF และ PALF โดยใช้เทคนิค ATR-FTIR แสดงสเปกตรัมดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ และสรุปพิกัดที่สำคัญดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

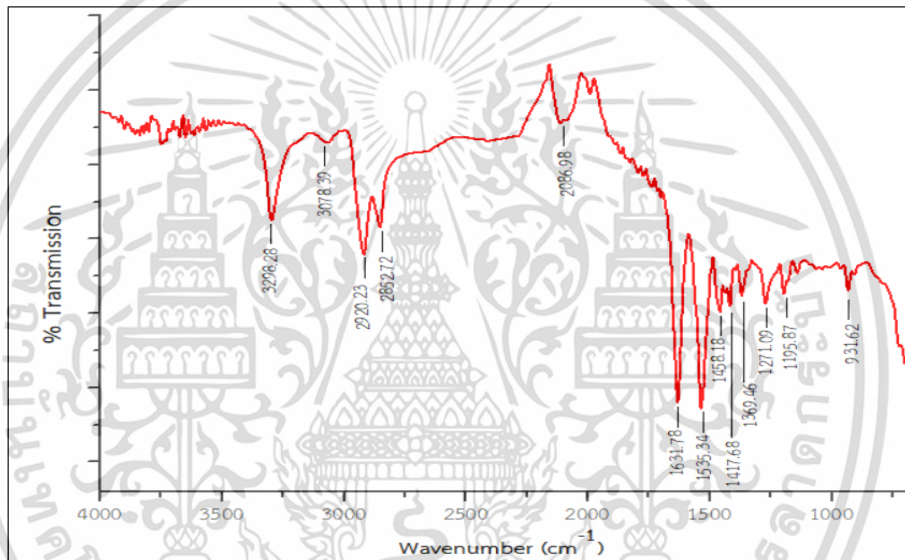


รูปที่ 4.2 เส้นใยที่ใช้ในงานวิจัย a) WTF และ b) PALF

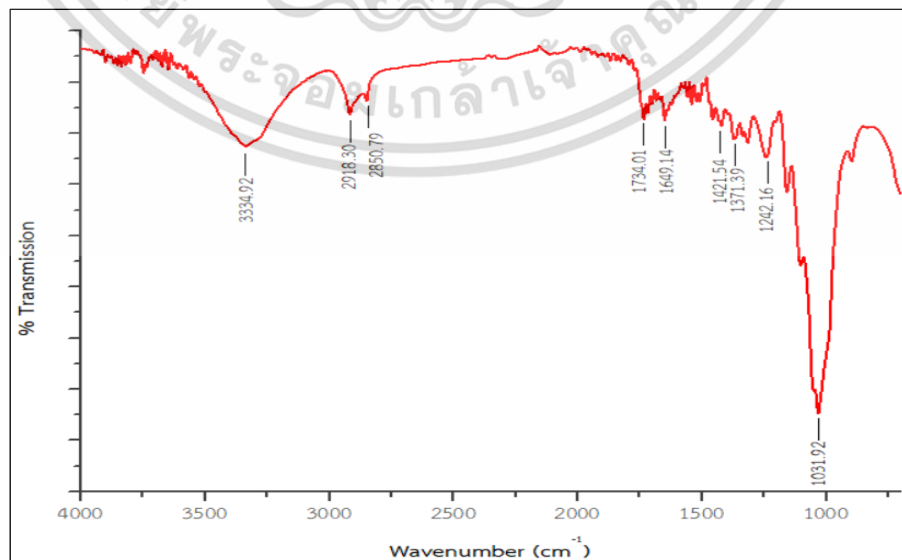
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 SEM Micrograph แสดงลักษณะพื้นผิวของเส้นใยที่กำลังขยาย 120 เท่า a) WTF และ b) PALF



รูปที่ 4.4 กราฟ FT-IR ของ WTF



รูปที่ 4.5 กราฟ FT-IR ของ PALF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พิกัด FTIR จากการตรวจวิเคราะห์เส้นใย WTF [65]

เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	พันธะที่สั่น
3298, 3078	พันธะ -NH (stretching)
2920, 2852	พันธะ C-H (stretching) ในหมู่ ethylene
1632	พันธะ C=O (stretching) (Amide I)
1535	พันธะ N-H (bending) และ C-N (stretching) (Amide II)

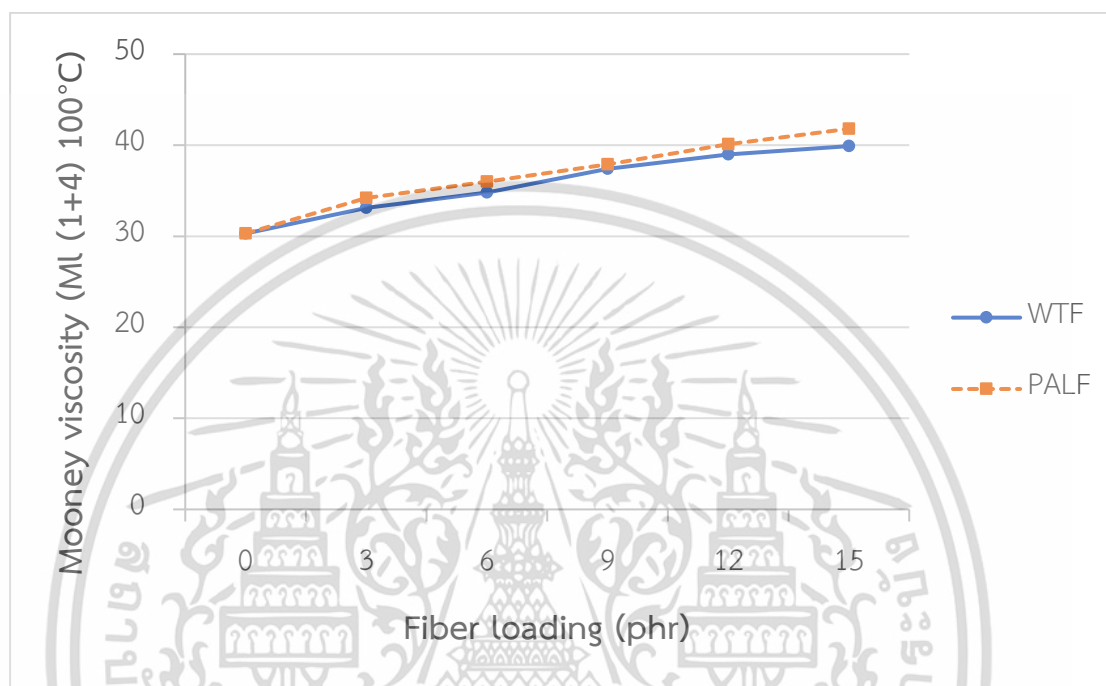
ตารางที่ 4.2 พิกัด FTIR จากการตรวจวิเคราะห์เส้นใย PALF [52, 66-67]

เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	พันธะที่สั่น	องค์ประกอบ
3335, 3292	พันธะ -OH (stretching)	เซลลูโลส
2918, 2851	พันธะ C-H (stretching) ในหมู่ methyl และ methylene	เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส
1734	พันธะ C=O (stretching) ในหมู่ acetyl	เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน
1646	พันธะ -OH (bending) ของน้ำที่ถูกดูดซึมในเฮมิเซลลูโลส	น้ำและเฮมิเซลลูโลส
1422	พันธะ O-CH <sub>3</sub> ของ Methoxyl-O-CH <sub>3</sub>	ลิกนิน
1371	พันธะ C-OH (stretching) บนระนาบเดียวกัน	เซลลูโลส
1242	พันธะ C-O (stretching)	เฮมิเซลลูโลส

จากการใช้เส้นใยเสริมแรงให้กับสูตรยางท่อน้ำซึม พบว่าค่าความหนืดมูนี้ของยางคอมปาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6 อย่างที่ทราบกันว่า เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม (Filler) ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งในวัสดุพอลิเมอร์ จะทำให้วัสดุขณะหลอมไหลมีความหนืดเพิ่มขึ้น [68] ในงานวิจัยนี้ใช้เส้นใยสั้น WTF และ PALF เป็นสารเสริมแรงซึ่งเป็นของแข็งชนิดหนึ่งที่สามารถเกี่ยวพันกันเองได้และมีการยึดเกาะที่ดีกับโมเลกุลยาง (ยืนยันจากผลการทดลองสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาภายหลัง) ทั้งนี้เส้นใยมีความแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับยางจะต้านการไหลหรือเคลื่อนที่ผ่านกันของสายโซ่โมเลกุลของยางจึงทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้คล้ายกับงานวิจัยของ Meissner N. and Rzymiski W. [69] ที่พบว่ายางคอมปาวด์ที่มีการเพิ่มปริมาณเส้นใย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

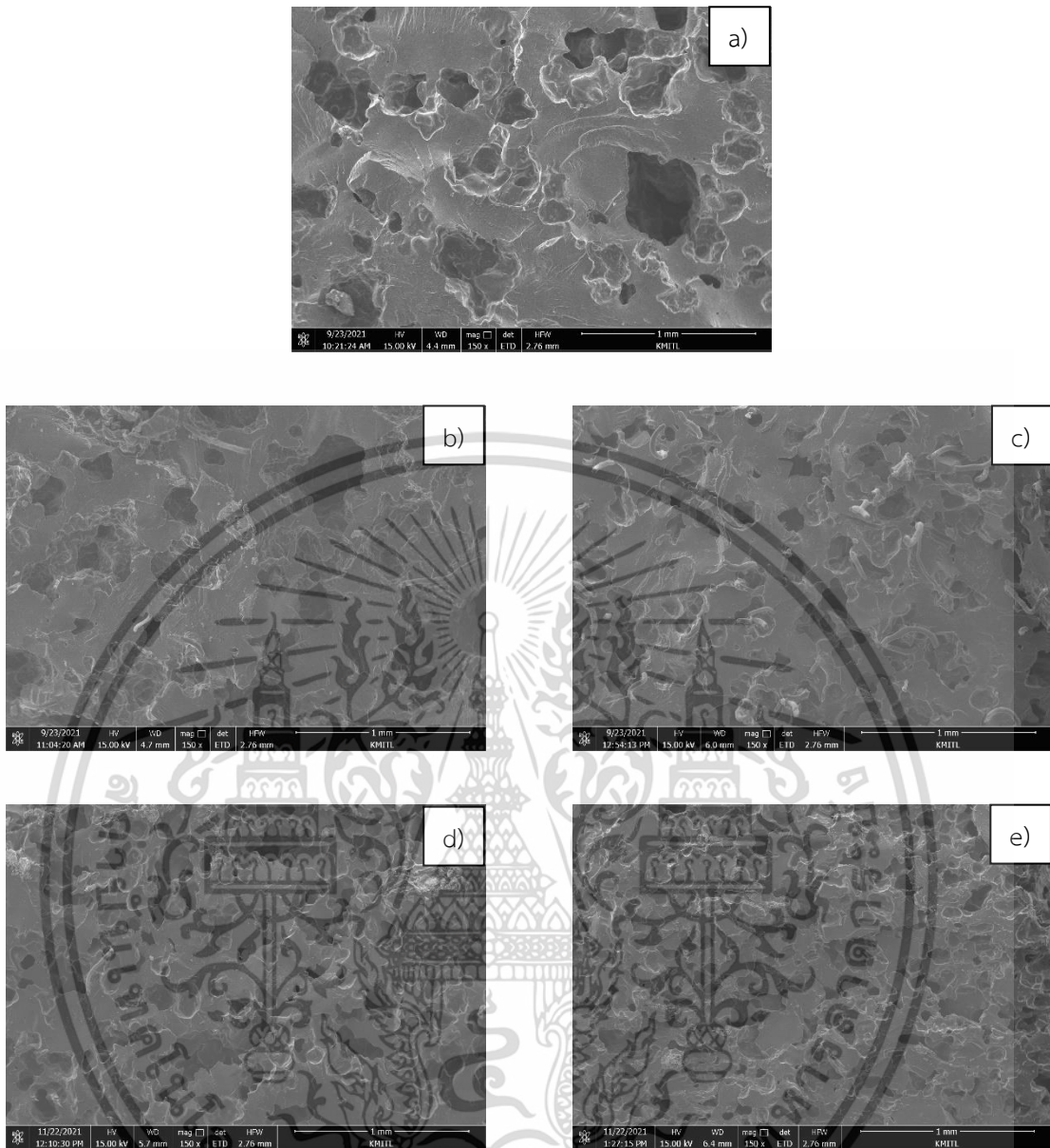
ทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อสารตัวเติมรวมอยู่ในเมทริกซ์มากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง ส่งผลให้ยางคอมปาวด์มีความแข็ง (Stiff) มากขึ้น และยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF (เส้นประ) มีความหนืดเพิ่มขึ้นมากกว่ายางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF (เส้นทึบ) เล็กน้อย



รูปที่ 4.6 ค่าความหนืดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรไม่มีเส้นใยเสริมแรงและยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วยเส้นใย WTF และ PALF แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่ายางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีขนาดรูพรุนเล็กกว่ายางผสมสูตรที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรง เนื่องจากเส้นใยทำให้ความหนืดในระบบเพิ่มขึ้น (ยืนยันจากค่าความหนืด) ฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เมื่อได้รับความร้อนจึงสามารถขยายตัวได้น้อยกว่า ทั้งนี้เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ทำให้อย่างผสมสูตรมีขนาดรูพรุนเล็กลงเนื่องจากเส้นใยทำให้ความหนืดของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้น ทำให้ขัดขวางการขยายฟองอากาศจากการสลายตัวของสารให้ฟอง ส่งผลให้ขนาดของเซลล์ฟองในยางผสมสูตรมีขนาดเล็ก [70] เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเส้นใย พบว่ายางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF (รูปที่ 4.7b) และ 4.7c) มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่ายางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF (รูปที่ 4.7d) และ 4.7e) เนื่องจากเส้นใย WTF มีความแข็งน้อยกว่าเส้นใย PALF [19,71] ทำให้อย่างผสมสูตรมีความหนืดต่ำกว่า ส่งผลให้ขนาดของเซลล์ฟองในยางผสมสูตรมีขนาดใหญ่กว่ายางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

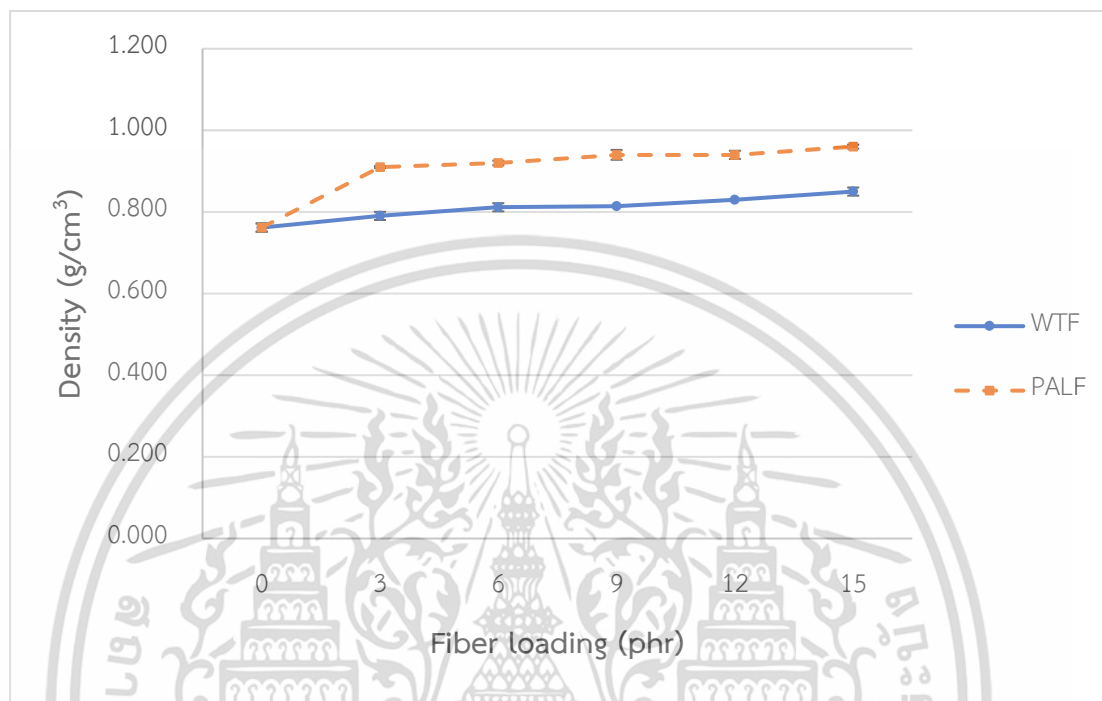


รูปที่ 4.7 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย a) ไม่มีเส้นใย

b) WTF 3 phr c) WTF 12 phr d) PALF 3 phr และ e) PALF 12 phr แตกหักที่อุณหภูมิต่ำที่กำลังขยาย 150 เท่า

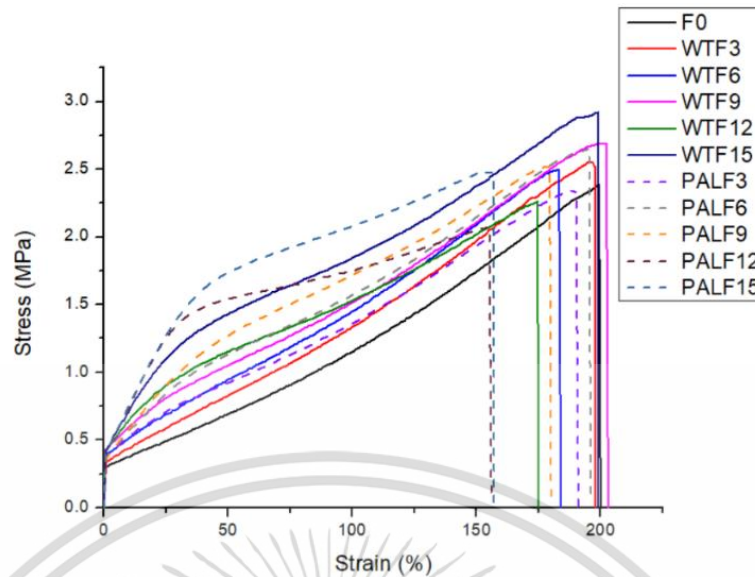
จากการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรเมื่อใช้เส้นใย WTF และ PALF พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใย WTF และ PALF มีค่าความหนาแน่น  $1.14 \text{ g/cm}^3$  [18] และ  $1.44 \text{ g/cm}^3$  [72] ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าความหนาแน่นของยางผสมสูตร ( $0.76 \text{ g/cm}^3$ ) ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้ความหนาแน่นของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้นด้วย [70] นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเส้นใย พบว่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF (เส้นประ) มีค่ามากกว่ายางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF (เส้นทึบ) แสดงดังรูปที่ 4.8 อาจเนื่องมาจากยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF มีความหนืดมากกว่า ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนน้อยกว่าอย่างผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF (ยืนยันจากผลการทดลองสัณฐานวิทยา) อีกทั้งเส้นใย PALF มีค่าความหนาแน่น  $1.44 \text{ g/cm}^3$  [72] ซึ่งมากกว่าเส้นใย WTF ที่มีค่าความหนาแน่น  $1.14 \text{ g/cm}^3$  [18]



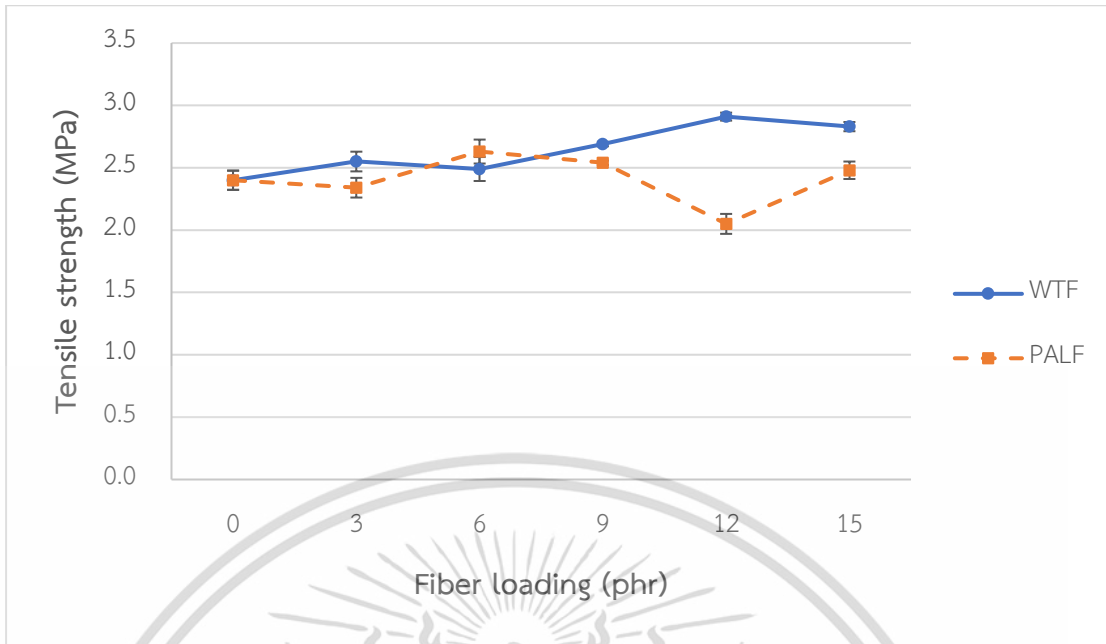
รูปที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF และ PALF พบว่าเส้นใยมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรอย่างชัดเจน แสดงผลโดยกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-strain) ดังรูปที่ 4.9 โดยเฉพาะที่บริเวณความเครียดต่ำกว่า 20% ในขณะที่ความเครียดสูงกว่า 20% เส้นใยมีผลต่อความเค้นน้อยลง เนื่องจากเส้นใยมีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำ (เส้นใย WTF และ PALF มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด 19 [73] และ 2 [19] ตามลำดับ) เมื่อยางผสมสูตรถูกทำให้เปลี่ยนขนาดมาก เส้นใยอาจหลุดออกจากยาง [34] และจากการศึกษาปริมาณเส้นใย พบว่าเมื่อปริมาณ WTF (เส้นทึบ) และ PALF (เส้นประ) มากขึ้น ทำให้ความชันของกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเส้นใยมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง สามารถเสริมแรงให้กับยางผสมสูตรมากขึ้น [74] อย่างไรก็ตามยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF มีความชันของกราฟสูงกว่ายางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF เนื่องจากเส้นใย PALF มีค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ประมาณ 34.5-82.5 GPa [19] ซึ่งมากกว่าเส้นใย WTF ที่มีค่ามอดุลัสของยังประมาณ 2.18 GPa [71]

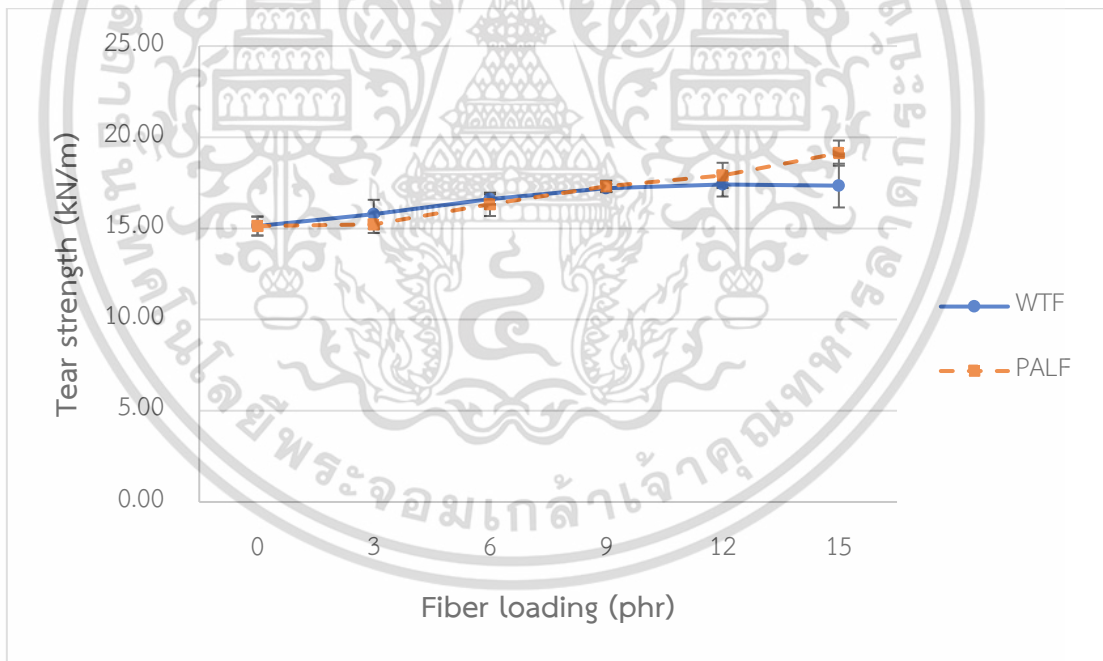


รูปที่ 4.9 กราฟความเค้น-ความเครียดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

จากการศึกษา WTF และ PALF เพื่อดูอิทธิพลของการเสริมแรงที่มีต่อสมบัติเชิงกล พบว่าสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรที่มีเส้นใยเสริมแรงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด แสดงดังรูปที่ 4.10-4.12 เพราะยางสามารถรับและกระจายแรงมาที่เส้นใย อย่างไรก็ตามอิทธิพลของเส้นใยเสริมแรงไม่เด่นชัด เนื่องจากในงานวิจัยนี้ชิ้นงานเป็นวัสดุมีรูพรุนจากสารให้ฟอง ซึ่งรูพรุนคือจุดบกพร่อง (Defect) ของชิ้นงานที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล นอกจากนี้แผ่นยางน้ำซึมขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding) คาดว่าเส้นใยเส้นมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (Random orientation) จึงทำให้เห็นประสิทธิภาพการเสริมแรงของเส้นใยไม่สูงเท่าที่ควร เมื่อศึกษาชนิดของเส้นใย พบว่ายางผสมสูตร WTF (เส้นทึบ) มีค่าสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับยางผสมสูตร PALF (เส้นประ)

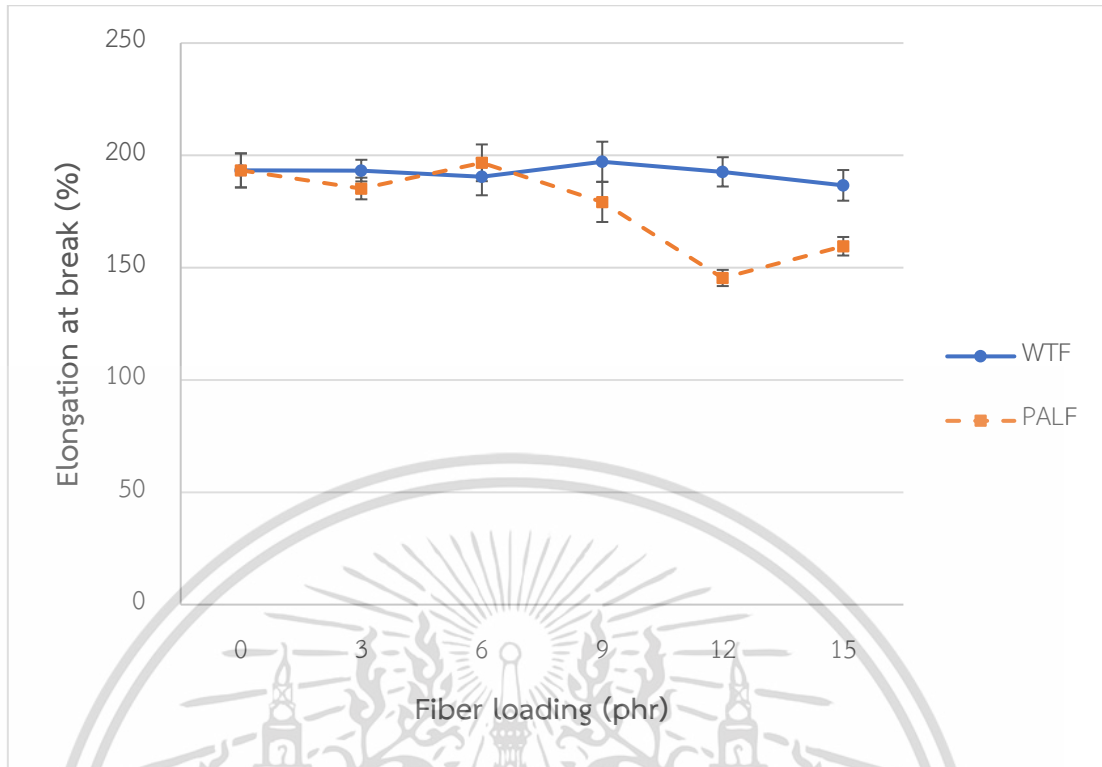


รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่ต่างกัน



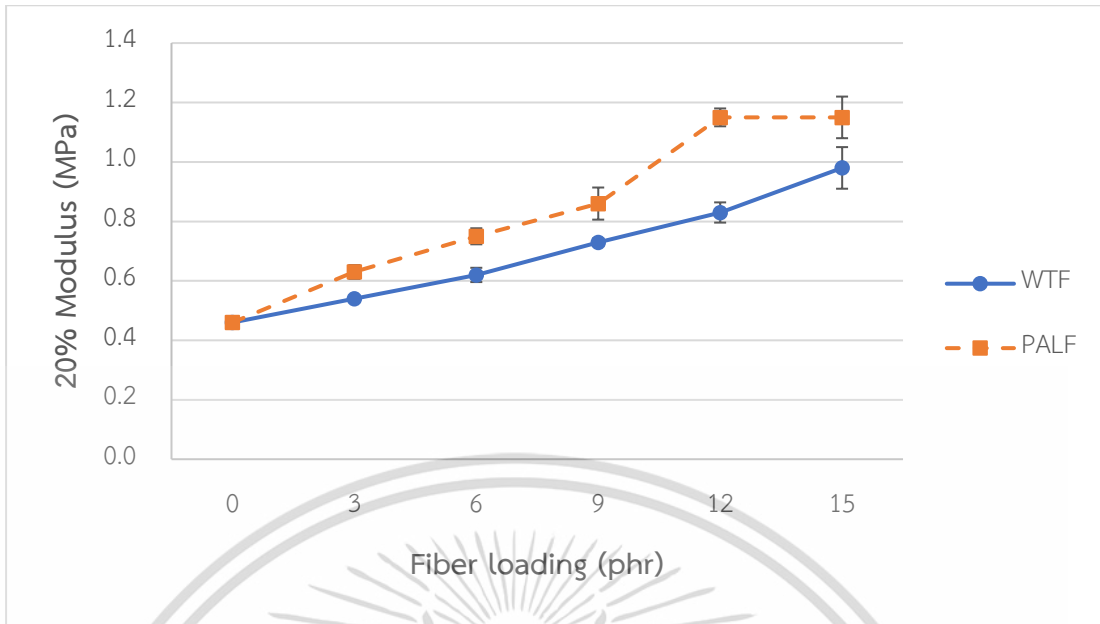
รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

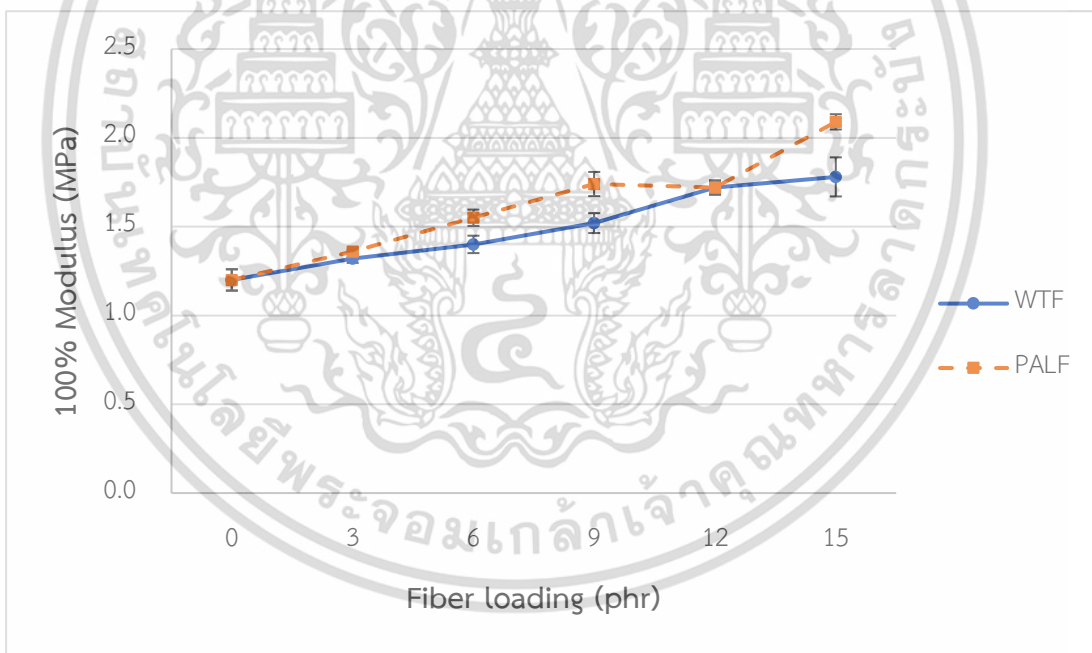


รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาการใช้เส้นใยเสริมแรงให้กับวัสดุ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้ค่ามอดุลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด (Modulus at 20% strain, M20) และมอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด (Modulus at 100% strain, M100) เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่ใส่ไปในยางผสมสูตรนั้นทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงที่มีความแข็งและมอดุลัสสูงกว่ายาง สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดได้น้อยกว่าเมทริกซ์ยาง แสดงดังรูปที่ 4.13-4.15 ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Wisittanawat U. และคณะ [50] ที่ทำการศึกษสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตยาง NBR เสริมแรงด้วยเส้นใย PALF ผลการทดลองพบว่า ค่า M20 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น อย่างไรก็ตามวัสดุที่เสริมแรงด้วย PALF (เส้นประ) มีประสิทธิภาพการเสริมแรงที่สูงกว่า WTF (เส้นทึบ) เล็กน้อย เนื่องจาก PALF มีค่ามอดุลัสมากกว่า เป็นผลให้ด้านการเปลี่ยนรูปของยางผสมสูตรได้มากกว่า WTF

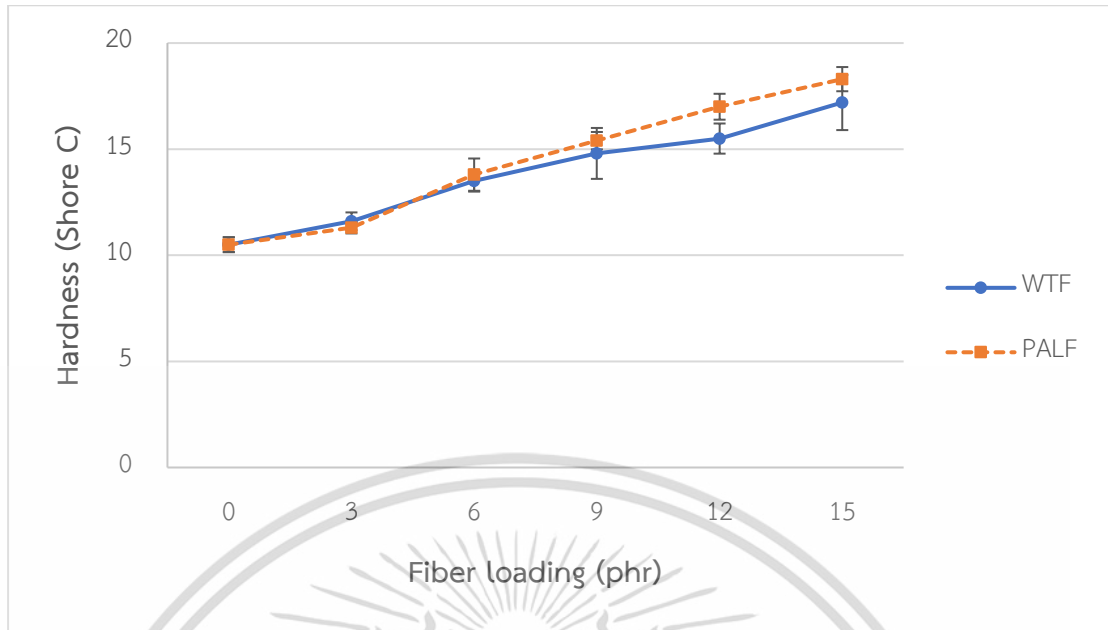


รูปที่ 4.13 ค่ามอดุลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน



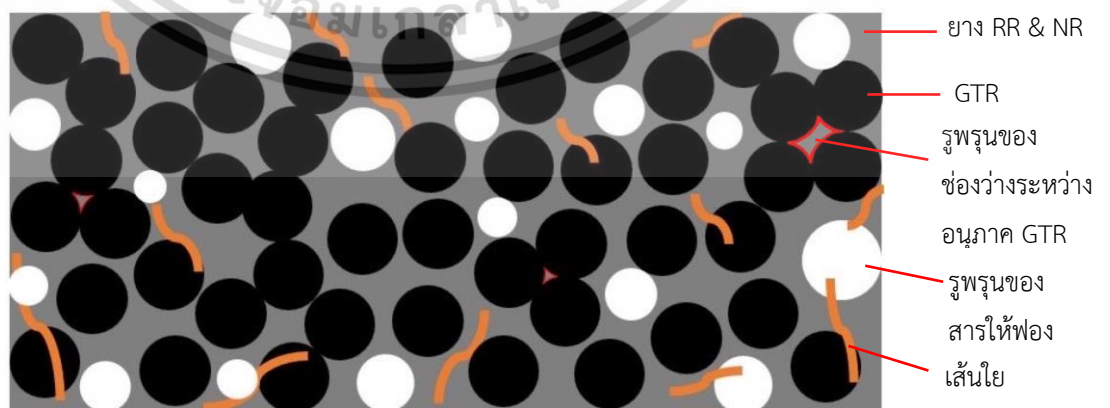
รูปที่ 4.14 ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M100) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยที่แตกต่างกัน

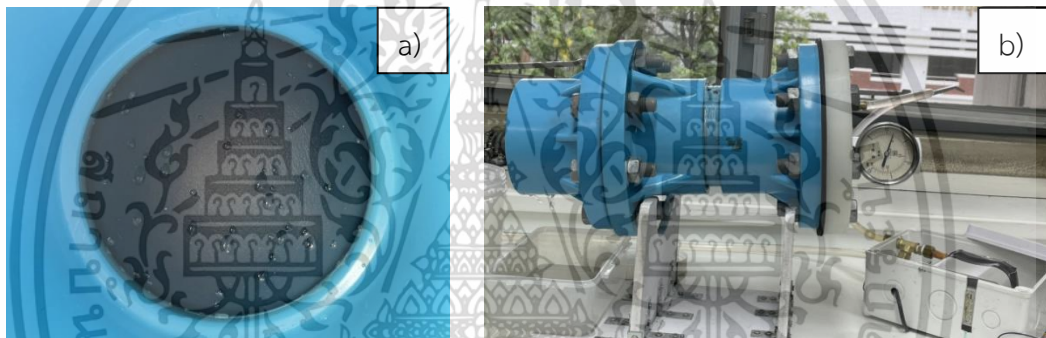
การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ วัดจากปริมาณน้ำที่ไหลออกมาตามรูพรุนของชิ้นงาน เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำระบบสถานะการให้ความร้อนเพื่อเชื่อมโยงตัวอย่างยางเป็นระบบเปิด (Open system) ซึ่งในระบบประกอบด้วยผงยาง 58% เนื้อยาง 39% เส้นใยประมาณ 2% และสารให้ฟอง 1% แสดง Model ดังรูปที่ 4.16 สาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่างแบบต่อเนื่องและน้ำไหลซึม เกิดจากรูพรุนจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT, รูพรุนจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของ GTR เพราะในระบบมียางทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์หรือเป็นตัวเชื่อมผสม (Binder) ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่า GTR (ยาง:GTR เท่ากับ 40:60) ทำให้ยางไม่สามารถห่อหุ้ม GTR ได้หมด เป็นผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคของ GTR และรูพรุนจากช่องว่างระหว่างเส้นใย เนื่องจากเส้นใยส่วนใหญ่กระจายตัวในวัฏภาคของยาง ซึ่งเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง โดยเส้นใยสามารถเกิดรูพรุนจากช่องว่างระหว่างเส้นใยได้เช่นกัน



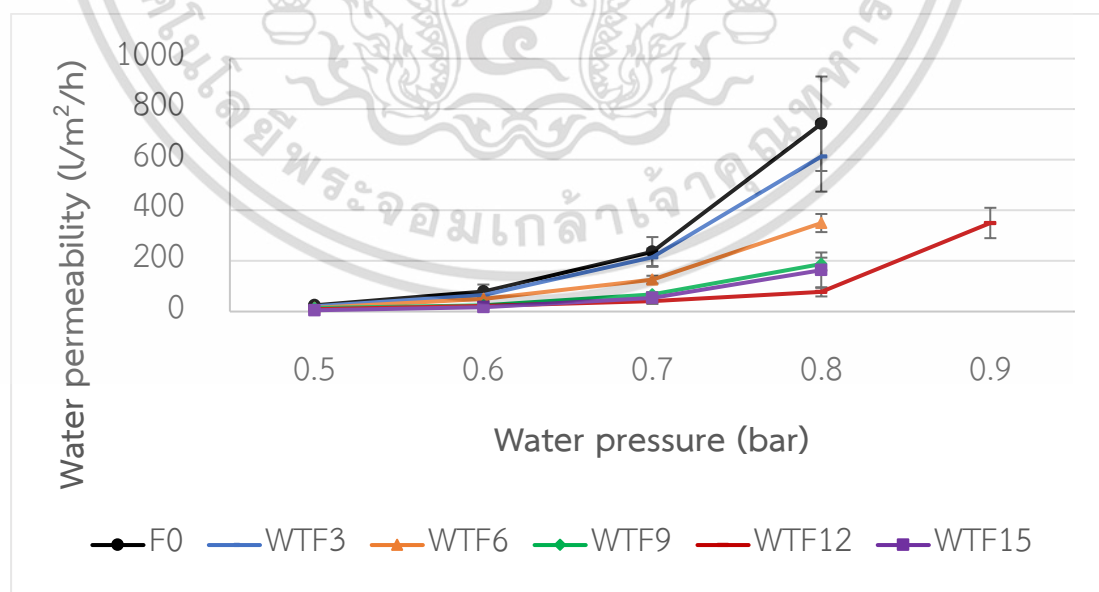
รูปที่ 4.16 แบบจำลองของระบบคอมโพสิตแผ่นยางน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึมที่ความดัน 0.5-0.9 bar แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าเส้นใยมีผลต่ออัตราการซึมผ่านน้ำ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลง แสดงดังรูปที่ 4.18 (WTF) และ 4.19 (PALF) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใย ทำให้ยางผสมสูตรมีความหนืดและมอดุลัสมากขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการขยายตัวลดลงและรูพรุนมีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เสริมแรงด้วย WTF มีอัตราการซึมผ่านน้ำมากกว่าชิ้นงานที่เสริมแรงด้วย PALF เนื่องจากยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF มีความหนืดต่ำกว่า ทำให้ชิ้นงานมีมอดุลัสต่ำกว่า สูตรที่เสริมแรงด้วย PALF ทำให้ขนาดของรูพรุนในยางผสมสูตรมีขนาดใหญ่ (ยืนยันจากหลักฐานวิทยาก่อนหน้า) นอกจากนี้ที่ความดัน 0.8 bar แผ่นยางน้ำซึมสูตร C30D2F0 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกว้างมาก เนื่องจากแผ่นยางน้ำซึมไม่มีเส้นใยในการเสริมแรง เมื่อความดันสูงเกินไป ทำให้รูพรุนขยายตัวจนฉีกขาด ส่งผลให้น้ำพุ่งออกมาปริมาณมาก ดังนั้นปริมาณน้ำของการทดสอบตัวอย่างแต่ละแผ่นมีค่าไม่ใกล้เคียงกัน เป็นผลให้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกว้าง

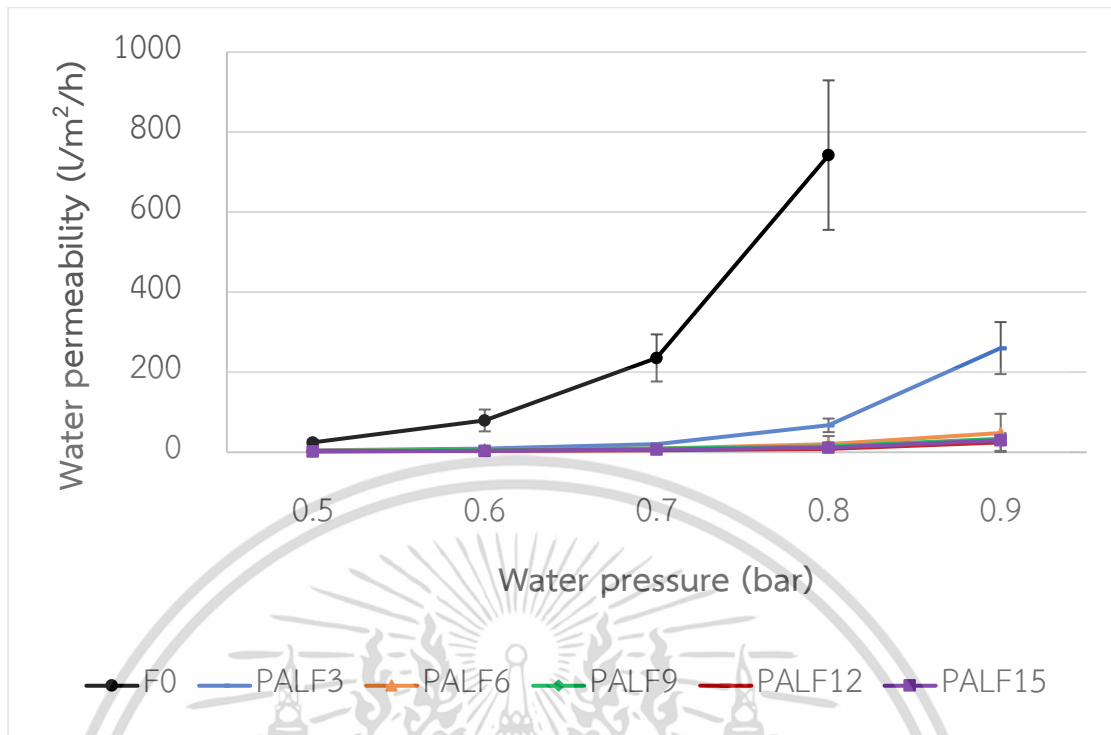


รูปที่ 4.17 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ a) แผ่นยางน้ำซึมขณะทดสอบ และ b) เครื่องทดสอบ



รูปที่ 4.18 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางจำลองสูตร WTF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและความดันน้ำแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางจำลองสูตร PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและความดันน้ำแตกต่างกัน

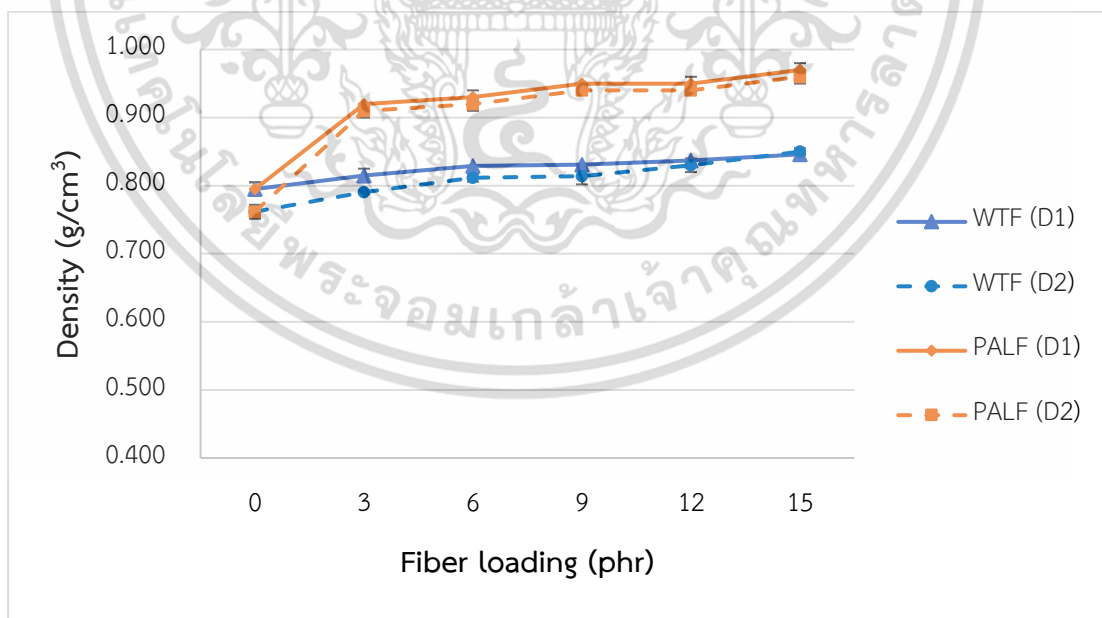
## 4.2 การศึกษาปริมาณสารให้ฟองและอัตราการซึมผ่านน้ำ โดยขึ้นรูปเป็นแผ่นยางน้ำซึม

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลในช่วงต้นมีการใส่สารให้ฟองเพื่อให้ชิ้นงานเกิดรูพรุนทำให้น้ำสามารถซึมออกมาจากผนังของท่ออย่างน้ำซึมได้ ดังนั้นปริมาณสารให้ฟองจึงส่งผลต่อรูพรุนของท่ออย่างน้ำซึมและอัตราการซึมผ่านน้ำ ถ้าใช้สารให้ฟองปริมาณน้อยเกินไปเกิดรูพรุนหรือเกิดความต่อเนื่องของรูพรุนน้อยทำให้น้ำซึมผ่านได้ลดลง และถ้าปริมาณมากเกินไปไม่ได้ส่งผลให้รูพรุนมีจำนวนมากขึ้นเสมอไป เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมากเกินไปจะรวมตัวหลุดออกจากชิ้นงานอาจส่งผลให้ได้รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำที่มาก [16] ดังนั้นจึงทำการศึกษารูปแบบสารให้ฟอง เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ท่ออย่างน้ำซึมที่มีสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้า [18] ได้มีการศึกษาสารให้ฟอง DNPT ปริมาณ 0.5 phr พบว่าน้ำไม่สามารถซึมผ่านผนังท่ออย่างน้ำซึมได้ที่ความดัน 0.5 bar แต่เมื่อเพิ่มความดัน 0.8 bar น้ำสามารถซึมออกมาจากผนังของท่อได้ เนื่องจากรูพรุนเกิดการขยายตัว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาปริมาณสารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr

จากการศึกษาปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพื่อให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานที่มีความต่อเนื่องนั้น เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อน สารให้ฟอง DNPT จะเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซแทรกตัวออกมาระหว่างช่องว่างอนุภาค GTR หรือระหว่างเส้นใย แสดง Model ดังรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณาที่เส้นใยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

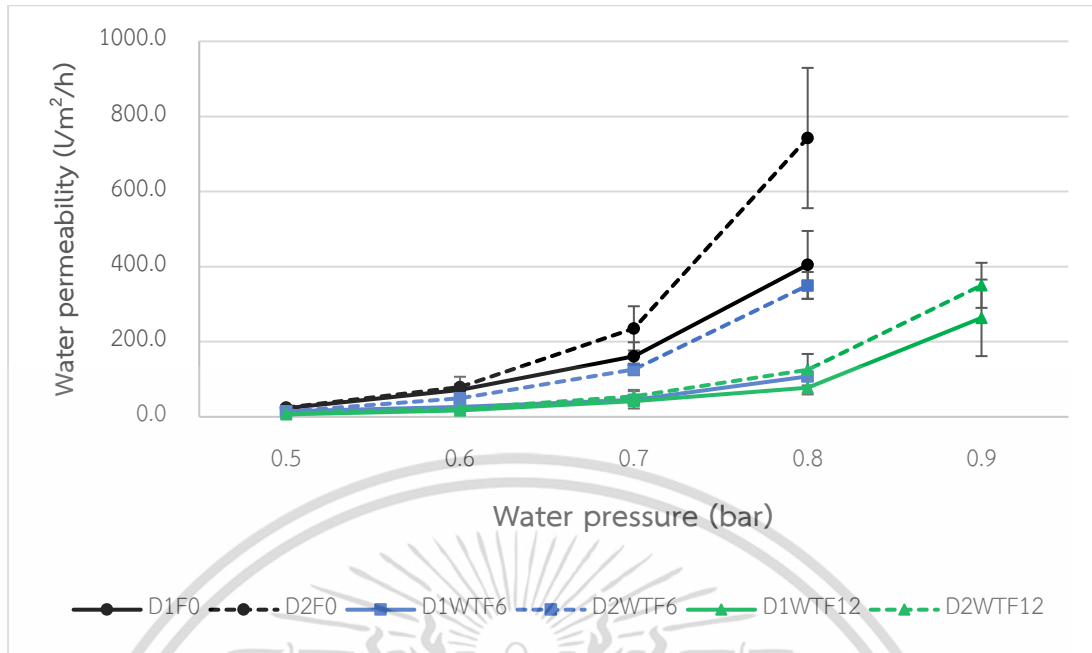
ชนิดเดียวกัน ความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำขึ้นกับจำนวนและขนาดของรูพรุนภายในชิ้นงาน จากรูปที่ 4.20-4.22 สังเกตได้ว่าผลของความหนาแน่นสอดคล้องกับค่าอัตราการซึมผ่านน้ำ กล่าวคือ เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้นจาก 1 phr (เส้นทึบ) เป็น 2 phr (เส้นประ) ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนอัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น จะเกิดการสลายตัวให้ปริมาณฟองก๊าซมากขึ้นและมีความต่อเนื่องขึ้น [75] อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นลดลงไม่เด่นชัด คาดว่าการใช้สารให้ฟองมากกว่า 1 phr อาจทำให้ฟองก๊าซหลุดออกจากผลิตภัณฑ์ ไม่เกิดเป็นฟองขังในชิ้นงาน เนื่องจากงานวิจัยนี้ทำระบบสถานะการให้ความร้อนเพื่อเชื่อมโยงตัวอย่างอย่างเป็นระบบเปิด ด้วยเตาอบลมร้อน ไม่ใช่ฝาปิดแม่พิมพ์ เมื่อสารให้ฟองสลายตัวทำให้ก๊าซหลุดออกจากผลิตภัณฑ์ได้ เพื่อให้เกิดช่องว่างต่อเนื่องแบบระบบเซลล์เปิดให้น้ำซึมผ่านออกได้ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองที่มากเกินไป ก๊าซที่เกิดขึ้นมากเกินไปจะรวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่ หลุดออกจากชิ้นงานผ่านโครงสร้างรูพรุนที่มีความต่อเนื่อง

เมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุที่ใส่สารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr แสดงดังรูป SEM ที่ 4.23 (WTF) และ 4.24 (PALF) พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านน้ำ โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานที่ใส่สารให้ฟอง 1 phr (รูป a) มีขนาดรูพรุนเล็กและไม่ต่อเนื่องกัน เป็นผลให้ความหนาแน่นสูงและน้ำซึมผ่านได้น้อย เมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง 2 phr (รูป b)) จะเกิดการสลายตัวให้ฟองก๊าซมากขึ้นและรวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่หลุดออกจากชิ้นงานผ่านโครงสร้างรูพรุนที่มีความต่อเนื่อง ทำให้รูพรุนใหญ่ขึ้น อัตราการซึมผ่านน้ำจึงมากขึ้น

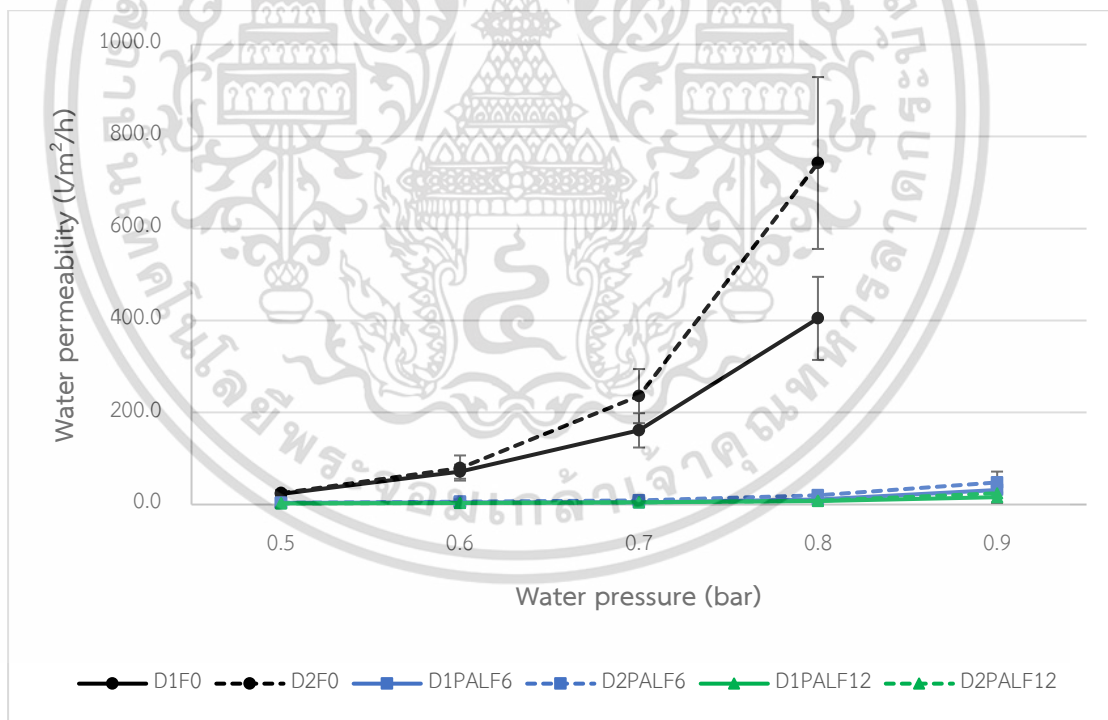


รูปที่ 4.20 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

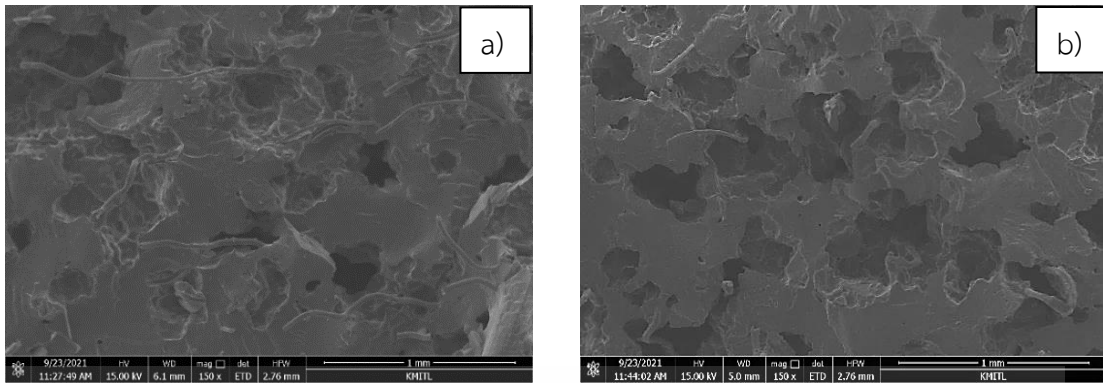


รูปที่ 4.21 อัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมสูตร WTF ที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr

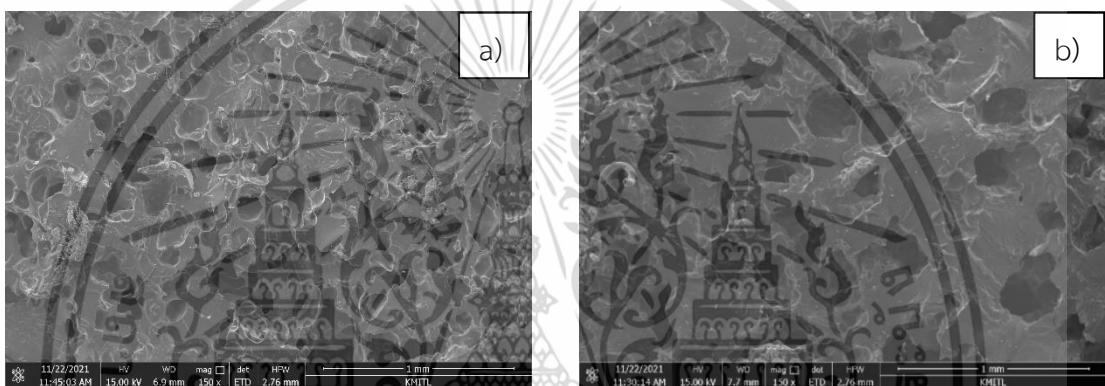


รูปที่ 4.22 อัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมสูตร PALF ที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 1 และ 2 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



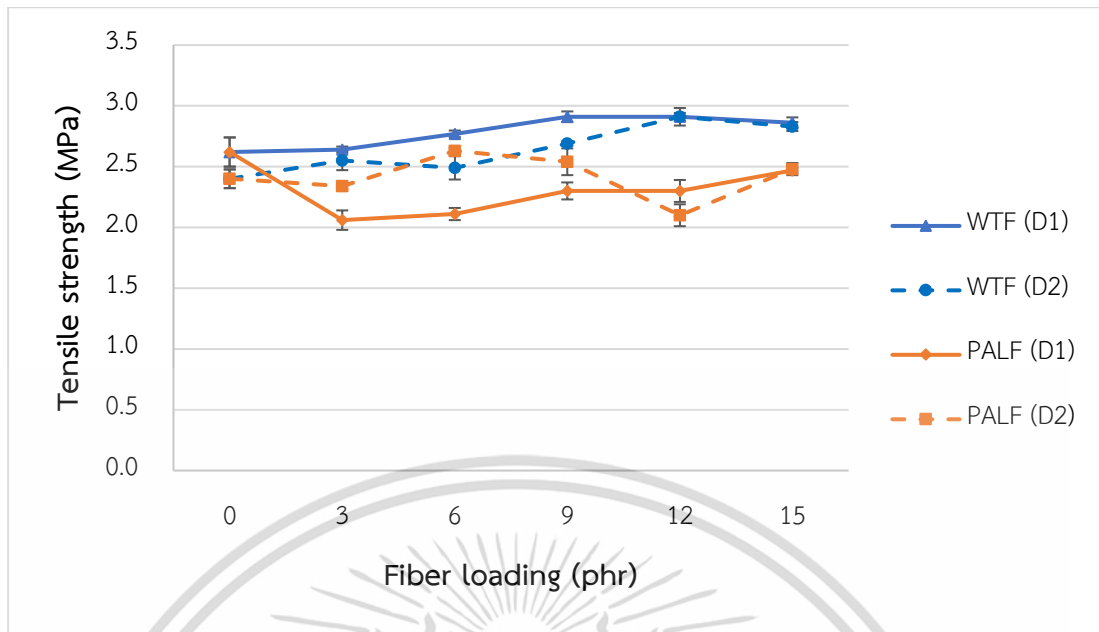
รูปที่ 4.23 SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วย WFT 6 phr แตกหักที่อุณหภูมิต่ำที่กำลังขยาย 150 เท่า a) DNPT 1 phr และ b) DNPT 2 phr



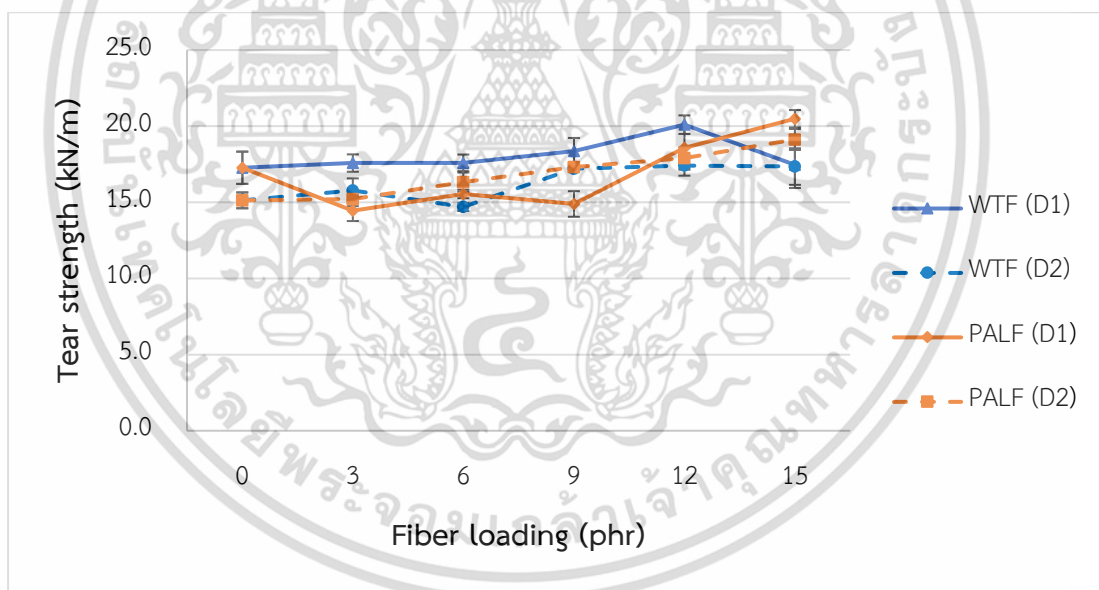
รูปที่ 4.24 SEM Micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสมสูตรจากการเสริมแรงด้วย PALF 6 phr แตกหักที่อุณหภูมิต่ำที่กำลังขยาย 150 เท่า a) DNPT 1 phr และ b) DNPT 2 phr

เมื่อพิจารณาที่เส้นใยชนิดเดียวกัน จากการเปรียบเทียบปริมาณสารให้ฟอง 1 phr (เส้นทึบ) และ 2 phr (เส้นประ) ของวัสดุที่เสริมแรงด้วย WFT และ PALF พบว่า สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มไม่เด่นชัดหรือต่างกันอย่างไรไม่มีนัยสำคัญ เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัสที่ 20 และ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และความแข็งแรงกด เนื่องจากสารให้ฟองได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวของฟองก๊าซทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานเสมือนเป็นจุดบกพร่องที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ซึ่งในงานวิจัยนี้การใช้สารให้ฟองปริมาณ 2 phr เป็นปริมาณมากเกินไปไม่ได้ส่งผลให้มีจำนวนรูพรุนมากขึ้นเนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมากเกินไปจะรวมตัวหลุดออกจากชิ้นงานทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดรูพรุนของสารให้ฟอง 1 phr (ยืนยันจากภาพสัณฐานวิทยาและค่าความหนาแน่นที่ลดลงไม่เด่นชัด) ส่งผลให้ปริมาณสารให้ฟอง 2 phr จึงมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับวัสดุที่ใส่สารให้ฟองปริมาณ 1 phr แสดงดังรูปที่ 4.25-4.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

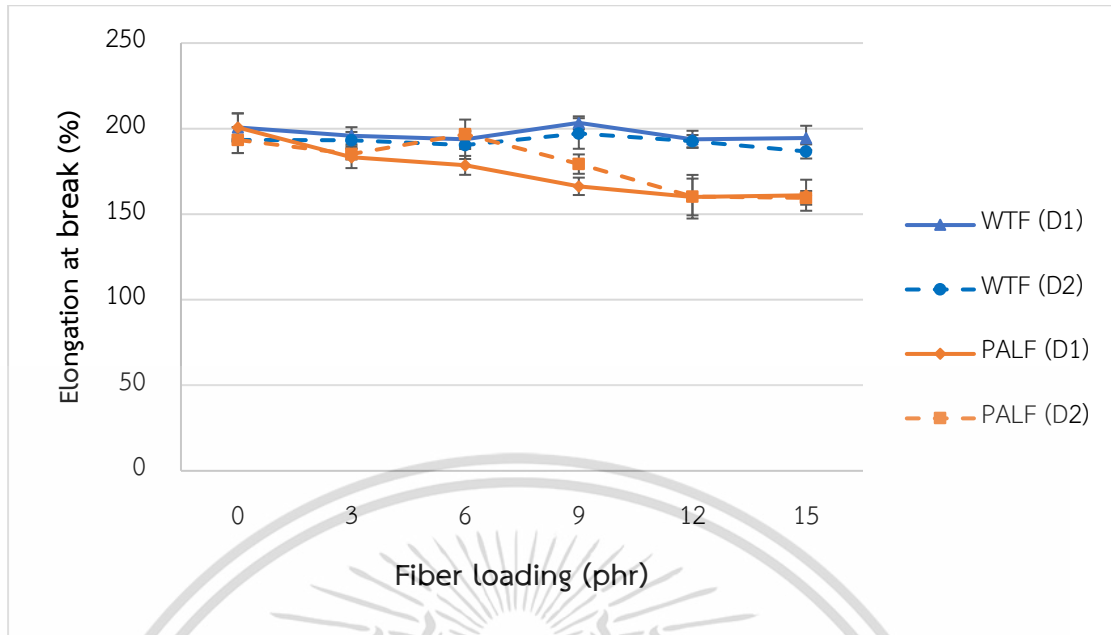


รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน

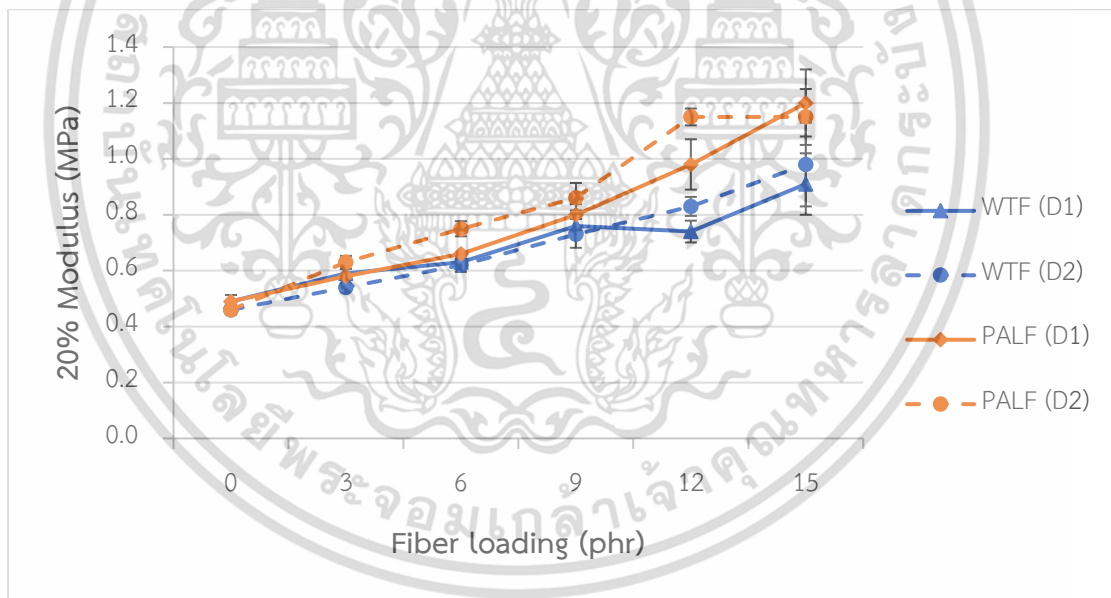


รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

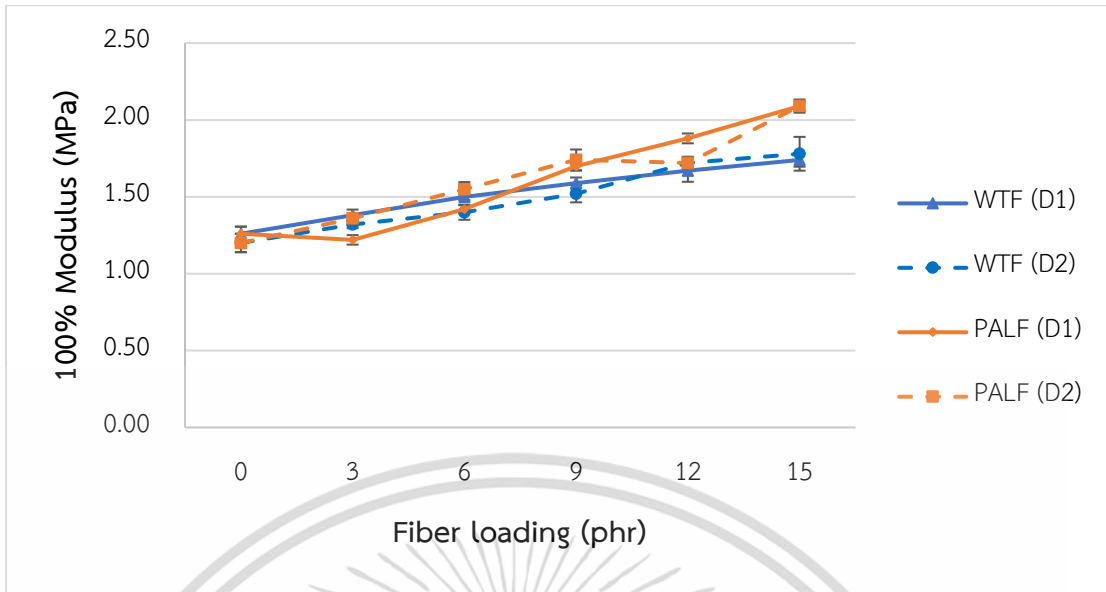


รูปที่ 4.27 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน

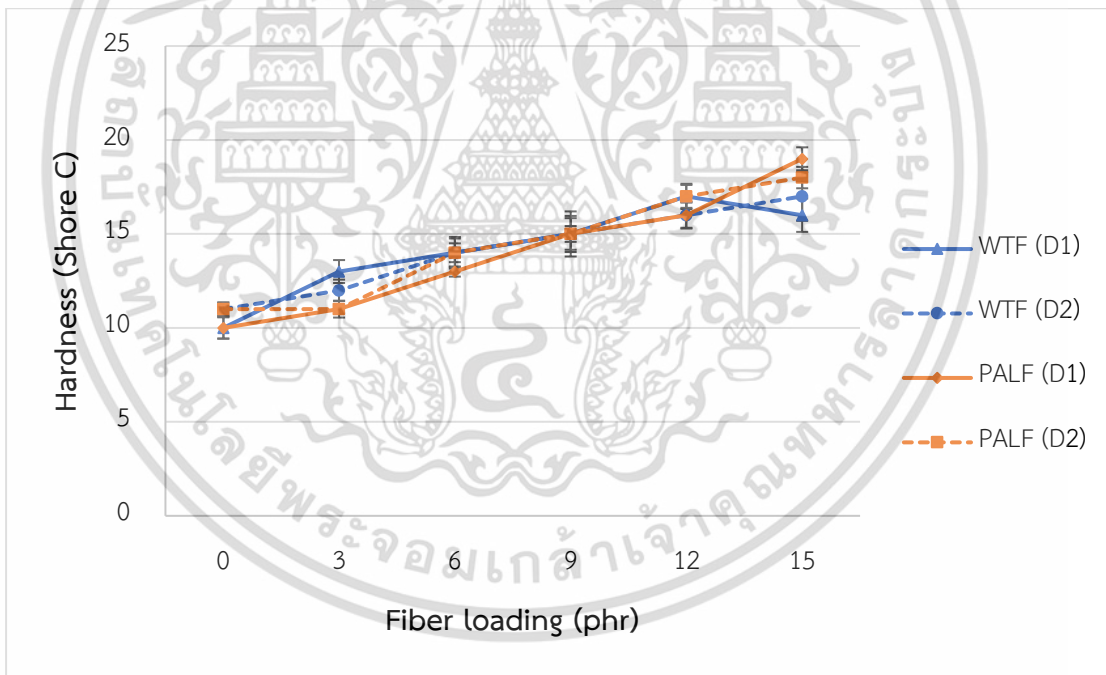


รูปที่ 4.28 ค่ามอดูลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M100) ของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน



รูปที่ 4.30 ค่าความแข็งกดของยางผสมสูตร WTF และ PALF ที่ปริมาณการใช้เส้นใยและสารให้ฟองแตกต่างกัน

จากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณ WTF, PALF (ตอนที่ 1) และปริมาณสารให้ฟอง DNPT (ตอนที่ 2) ต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นศึกษาแบบจำลอง พบว่าเส้นใยทำให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานดีขึ้นเล็กน้อย เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และมอดุลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20) ซึ่งวัสดุที่เสริมแรงด้วย WTF และ PALF ปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12 และ 6 phr ตามลำดับ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด นอกจากนั้นการใส่เส้นใยทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึมนลดลง เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้ลดการขยายตัวของชิ้นงาน เมื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารให้ฟอง พบว่าสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ใส่สารให้ฟอง 1 และ 2 phr มีค่าใกล้เคียงกัน แต่การใส่ปริมาณสารให้ฟอง 2 phr ทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกผลิตตัวอย่างน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF และ PALF (6 และ 12 phr) และปริมาณสารให้ฟอง 2 phr เพื่อนำมาทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำและความดันลดในขั้นต่อไป

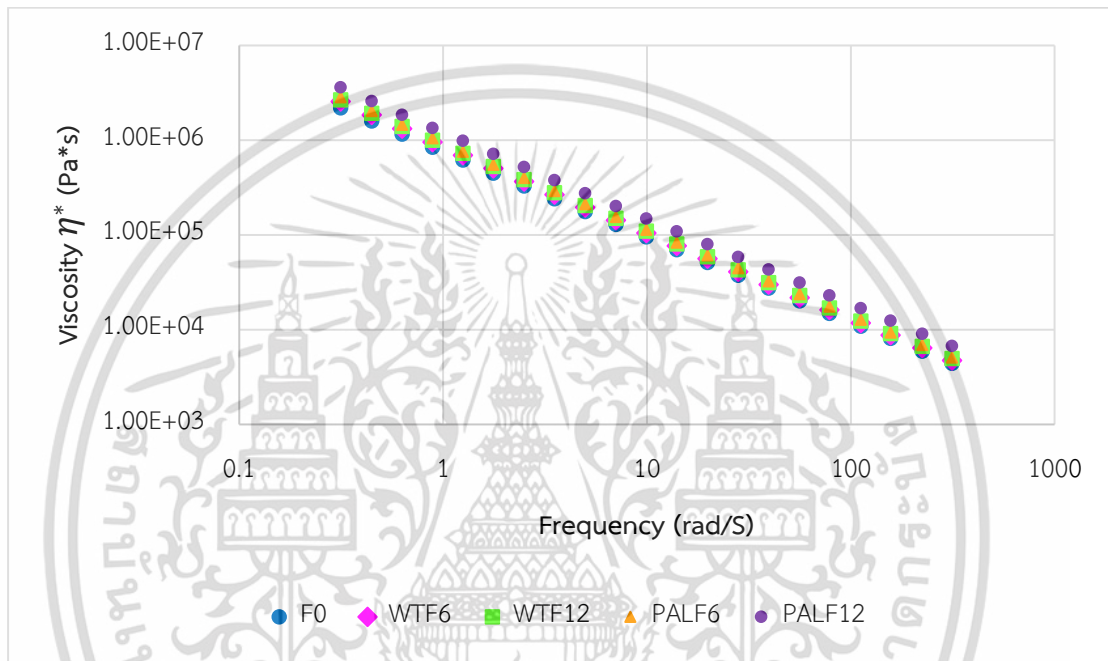
### 4.3 การศึกษาสมบัติการไหลแบบพลวัตและสมบัติการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างน้ำซึม

#### 4.3.1 การศึกษาสมบัติการไหลแบบพลวัต

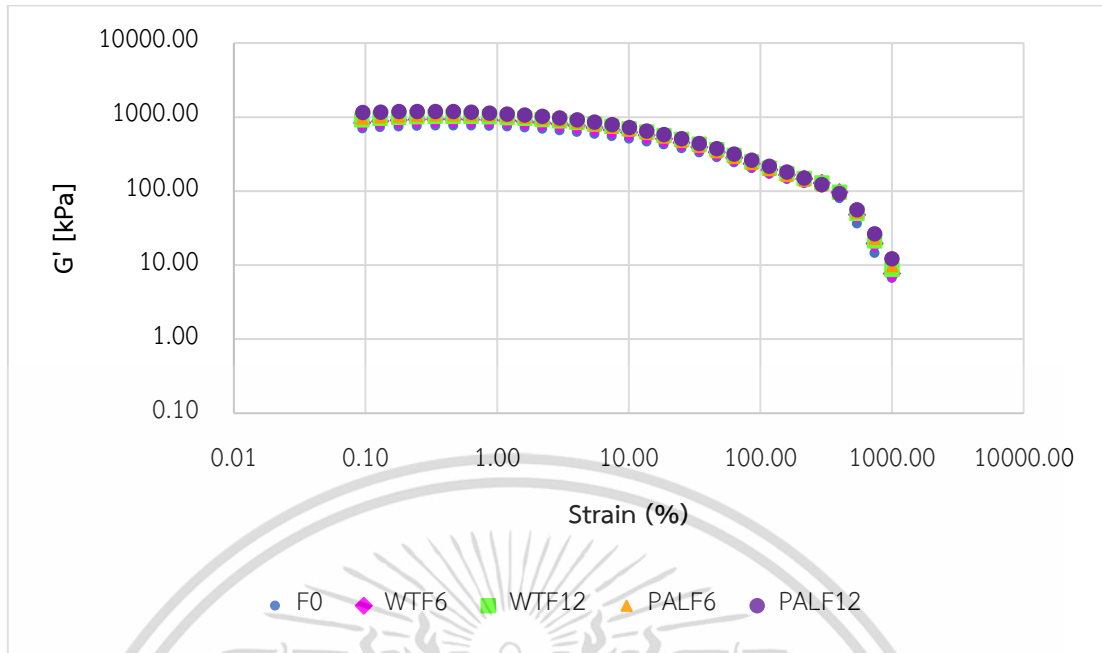
เนื่องจากตัวอย่างน้ำซึมผลิตจากวัตถุดิบหลายองค์ประกอบ เช่น GTR, RR, สารให้ฟองและเส้นใย (WTF, PALF) เป็นต้น เมื่อวัสดุมีองค์ประกอบต่างกันอาจส่งผลต่อสมบัติการไหล ดังนั้นในหัวข้อนี้สนใจศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการไหลแบบพลวัตระหว่างยางผสมสูตรที่มี WTF และยางผสมสูตรที่มี PALF (ปริมาณ 6 และ 12 phr) เพื่อใช้อธิบายในกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีดที่อาจมีผลต่อพลังงานที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป และสมบัติความเป็นอีลาสติก โดยมีอัตราส่วน RR และ GTR ขนาด 30 เมช คือ 40:60 (โดยน้ำหนัก) มีเขม่าดำที่มาจาก RR 30 phr และเติมเขม่าดำ 10 phr (เพื่ออ้างอิงจากสูตรของบริษัทที่ไม่ใส่เส้นใย) ดังนั้นปริมาณเขม่าดำรวมเท่ากับ 40 phr และใส่สารให้ฟอง 2 phr ทดสอบด้วยเครื่อง RPA พบว่าการใส่ WTF หรือ PALF ทำให้ความหนืดของยางผสมสูตรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเส้นใยเป็นของแข็งที่เกิดอันตรกิริยากับยาง ทำให้เส้นใยลดความสามารถในการไหลของสายโซ่โมเลกุลยาง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกด้วยซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนืดมูนนี่ในหัวข้อที่ 4.1 อย่างไรก็ตามการใส่เส้นใยทั้งสองชนิดมีค่าความหนืดลดลงที่ช่วงความถี่สูง ซึ่งยางผสมสูตรแสดงพฤติกรรมแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) [76] แสดงดังรูปที่ 4.31 และจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus,  $G'$ ) และค่า Strain ของยาง แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่ายางที่ใส่ WTF หรือ PALF มีค่า  $G'$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย เนื่องจากเส้นใยช่วยถ่ายเทความเค้นของวัสดุได้ ด้วยเหตุนี้ความแข็งแรงของคอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้นทำให้  $G'$  สูงขึ้น [77] ในกรณีของค่า Tan delta ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus,  $G''$ ) ต่อค่า  $G'$  ถ้า Tan delta มีค่ามาก แสดงว่า  $G''$  มีค่ามากหรือ  $G'$  มีค่าน้อย จากผลการทดลอง พบว่ากรณีการเติมเส้นใยค่า Tan delta มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ไม่เติม WTF หรือ PALF แสดงดังรูปที่ 4.33 เนื่องจากการใส่เส้นใยทำให้  $G'$  เพิ่มมากขึ้น และการใส่เส้นใยลงในยางผสมสูตรทำให้สมบัติการกระจายพลังงาน (Damping property) ลดลง เพราะเส้นใยจะเข้าไปลดความสามารถในการเคลื่อนที่อย่างอิสระของโมเลกุลยาง [55] ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ส่งผลให้ค่า Tan delta ของยางผสมสูตรมีค่าลดลงด้วย ทั้งนี้ยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF มีค่า Tan delta น้อยกว่ายาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

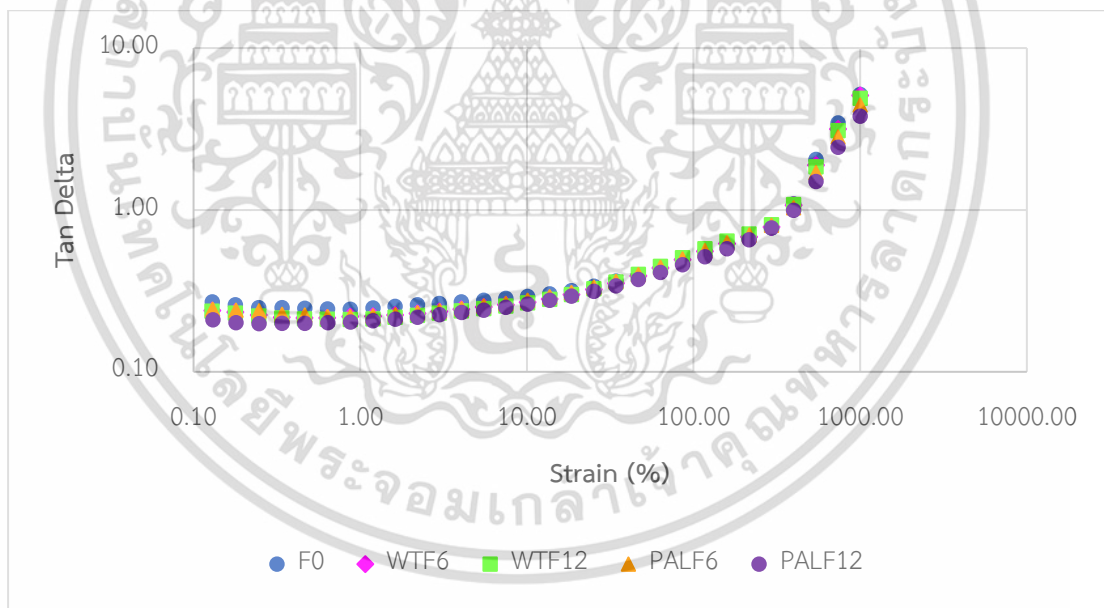
ผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF เล็กน้อย เพราะยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย PALF มีค่า  $G'$  มากกว่า ยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF จากผลการทดสอบ พบว่ายางผสมสูตร WTF และ PALF ใน ปริมาณ 6 และ 12 phr มีค่าความหนืด,  $G'$  และ Tan delta ต่างกันเล็กน้อยเมื่อเทียบกับยางผสม สูตรไมใส่เส้นใย ดังนั้นในการทดลองนี้การใส่เส้นใยไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อกระบวนการอัดรีด กล่าวคือ ยางผสมสูตรทุกสูตรสามารถใช้สภาวะการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึ่มเดียวกัน เช่น อุณหภูมิ และ ความเร็วสกรู เป็นต้น



รูปที่ 4.31 ค่าความหนืดของยางผสมสูตรของ WTF และ PALF ที่ปริมาณ 6 และ 12 phr ในโหมด Frequency sweep



รูปที่ 4.32 ค่ามอดุลัสสะสมของยางผสมสูตรของ WTF และ PALF ที่ปริมาณ 6 และ 12 phr ใน โหมด Strain sweep



รูปที่ 4.33 ค่า Tan delta ของยางผสมสูตรของ WTF และ PALF ที่ปริมาณ 6 และ 12 phr ใน โหมด Stain sweep

#### 4.3.2 การศึกษาสมบัติการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างน้ำซึ่ม

จากการเลือกสูตรผลิตตัวอย่างน้ำซึ่มที่เสริมแรงด้วย WTF และ PALF (6 และ 12 phr) โดยมีอัตราส่วน RR และ GTR ขนาด 30 เมช คือ 40:60 (โดยน้ำหนัก) มีเขม่าดำที่มาจาก RR 30 phr และเติมเขม่าดำ 10 phr (เพื่ออ้างอิงจากสูตรของบริษัทที่ไม่ใส่เส้นใย) ดังนั้นปริมาณเขม่าดำรวม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 40 phr และปริมาณสารให้ฟอง 2 phr ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นนอบด้วยอุณหภูมิ 160°C เป็นเวลา 20 นาที โดยแต่ละสูตรได้ท่อน้ำซึมน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความหนา และลักษณะท่อน้ำซึมน้ำ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความหนาและลักษณะของท่อน้ำซึมน้ำในแต่ละสูตร

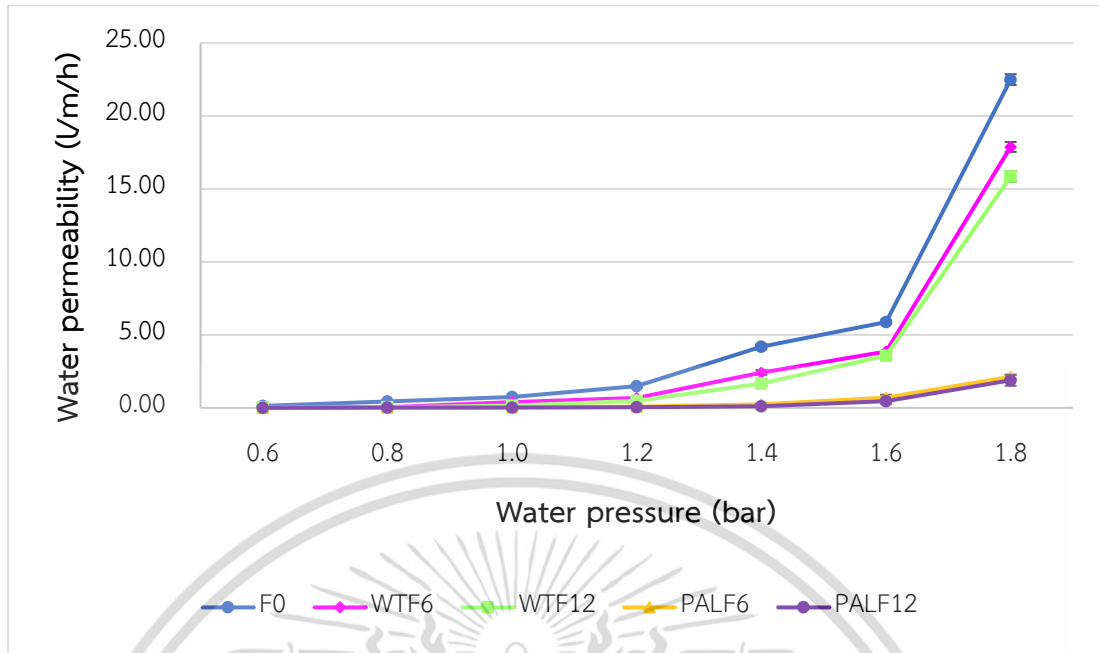
ตัวอย่าง	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)	ความหนา (mm)	ลักษณะ
F0	17.2 ± 0.2	3.0 ± 0.4	ผิวเรียบ
WTF6	17.5 ± 0.3	3.0 ± 0.4	ผิวไม่เรียบ
WTF12	17.5 ± 0.2	2.9 ± 0.4	ผิวไม่เรียบ
PALF6	18.2 ± 0.3	3.3 ± 0.6	ผิวไม่เรียบ
PALF12	18.0 ± 0.2	3.2 ± 0.4	ผิวไม่เรียบ

การศึกษาสมบัติการซึมผ่านน้ำแบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วน คือ 1. อัตราการซึมผ่านของน้ำ และ 2. ความดันลดในตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อน้ำซึมน้ำ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำท่อน้ำซึมน้ำไปใช้งานจริงร่วมกับอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ

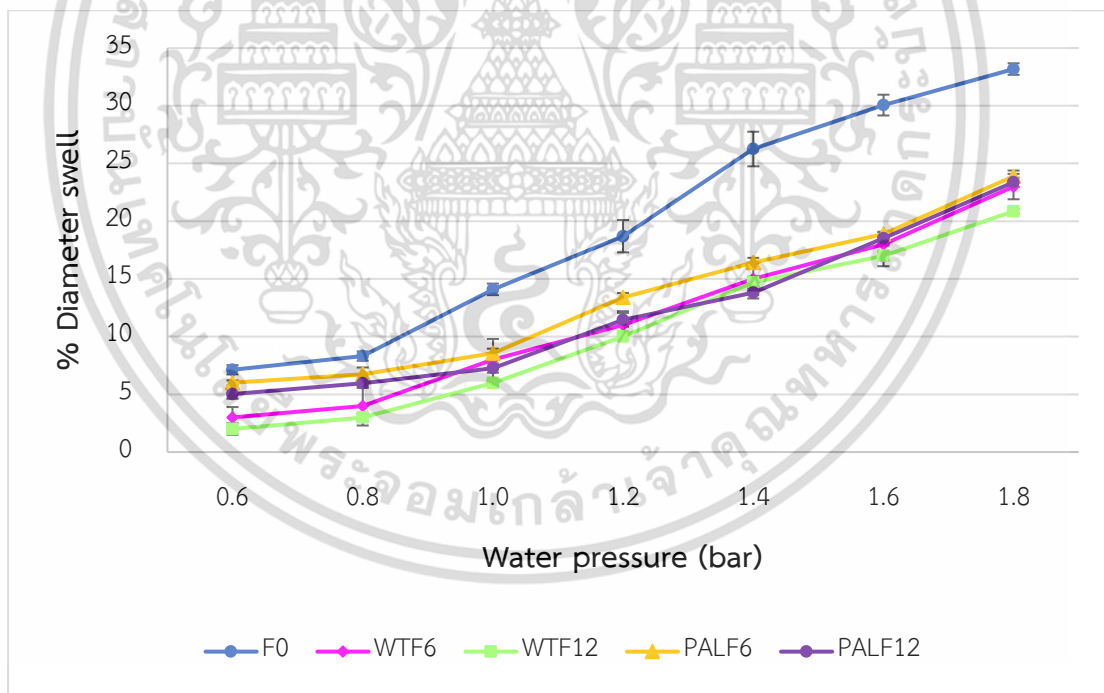
#### 4.3.2.1 การศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำ

จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำและเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำซึมน้ำที่มี WTF และ PALF ในปริมาณ 6 และ 12 phr โดยมีสารให้ฟอง DNPT 2 phr ในการทดสอบนี้ใช้ความยาวท่อน้ำ 1 เมตร และความดันน้ำ 0.8-1.8 bar ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

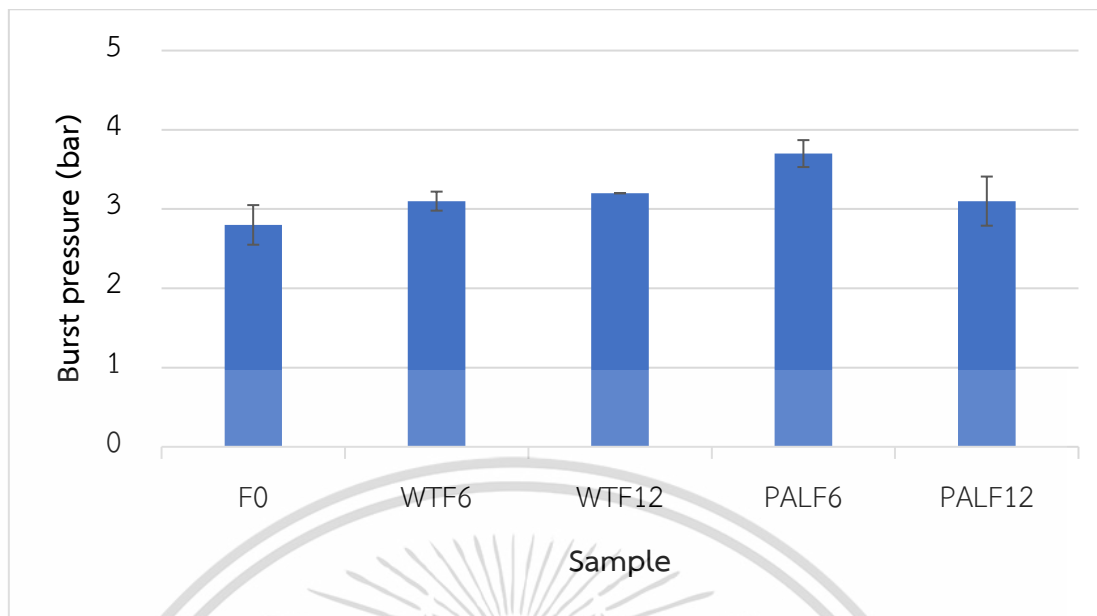


รูปที่ 4.34 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อใยน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF และ PALF ปริมาณ 6 และ 12 phr ที่ความดันน้ำต่าง ๆ



รูปที่ 4.35 ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใยน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF และ PALF ปริมาณ 6 และ 12 phr ที่ความดันน้ำต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ค่าความดันระเบิดของท่อขายน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF และ PALF ปริมาณ 6 และ 12 phr

จากรูปที่ 4.34 และ 4.35 พบว่าเมื่อนำเส้นใยมาเสริมแรงให้กับท่อขายน้ำซึม ทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำและเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับท่อขายน้ำซึมที่ไม่มีการใช้เส้นใยเสริมแรง เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งและมอดุลัสสูง (ผลของสมบัติเชิงกลในตอนที 1) ช่วยลดการขยายตัวของท่อขายน้ำซึม ซึ่งค่าอัตราการซึมผ่านน้ำสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลาง เมื่อเพิ่มความดันทำให้เปอร์เซ็นต์การขยายตัวของท่อขายน้ำซึมมีค่ามากขึ้นตามอัตราการซึมผ่านน้ำด้วย เนื่องจากการขยายตัวของท่อทำให้รูพรุนเกิดการขยายตัว เมื่อพิจารณาปริมาณของเส้นใยที่ใช้เสริมแรง (6 และ 12 phr) พบว่าการใส่เส้นใยปริมาณ 12 phr มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางและอัตราการซึมผ่านน้ำน้อยกว่าเส้นใยปริมาณ 6 phr เมื่อเปรียบเทียบชนิดของเส้นใย พบว่าท่อขายน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF มีอัตราการซึมผ่านน้ำมากกว่าท่อขายน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF เนื่องจากยางผสมสูตรที่เสริมแรงด้วย WTF มีความหนืดในระบบน้อยกว่า (รูปที่ 4.32) ทำให้ขนาดของรูพรุนในท่อขายน้ำซึมมีขนาดใหญ่ (รูปที่ 4.20) อัตราการซึมผ่านน้ำจึงมากกว่ายางผสมสูตรที่ใช้ PALF เสริมแรง แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขายน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF มีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า เมื่อให้ความดันทำให้ท่อขายน้ำซึมขยายตัวน้อยกว่าท่อขายน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF จากการทดสอบการระเบิดของท่อขายน้ำซึม พบว่าท่อขายน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย สามารถทนแรงดันได้มากกว่าท่อขายน้ำซึมที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรง อย่างไรก็ตามท่อขายน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF ปริมาณ 6 phr มีค่าความดันระเบิดสูงกว่าสูตรอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 4.36

เมื่อพิจารณาท่อขายน้ำซึมแต่ละสูตรที่ความดันต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.34 พบว่าท่อขายน้ำซึมสูตร WTF6, WTF12, PALF6 และ PALF12 ความดันในช่วง 0.6-1.6 bar มีอัตราการ

ซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นอย่างคงที่และมีปริมาณน้ำในช่วง 0.02-3.9, 0.01-3.6, 0-0.7 และ 0-0.5 l/m/h ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความดันเกิน 1.6 bar พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออย่างน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำของท่ออย่างน้ำซึมที่ไม่เสริมแรงและเสริมแรงด้วยเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากท่ออย่างน้ำซึมเกิดการขยายจนทำให้โครงสร้างรูปทรงแฉกขาด ทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ความดัน 1.8 bar แสดงดังรูปที่ 4.37 ทั้งนี้ท่ออย่างน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย อาจไม่เหมาะกับการใช้งานที่ความดันต่ำ ๆ เนื่องจากน้ำไม่สามารถซึมผ่านหรือซึมผ่านผนังท่อน้อยมาก



รูปที่ 4.37 ภาพถ่ายท่ออย่างน้ำซึมสูตร C40D2WTF12 ที่ความดัน 1.8 bar

#### 4.3.2.2 การศึกษาผลของความยาวท่ออย่างน้ำซึมต่อความดันน้ำ

จากการศึกษาผลของความยาวท่ออย่างน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อ คือ 10 และ 20 เมตร และศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำของท่ออย่างน้ำซึมสูตรที่มี WTF และ PALF ในปริมาณ 6 และ 12 phr โดยมีสารให้ฟอง DNPT 2 phr ในการทดสอบนี้ใช้ความดันเริ่มต้นที่ 0.8 และ 1.2 bar ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลของความยาวท่ออย่างน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ

ตัวอย่าง	ความดันเริ่มต้น (bar)	ตำแหน่งความยาวท่อ (m)	ความดันที่วัดได้ (bar)	อัตราการซึมผ่านน้ำ (l/m/h)
F0	0.8	10	0.8	0.33
		20	0.8	0.31
	1.2	10	1.2	1.37
		20	1.2	1.34
WTF6	0.8	10	0.8	0.07
		20	0.8	0.06
	1.2	10	1.2	0.70
		20	1.2	0.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลของความยาวท่ออย่างน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ความดันเริ่มต้น (bar)	ตำแหน่งความ ยาวท่อ (m)	ความดันที่วัดได้ (bar)	อัตราการซึมผ่าน น้ำ (l/m/h)
WTF12	0.8	10	0.8	0.05
		20	0.8	0.05
	1.2	10	1.2	0.37
		20	1.2	0.34
PALF6	0.8	10	0.8	0.02
		20	0.8	0.01
	1.2	10	1.2	0.09
		20	1.2	0.07
PALF12	0.8	10	0.8	0.01
		20	0.8	0.01
	1.2	10	1.2	0.03
		20	1.2	0.03

จากการทดสอบผลของความยาวท่ออย่างน้ำซึมต่อความดันน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ และอัตราการซึมผ่านน้ำ พบว่าท่ออย่างน้ำซึมทั้งสี่และไมสี่เส้นใยมีความดันน้ำที่วัดได้ในตำแหน่ง 10 และ 20 เมตร มีค่าใกล้เคียงกันกับความดันเริ่มต้น อาจกล่าวได้ว่าท่ออย่างน้ำซึมมีความดันลด (Pressure drop) น้อยมาก เนื่องจากอัตราการซึมผ่านน้ำออกจากผนังท่ออย่างน้ำซึมมีปริมาณน้อยจึงลดการสูญเสียแรงดันของน้ำ นอกจากนี้อัตราการซึมผ่านน้ำในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีความดันลดน้อยและรูพรุนในท่ออย่างน้ำซึมกระจายตัวสม่ำเสมอ (ยืนยันจากหลักฐานวิทยากรรูปที่ 4.7c))

#### 4.4 การทดลองสาริตการใช้งานจริงของท่ออย่างน้ำซึม

การทดสอบการนำท่ออย่างน้ำซึมไปใช้งานจริงร่วมกับอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ อ้างอิงข้อมูลจากการทดสอบอัตราการซึมผ่านในตอนต้นที่ 4.3 โดยเลือกสูตร C40D2WTF12 มาทดสอบการใช้งานจริง ซึ่งทำการทดสอบโดยทำโรงเรือน (Greenhouse) ที่พื้นที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา สุวินทวงศ์ กรุงเทพมหานคร โดยทดลองปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค (Green oak) และเรดโอ๊ค (Red oak) ทั้งหมด 240 ต้น เป็นระยะเวลา 55 วัน แสดงดังรูปที่ 4.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



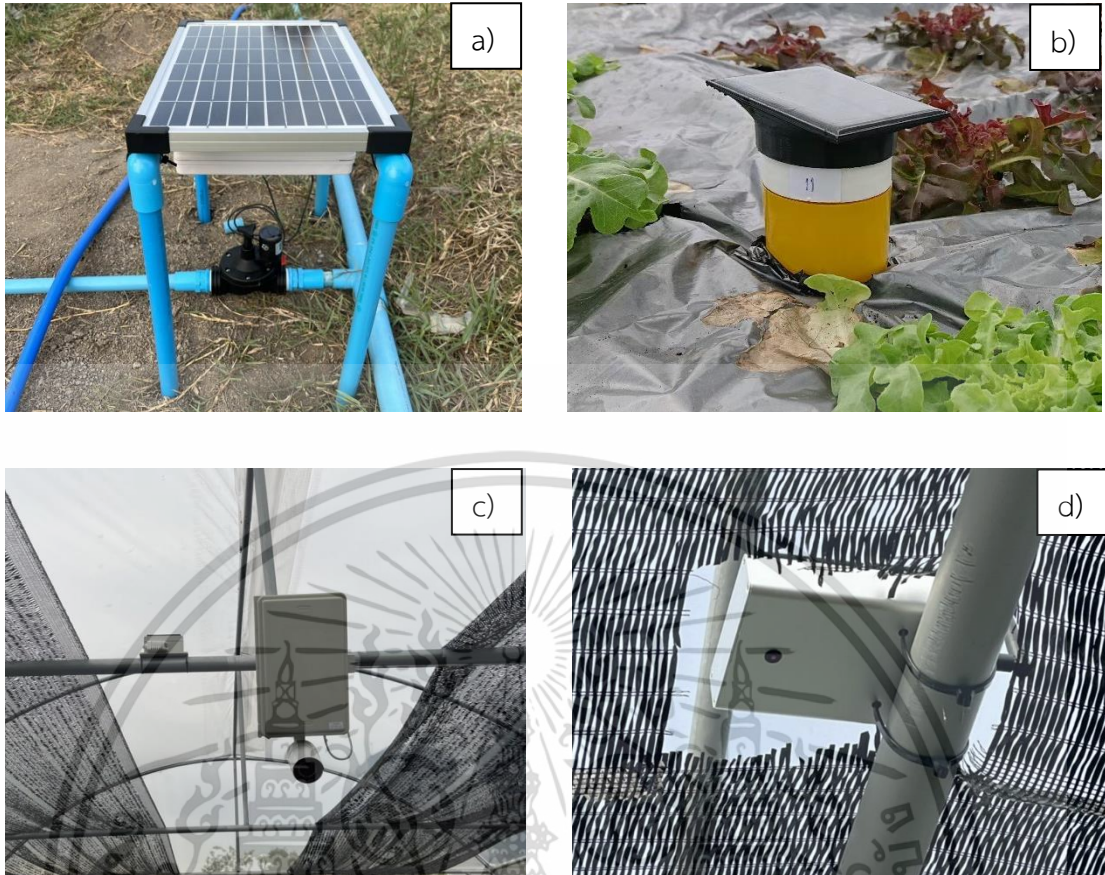
รูปที่ 4.38 โรงเรือนปลูกผักสลัด ณ โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา สุวินทวงศ์ กรุงเทพมหานคร

อุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะที่ใช้ร่วมกับตัวอย่างน้ำซึมในการปลูกผัก แสดงดังรูปที่ 4.39 สามารถติดตามผลการทำงานหรือสั่งการทำงานได้ที่หน้าแดชบอร์ด (Dashboard) บนเว็บไซต์ [skmfarm.com](http://skmfarm.com) แสดงดังรูปที่ 4.40 โดยอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ชื่อและหน้าที่ของอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ

อุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ	หน้าที่
วาล์วน้ำ IoT	ควบคุมเปิด-ปิดน้ำ
เซนเซอร์ดิน IoT	วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นของดิน
เซนเซอร์อากาศ IoT	วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ รวมทั้งวัดความเข้มของแสงในโรงเรือน
LoRa gateway	รับข้อมูลขึ้นบนเว็บไซต์และ Backup ข้อมูล
กล้อง	ดูการเจริญเติบโตของผักสลัดบน Dashboard

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 อุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ a) วาล์วน้ำ IoT b) เซนเซอร์ดิน IoT c) เซนเซอร์อากาศ และ LoRa gateway และ d) กล้อง



รูปที่ 4.40 แดชบอร์ด (Dashboard) แสดงข้อมูลต่าง ๆ บนเว็บไซต์ skmfarm.com

จากเว็บไซต์ skmfarm.com สามารถทราบค่าสูงสุดและต่ำสุดของอุณหภูมิอากาศและดิน, ค่าความชื้นอากาศและดิน และค่าความเข้มแสง ซึ่งหลักการทำงานของระบบเกษตรอัจฉริยะ แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยอุปกรณ์ทั้งหมดทำงานร่วมกันด้วยพลังงานจากแสงอาทิตย์ ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ดูเห็นใบประกอบชิ้นงานไว้ก็ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง ๆ จะถูกส่งผ่านไปที่ LoRa gateway จากนั้น LoRa gateway จะส่งข้อมูลขึ้น Cloud data ด้วยระบบ WiFi และแสดงผลบน Dashboard ผ่านเว็บไซต์ ซึ่งในแต่ละวันมีการตั้งเวลาและสั่งการเปิด-ปิดวาล์ว IoT เพื่อรดน้ำให้กับผักสลัดบนอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะผ่านเว็บไซต์ ทำการให้น้ำวันละ 2 ครั้ง (เช้าและเย็น) ปริมาณน้ำ  $20 \pm 5$  ลิตรต่อแปลงต่อครั้ง ซึ่งการรดน้ำในแต่ละวันจะใช้ข้อมูลความชื้นของดินที่แสดงบนเว็บไซต์เป็นตัวกำหนดจำนวนครั้งในการให้น้ำในแต่ละวัน โดยความชื้นของดินที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชสลัดไม่ควรเกิน 60% อย่างไรก็ตามถ้าความชื้นของดินมีค่าต่ำ อาจทำการให้น้ำวันละ 3 ครั้ง (เช้า เที่ยง และเย็น) เพื่อให้ต้นผักสลัดได้รับน้ำอย่างเพียงพอ จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อจำนวนวันเพิ่มขึ้น ผักสลัดมีจำนวนใบต่อต้นมากขึ้น ขนาดพุ่มใหญ่ขึ้นและผักสลัดมีการเจริญเติบโตพร้อมเก็บผลผลิตในระยะเวลา 55 วัน แสดงดังรูปที่ 4.41 ดังนั้นท่อยางน้ำซึมสูตร C40D2WTF12 สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำที่ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะได้

ตารางที่ 4.6 การเจริญเติบโตของผักสลัดในแต่ละวัน

วัน	วันที่ 1	วันที่ 7	วันที่ 15	วันที่ 25
กรีน โอ๊ค				
เรด โอ๊ค				



รูปที่ 4.41 ลักษณะของผักสลัดในระยะเวลา 55 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 สรุปสูตรที่เหมาะสมของท่ออย่างน้อยน้ำซึมและวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

### 4.5.1 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของท่ออย่างน้อยน้ำซึม

จากการทดลอง พบว่าองค์ประกอบของวัตถุดิบที่เหมาะสมกับการผลิตท่ออย่างน้อยน้ำซึม เพื่อให้ได้ท่ออย่างน้อยน้ำซึมที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ ท่ออย่างน้อยน้ำซึมที่ประกอบด้วย

- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางรีเคลม (RR) : พวงยางรถยนต์ (GTR) คือ 40:60
- เส้นใยชยะยางรถยนต์ (WTF) 12 phr
- ปริมาณเขม่าดำ 40 phr
- สารให้ฟองไดไนโตรเพนตะเมทิลีนเตตระรีน (DNPT) 2 phr

ท่ออย่างน้อยน้ำซึมที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นรูปพวง สีดำ ผิวขรุขระ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 18 มิลลิเมตร และความหนา 2.9 มิลลิเมตร สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมบัติบางประการของท่ออย่างน้อยน้ำซึมสูตร C40D2WTF12

สมบัติของท่ออย่างน้อยน้ำซึม	ค่าที่ได้
ความหนืดมูนี (ML 1+4 (100°C))	82.1
ความแข็งแรงดึง (MPa)	2.29
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด	108
มอดุลัสที่ 10%	0.83
มอดุลัสที่ 100%	2.23
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	16.44
ความแข็งกด (Shore C)	11
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	0.900
อัตราการซึมผ่านน้ำ (l/m/h) ณ ความดันดังนี้	
- 0.8 bar	0.03
- 1.6 bar	3.58
ค่าความดันระเบิด (bar)	3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะเลือกใช้ตัวอย่างน้ำซึมน้ำที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งาน คือ สูตร C40D2WTF12 โดยวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของตัวอย่างน้ำซึมน้ำที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ซึ่งสามารถผลิตตัวอย่างน้ำซึมน้ำที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 18 มิลลิเมตร มีความหนา 2.9 มิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตตัวอย่างน้ำซึม

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>1</sup>	เป็นเงิน (บาท)
<b>วัตถุดิบ</b>			
ยางรีเคลม เกรด UCD105	512 กรัม	30 บาท/กก.	15.36
ผงยางรถยนต์ (ขนาด 30 เมช)	384 กรัม	25 บาท/กก.	9.60
ซิงค์ออกไซด์	12.80 กรัม	95 บาท/กก.	1.22
กรดสเตียริก	5.12 กรัม	60 บาท/กก.	0.31
CBS	2.56 กรัม	120 บาท/กก.	0.31
TMTD	1.28 กรัม	150 บาท/กก.	0.19
เขม่าดำ (N550)	25.60 กรัม	50 บาท/กก.	1.28
เส้นใยจากขยะยางรถยนต์	30.72 กรัม	10 บาท/กก.	0.31
น้ำมันแพททานิก	7.68 กรัม	240 บาท/กก.	1.84
6PPD	2.56 กรัม	150 บาท/กก.	0.38
DNPT	5.12 กรัม	120 บาท/กก.	0.61
ยูเรีย	5.12 กรัม	130 บาท/กก.	0.67
กำมะถัน	6.40 กรัม	25 บาท/กก.	0.16
รวมต้นทุนวัตถุดิบการผลิตตัวอย่างน้ำซึมน้ำที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม			32.24
<b>ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ</b>			
ค่าแรง	0.15 ชั่วโมง	350 บาท/วัน <sup>2</sup>	6.56
ค่าไฟฟ้า	3.75 หน่วย <sup>3</sup>	4.2 บาทต่อหน่วย	15.75
เบ็ดเตล็ด	-	-	2
รวมต้นทุนค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ในการผลิตตัวอย่างน้ำซึมน้ำที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม			24.31
รวมต้นทุนการผลิตตัวอย่างน้ำซึมน้ำที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (7.7 เมตร) <sup>4</sup>			56.55

หมายเหตุ

<sup>1</sup> เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือน สิงหาคม 2565

<sup>2</sup> คิดค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน

<sup>3</sup> เป็นราคาโดยประมาณของกระบวนการผสมและขึ้นรูป (ภาคผนวก ง)

<sup>4</sup> ราคาไม่รวมเครื่องจักรการผลิต และค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 แสดงถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของท่อขายน้ำซีเมนต์ พบว่าการนำขายน้ำซีเมนต์มาใช้เป็นสารตัวเติมองค์ประกอบหลักในการผลิตท่อขายน้ำซีเมนต์ นอกจากจะช่วยให้เกิดรูปทรงภายในท่อขายน้ำซีเมนต์ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากขายน้ำซีเมนต์มีราคาถูก และมีปริมาณการใช้มากถึง 60% เมื่อเทียบกับขยง โดยต้นทุนการผลิตท่อขายน้ำซีเมนต์ 1 กิโลกรัม ได้ท่อขายน้ำซีเมนต์ยาว 7.7 เมตร ใช้ต้นทุนวัตถุดิบประมาณ 32.24 บาท ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ 24.31 บาท รวมต้นทุนการผลิตทั้งหมดประมาณ 56.55 บาท กล่าวคือได้ท่อขายน้ำซีเมนต์ประมาณ 7.34 บาท/เมตร ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าและราคาถูกกว่าท่อขายน้ำซีเมนต์ที่วางขายในเชิงพาณิชย์ที่จำหน่ายในราคา 35-70 บาท/เมตร (อ้างอิงจากรายการที่ 2.4) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการผลิตท่อขายน้ำซีเมนต์จากขยงขยงรยงนดที่ ใช้ (GTR, RR และ WTF) ในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์และสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการผลิตท่อยางน้ำซึมจากยางรีเคลมผสมผงยางรถยนต์และเสริมแรงด้วยเส้นใย โดยเน้นศึกษาเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของเส้นใยระหว่างเส้นใยขยะยางรถยนต์ (WTF) และเส้นใยไบสัปปะรด (PALF) และศึกษาปริมาณสารให้ฟอง DNPT ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการซึมผ่านน้ำ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การศึกษาแบบจำลอง (Model study) ของแผ่นยางน้ำซึม (ผลิตจาก GTR, NR และ RR) เมื่อเปรียบเทียบชนิดและปริมาณเส้นใย WTF และ PALF พบว่าแผ่นยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย PALF มีความเหนียวและความหนาแน่นมาก ทำให้แผ่นยางมีขนาดรูพรุนเล็ก ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำมีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่เสริมแรงด้วย WTF เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าการใส่เส้นใยทำให้แผ่นยางน้ำซึมมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นเล็กน้อย โดยแผ่นยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย PALF มีค่ามอดุลัสมากกว่าแผ่นยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF การเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้ค่ามอดุลัสและความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อศึกษาปริมาณสารให้ฟอง DNPT พบว่าการเพิ่มปริมาณสารให้ฟอง 1 และ 2 phr ทำให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น มีผลให้อัตราการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มไม่เด่นชัด

2. การศึกษาเปรียบเทียบผลของเส้นใย WTF และ PALF ในท่อยางน้ำซึม (ผลิตจาก GTR และ RR) โดยเลือกปริมาณเส้นใย 6 และ 12 phr และสารให้ฟอง 2 phr พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยความเหนียวของยางผสมสูตรและค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งยางผสมสูตร WTF มีความเหนียวน้อยกว่ายางผสมสูตร PALF อีกทั้งยางผสมสูตรแสดงพฤติกรรมแบบซูโดพลาสติก เมื่อศึกษาสมบัติการซึมผ่านน้ำ พบว่าท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อที่มีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านน้ำที่ลดลง เมื่อเพิ่มความดัน อย่างไรก็ตามท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF มีอัตราการซึมผ่านน้ำที่มาก แต่เปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางมีแนวโน้มต่ำกว่าท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF นอกจากนี้ท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีค่าทนความดันระเบิดสูงกว่าท่อยางน้ำซึมที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรง

3. การทดสอบการใช้งานจริงของท่อยางน้ำซึมสูตร C40D2WTF12 ไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์เกษตรอัจฉริยะ โดยทดลองปลูกพืชสลัดในโรงเรือน จากการทดลอง พบว่าท่อยางน้ำซึมสามารถเป็นอุปกรณ์ให้น้ำร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะได้

จากการผลิตท่อยางน้ำซึมพบว่าสูตรที่เหมาะสมต่อการผลิตและมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการซึมผ่านน้ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง คือ สูตร C40D2WTF12 ซึ่งมีองค์ประกอบของอัตราส่วน

RR:GTR เท่ากับ 40:60 เขม่าดำ 40 phr และเส้นใยขยะยางรถยนต์ 12 phr ใช้สารให้ฟอง 2 phr

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีต้นทุนการผลิตประมาณ 7.34 บาท/เมตร ท่อขายน้ำซีเมนต์ที่ผลิตมีความดันที่เหมาะสมในการใช้งานประมาณ 0.6-1.6 bar มีอัตราการให้น้ำประมาณ 0.01-3.6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง และมีค่าความดันระเบิดประมาณ 3.2 bar

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยผลิตท่อขายน้ำซีเมนต์ สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่น่าสนใจที่อาจเป็นแนวทางในการทำการศึกษาวิจัยต่อไป ดังนี้

- 1) ศึกษาผลของความหนาของท่อขายน้ำซีเมนต์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติซีเมนต์ผ่านน้ำ
- 2) พัฒนาท่อขายน้ำซีเมนต์จากยางชนิดอื่น ๆ แทนยางรีเคลมที่มาจากขยะยางรถยนต์ เพื่อสามารถใช้งานภายในอาคารโดยปราศจากกลิ่นไม่พึงประสงค์ เช่น ยางอีพิตีเอ็ม ยางพียู ฯลฯ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ปานระพี รพีพันธุ์. 2560. **Thailand 4.0 คืออะไร**. [Online]. Available : <https://www.it24hrs.com/2017/thailand-4-0/>.
- [2] Kawizara. 2558. **Precision Farming การเกษตรแบบใหม่ ใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะปลูก**. [Online]. Available : <http://www.kawizara.com/2015/04/precision-farming>.
- [3] แดน มองต่างแดน. 2557. **เกษตรอัจฉริยะ : ทางเลือกเกษตรยุคไอที**. [Online]. Available : <https://www.ptp.or.th/news/558>.
- [4] Turner, J. E. and Southlake. **Underground Irrigation Porous Pipe**. U.S patent no. 4003408. January 1997.
- [5] LeakyPipe. 2022. **Leaky pipe porous soaker hoses**. [Online]. Available : <https://www.leakypipe.co.uk/leaky-pipe-porous-soaker-hoses-c102x2907733>.
- [6] กสิพันธ์รัตน์. 2565. **สายยางน้ำซึมเรนฟอเรสต์ ความยาว 50 เมตร**. [Online]. Available : <https://kasipantarut.com/index.php/rainforest-soaker-hose-50meter.html>.
- [7] LBS Global company. 2022. **Porous pipe socker hose**. [Online]. Available : <https://www.porouspipe.co.uk/products/original-porous-pipe.php>.
- [8] Covestro. 2018. **To build a better garden hose, materials make the difference**. [Online]. Available : <https://www.waterrightinc.com/blogs/news/global-recognition>.
- [9] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2564. **ข้อมูลปริมาณการผลิตยางพารา ปี 2564**. [Online]. Available : [http://thaisdi.gistda.or.th/dataset/oae14\\_04/-resource/0130f5b4-b4f0-4d85-9542-a292b7953fcc](http://thaisdi.gistda.or.th/dataset/oae14_04/-resource/0130f5b4-b4f0-4d85-9542-a292b7953fcc).
- [10] ชัยวัช โสวเจริญสุข. 2562. **แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2562-2564: อุตสาหกรรมยางพารา**. [Online]. Available : <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Agriculture/Rubber/IO/io-rubber-20>.
- [11] ปางอุบล อำนวยสิทธิ์. 2560. **Circular Economy: พลิกวิกฤตทรัพยากรด้วยระบบเศรษฐกิจใหม่**. [Online]. Available : <https://www.scbeic.com/th/detail/product/3831>.
- [12] Stark, M. 2019. **SOURCING IN THE CIRCULAR ECONOMY**. [Online]. Available : <https://futureofsourcing.com/sourcing-in-the-circular-economy>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] All around plastic. 2562. **เศรษฐกิจหมุนเวียน โอกาสใหม่ของธุรกิจเพื่อความยั่งยืน.**  
[Online]. Available : <https://www.allaroundplastics.com/article/-sustainability/1898>.
- [14] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2556. **การขยายฐานการผลิตยางล้อเพื่อการส่งออก.**  
กรุงเทพฯ : สถาบันพลาสติก และศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย.
- [15] บ้านสวนต้นน้ำวังทอง. 2556. **ยางรถยนต์เก่า รถมอเตอร์ไซด์และรถจักรยานเก่า เราสามารถนำไปทำอะไรได้บ้าง.** [Online]. Available : <https://www.bansuanporpeang.com/-node/25845>.
- [16] สุนมา แจ่มเหมือน. 2547. “การผลิตท่อน้ำซีมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] วศิน จิรไพศาลกุล, วัฒนา ทรัพย์สภาพ และอ้ออำไพ ใจบุญ. 2547. “การศึกษาท่อน้ำซีมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] ปัฐวี พินิจกุล. 2561. “การศึกษาท่อน้ำซีมจากผงยางรถยนต์ผสมยางธรรมชาติ/ยางรีเคลมเพื่องานเกษตรกรรม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และนนทยา เก่งเขตร์กิจ. 2563. **ใบสับประรด : แหล่งเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ควรมองข้าม.** [Online]. Available : <http://www.thaiscience.info/Journals/Article/SSCJ/10967028.pdf>.
- [20] เทคโนโลยีชาวบ้าน. 2560. **ฉีดยุ่ยทางใบสับประรด ทำได้สะดวก รวดเร็ว ประหยัดเวลา/เงินค่าปุ๋ย.** [Online]. Available : [https://www.technologychaoban.com/agricultural-technology/article\\_32724#google\\_vignette](https://www.technologychaoban.com/agricultural-technology/article_32724#google_vignette).
- [21] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2547. **ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน.** ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [22] วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2549. **ยางธรรมชาติ : การผลิตและการใช้งาน.** กรุงเทพฯ : ซีโนดีไซน์.
- [23] อธิพล แจ้งชัด. 2561. “เอกสารประกอบการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.”  
กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [24] พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. **สารเคมียาง.** ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] ชินรัตน์ ลากพุลธนะอนันต์. 2555. **ยางรีเคลมกับการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น.** [Online]. Available : <http://www.mahidolrubber.org/files/reclam-product.pdf>.
- [26] Joseph, A.M. George, B. Madhusoodanan, K.N. and Alex, R. 2016. “The current status of sulphur vulcanization and devulcanization chemistry: Devulcanization.” *Rubber Science*. 29(1) : 62-100.
- [27] Novotny, D.S. Marsh, R.L. Masters, F.C. and Tally, D.N. **Microwave devulcanization of rubber.** U.S patent no. 4104205. August 1978.
- [28] Makarov, V.M and Drozdovski, V.F. 1991. **Reprocessing of tyres and rubber wastes recycling from the rubber product products industry.** USA : Ellis horwood. 4078981802
- [29] Folkes, M.J. and Hope, P.S. 1993. **Polymer Blends and Alloys.** 1<sup>st</sup> ed. New York : CRC Press.
- [30] Paul, D.R. Barlow J.W. and Keskkula. H. 1988. “Polymer Blends.” **Encyclopedia of polymer science and engineering.** Vol. 10 : 399-461.
- [31] เสาวรจน ขวัญจุลจิตร. 2541. “**เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ 1.**” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. เอกสารอัดสำเนา
- [32] Blow, C.M. 2010. **Rubber Technology and Manufacture.** London : Butterworth.
- [33] ชาญวิทย์ พูนศรีไชยสิทธิ์. 2551. **โฟมพลาสติก.** [Online]. Available : [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/238\\_74-78.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/238_74-78.pdf).
- [34] อธิพล แจ้งชัด. 2545. “**เอกสารประกอบการสอนคอมโพสิต.**” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [35] ดรชนิ พัทวรการ. 2544. “**เอกสารประกอบการสอนเทคโนโลยีสิ่งทอ.**” เชียงใหม่ : ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เอกสารอัดสำเนา.
- [36] ฐานข้อมูลส่งเสริมและยกระดับสินค้า OTOP. 2564. **ชนิด คุณสมบัติ และการใช้ประโยชน์ของเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic fibers).** [Online]. Available : <http://otop.dss.go.th/index.php/2014-10-09-08-12-02/2014-10-09-08-1202/261-synthetic-fibers>.
- [37] สุปราณี แก้วภิมย์และศิริเดช บุญแสง. 2557. **คอมโพสิตรั้งสิ่งแหวดล้อมจากพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยสับปะรด.** [Online]. Available : <http://dspace.lib.buu.ac.th/xmlui/handle/1234567890/1510>.
- [38] Mohanty, A.K. Misra, M. and Drzal, L.T. 2005. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites.** United States of America : Taylor & Francis Group.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย. 2559. **คอมพอลิทีเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น**. กรุงเทพฯ : ไอที ออล ดิจิตอลพรีนธ์.
- [40] Af supercell. 2010. **Foaming agent**. Bangkok : Report Af Supercell Co.,Ltd.
- [41] Wikipedia. 2022. **Polyethylene glycol**. [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene\\_glycol](https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_glycol).
- [42] สมชาย ดอนเจตีย์. 2555. “เทคโนโลยีการให้น้ำด้วยสายยางน้ำซึม.” *Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering*. 18(1) : 34-42.
- [43] Epic gardening. 2019. **How To Use A Soaker Hose: Irrigation Planning And Installation**. [Online]. Available : <https://www.epicgardening.com/how-to-use-a-soaker-hose/>.
- [44] SME in Focus. 2562. **5 กรณีการใช้ IoT เพื่อการทำเกษตรอัจฉริยะ**. [Online]. Available : <https://www.bangkokbanksme.com/en/lot-smart-farm>.
- [45] กรองแก้ว พรหมปัญญา. 2563. **Internet of Things (IoT)**. [Online]. Available : <https://bit.ly/3mYGBjN>.
- [46] ฌภัทร รัตนภักดี และปิยธิดา ปลื้มภาณุภัทร. 2561. “การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานท่อน้ำซึมชนิดเสริมแรงเป็นท่อน้ำบนดินและใต้ดิน.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [47] เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์, พรรวี สุมิตร และอมรวดี ยุวโกศล. 2542. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [48] สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล. 2554. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผงยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [49] Soltani, S. Naderi, G. and Ghoreishy, M.H.R. 2010. “Mechanical and rheological properties of short nylon fiber NR/SBR composites.” *Rubber Research*. 13(2) : 110–124.
- [50] Wisttanawat, U. Thanawan, S. and Amornsakchai, T. 2014. “Mechanical properties of highly aligned short pineapple leaf fiber reinforced nitrile rubber composite : Effect of fiber content and bonding agent.” *Polymer Testing*. 35(1) : 20-27.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [51] Hariwongsanupab, N. Thanawan, S. Amornsakchai, T. Vallat, M. F. and Mougin K. 2017. “Improving the mechanical properties of short pineapple leaf fiber reinforced natural rubber by blending with acrylonitrile butadiene rubber.” *Polymer Testing*. 57(1) : 94-100.
- [52] Lopattananon, N. Panawarangkul, K. Sahakaro, K. and Ellis, B. 2006. “Performance of pineapple leaf fiber-natural rubber composites: the effect of fiber surface treatments.” *Applied Polymer Science*. 102(1) : 1974-1984.
- [53] Ismail, H. Edyham, M.R. and Wirjosentono B. 2002. “Bamboo fibre filled natural rubber composites: the effects of filler loading and bonding agent.” *Polymer Testing*. 21(2) : 139-144.
- [54] Ismail, H. Mahir, N. A. and Ahmad, Z. 2011. “The effect of bis-(3-triethoxysilyl propyl) tetrasulphide (Si-69) as a coupling agent on properties of natural rubber/kenaf fibre composites.” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 40(1) : 893-897.
- [55] Jacob, M. Thomas, S and Varughese, K. T. 2006. “Dynamical mechanical analysis of sisal fiber/oil palm hybrid fiber-reinforced natural rubber composites.” *Polymer Composites*. 27(6) : 671-680.
- [56] Sriraveeroj, N. Amornsakchai, T. Sunintaboon, P. and Watthanaphanit, A. 2022. “Synergistic reinforcement of cellulose microfibers from pineapple leaf and ionic cross-linking on the properties of hydrogels.” *American Chemical Society*. 7(1) : 25321-25328.
- [57] TAPPI, TAPPI T-222-om-21. In *Acid-insoluble lignin in wood and pulp* ; 2007.
- [58] TAPPI, TAPPI T-UM 250. In *Acid-Soluble Lignin in Wood and Pulp* ; 2007.
- [59] Wise, L. E. Murphy, M. Adieco, A. A. D. 1946. “A chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses.” *Paper Trade Journal*. 122(2) : 35-43.
- [60] Updegraff, D. M. 1969. “Semimicro determination of cellulose in biological materials.” *Analytical Biochemistry*. 32(3) : 420– 424.
- [61] ASTM D1646 Committee on standard. 1994. “Standard test methods for rubber-viscosity, stress relaxation, and pre-vulcanization characteristics (Mooney viscometer).” Philadelphia : American Society for Testing and Materials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] ASTM D2240 Committee on standard. 1991. "Standard test methods for Rubber property-Durometer hardness." Philadelphia : American Society for Testing and Materials.
- [65] Acevedo, B. Fernandez, A.M. and Barriocanal, C. 2014. "Identification of polymers in waste tyre reinforcing fibre by thermal analysis and pyrolysis." *Analytical and Applied Pyrolysis*. 111(1) : 224-232.
- [66] Kabir, M.M. Wang, H. Lau, K.T. and Cardona, F. 2013. "Effects of chemical treatments on hemp fibre structure." *Applied Surface Science*. 276(1) : 13-23.
- [67] Yang, H. Yan, R. Chen, H. Lee, D.H. and Zheng, C. 2007. "Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis." *Fuel*. 86(12-13) : 1781-1788.
- [68] Kutz, M. 2011. **Applied Plastics Engineering Handbook**. 1<sup>st</sup> ed. Norwich : William Andrew.
- [69] Meissner, N. and Rzymiski, W.M. 2013. "Use of short fibers as a filler in rubber compounds." *Autex Research Journal*. 13(2) : 40-43.
- [70] กนกวรรณ ยันตะบุศย์ และพันชกานต์ แก้วอาษา. 2563. "สมบัติทางกายภาพของยางโฟมธรรมชาติเสริมแรงด้วยเส้นใยตาล: ผลของการทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายต่าง และปริมาณเส้นใย." *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 22(3) : 75-81.
- [71] Wu, H. Ortiz, R. Correa, R. D. Krifa, M. and Koo, J. H. 2018. "Self-Extinguishing and Non-Drip Flame Retardant Polyamide 6 Nanocomposite: Mechanical, Thermal, and Combustion Behavior." *Flame Retardancy and Thermal Stability of Materials*. 1(1) : 1-13.
- [72] Kengkhetkit, N. and Amornsakchai, T. 2012. "Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber." *Industrial Crops and Products*. 40(1) : 55-61.
- [73] ศูนย์ข้อมูลยางและไม้. 2558. **การใช้เส้นใยอะรามิดเพื่อการเสริมแรงของยาง**. [Online]. Available : <https://1th.me/ZLxpo>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [74] รังสิมา ชลคุป, รัตนา ตันตเทอดธรรม และสุชาดา อูชชิน. 2553. “การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตของเส้นใยสับประรดกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต.” หน้า 73-81. ใน **รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [75] ดริญญา มูลชัย, เกียรติภูมิ นามวิเศษ และครรชิต ดุมา. 2560. “อิทธิพลของสารก่อกองต่อสมบัติของโพลีเอทิลีนเทอร์พลาสต์ที่ใช้รับน้ำหนักน้ำมันเป็นสารตัวเติม.” หน้า 286-294. ใน **รายงานการประชุมทางวิชาการ ประจำปี 2560**. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [76] Phewthongin, N. Saeoui, P. and Sirisinha, C. 2004. “A study of rheological properties in sulfur-vulcanized CPE/NR blends.” *Polymer Testing*. 24(2) : 227-233.
- [77] Rajesh, C. Divia, P. Unnikrishnan, G. and Purushothaman, E. 2021. “Dynamic mechanical analysis of nylon 6 fiber-reinforced acrylonitrile butadiene rubber composites.” *Polymer and Polymer Composites*. 29(95) : 1328-1339.

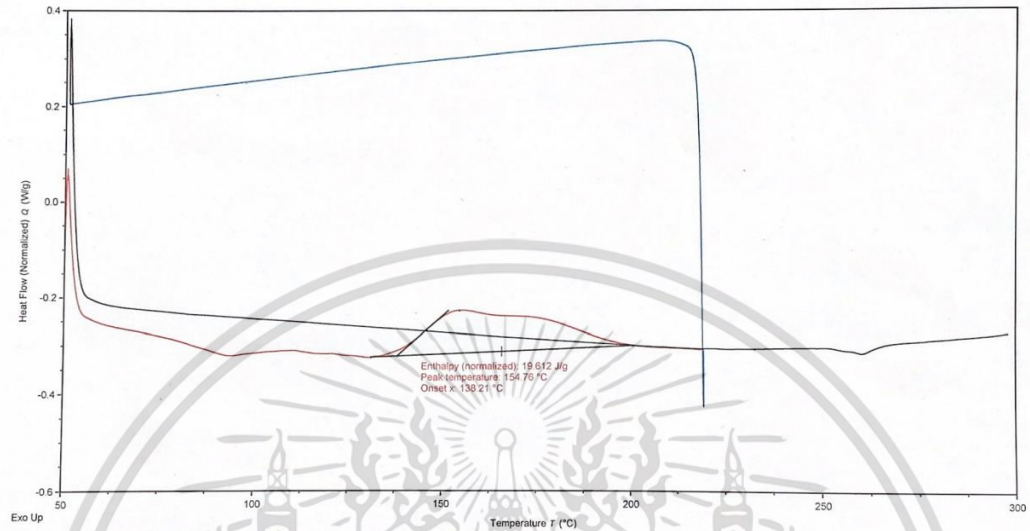
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



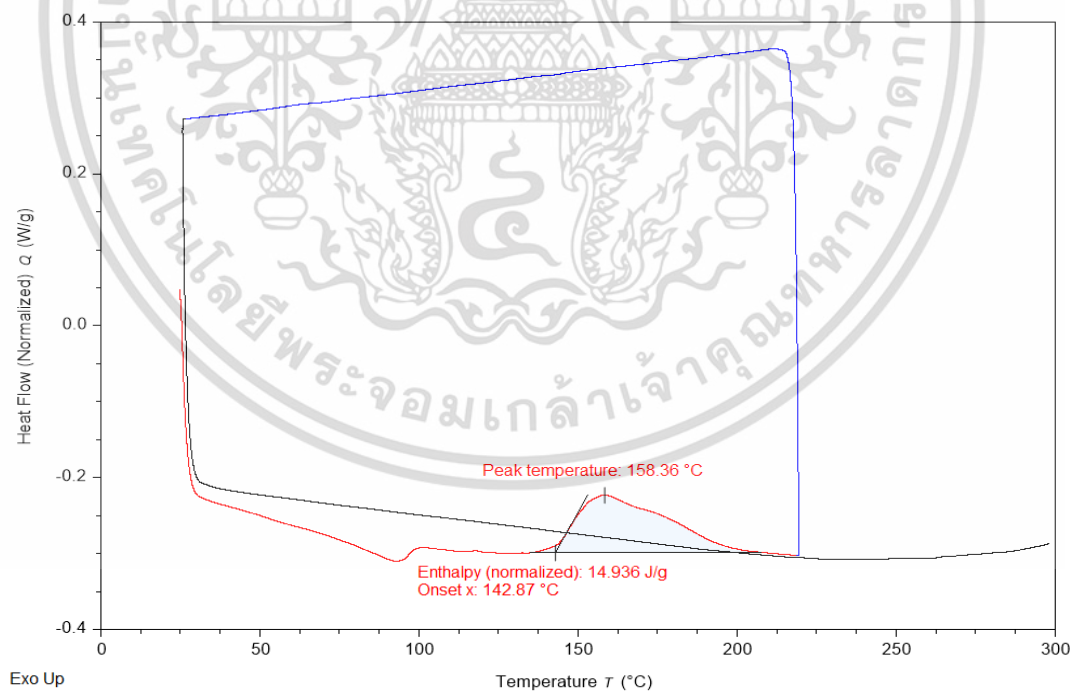
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของยางผสมสูตร WTF และ PALF



รูปที่ ก.1 กราฟ DSC ของ C30D2WTF6

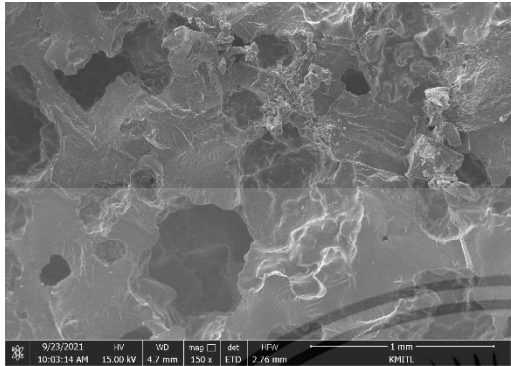


รูปที่ ก.2 กราฟ DSC ของ C30D2PALF6

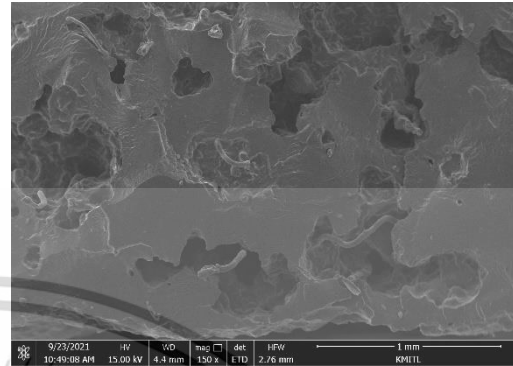
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของยางแผ่นยางน้ำขี้มที่เสริมแรงด้วยเส้นใย WTF



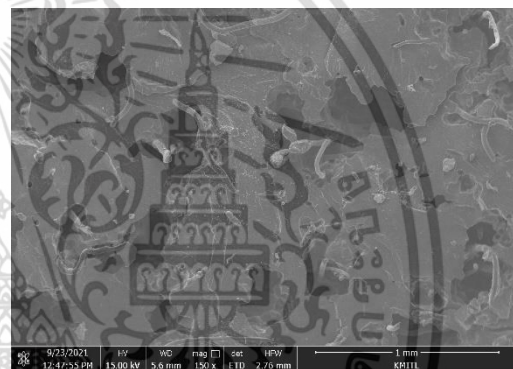
(a) C30D1F0



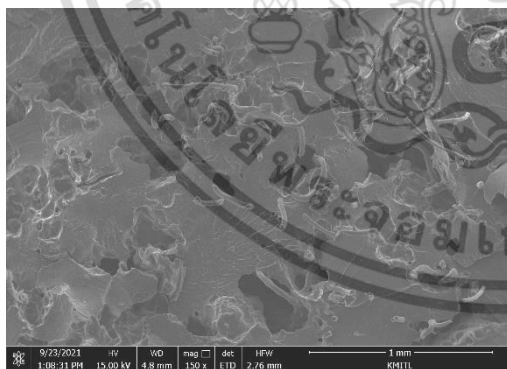
(b) C30D1WTF3



(c) C30D1WTF6



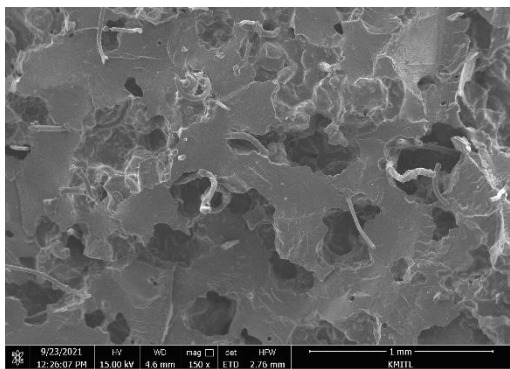
(d) C30D1WTF12



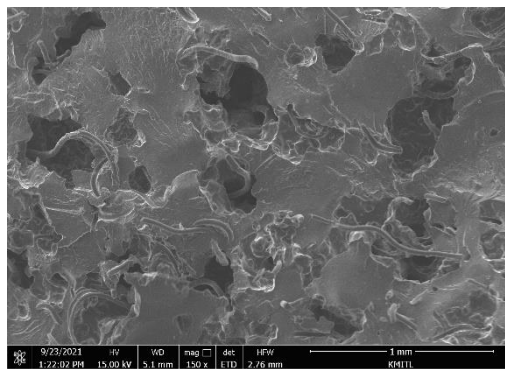
(e) C30D1WTF15

รูปที่ ข.1 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำขี้มที่เสริมแรงด้วย WTF และมีสารให้ฟอง 1 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



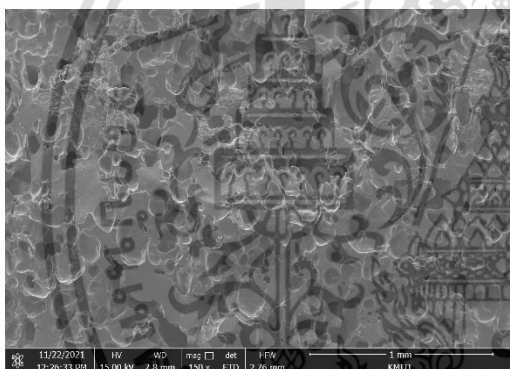
(a) C30D2WTF9



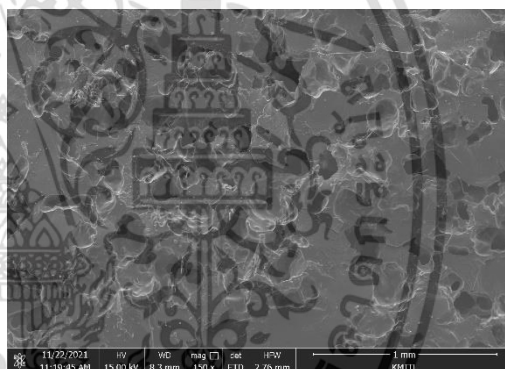
(b) C30D2WTF15

รูปที่ ข.2 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF และมีสารให้ฟอง 2 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า

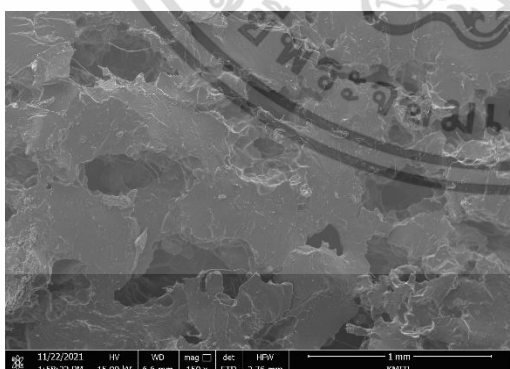
การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของยางแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย PALF



(a) C30D1PALF3



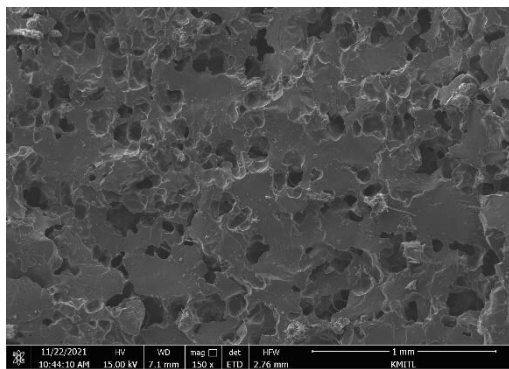
(b) C30D1PALF9



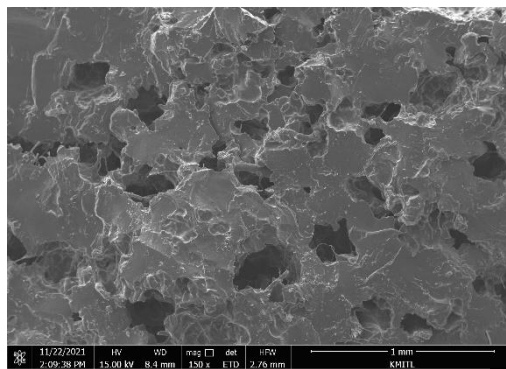
(c) C30D1PALF15

รูปที่ ข.3 สัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF และมีสารให้ฟอง 1 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) C30D2PALF9



(b) C30D2PALF15

รูปที่ ข.4 สันฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF และมีสารให้ฟอง 2 phr ที่กำลังขยาย 150 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 อัตราการซึมผ่านน้ำ ( $L/m^2/h$ ) ที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย WTF ที่ปริมาณสารให้ฟอง 1 และ 2 phr

ชั้นงาน	ความดันน้ำ (bar)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
D1F0	23.0±6.0	71.4±15.3	161.3±37.3	404.7±90.3	-
D1WTF3	17.8±4.7	53.5±13.1	133.3±34.2	330.1±96.3	-
D1WTF6	14.8±1.1	26.4±5.2	45.3±23.2	107.6±11.1	-
D1WTF9	10.1±3.2	19.9±8.0	58.4±28.7	152.9±68.1	363.4±208.7
D1WTF12	6.5±2.0	17.5±1.9	54.2±17.6	125.6±41.7	263.6±101.9
D1WTF15	4.9±1.3	14.8±3.4	47.9±6.6	141.6±8.2	-
D2F0	24.6±6.5	79.4±27.3	235.6±58.9	742.5±186.8	-
D2WTF3	20.7±2.8	65.2±12.6	214.8±34.7	613.3±139.2	-
D2WTF6	14.5±1.2	49.8±6.0	126.2±15.4	349.9±35.8	-
D2WTF9	13.9±2.0	25.2±3.1	67.4±7.5	187.9±25.1	-
D2WTF12	9.5±1.8	22.5±4.0	41.5±4.7	77.9±18.2	350.2±60.0
D2WTF15	5.0±1.5	17.5±7.4	53.2±23.2	163.6±70.0	426.4±192.7

ตารางที่ ค.2 อัตราการซึมผ่านน้ำ ( $L/m^2/h$ ) ที่ความดันน้ำต่าง ๆ ของแผ่นยางน้ำซึมเสริมแรงด้วย PALF ที่ปริมาณสารให้ฟอง 1 และ 2 phr

ชั้นงาน	ความดันน้ำ (bar)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
D1PALF3	3.4±0.3	8.1±4.7	13.2±2.6	47.2±16.9	137.7±89.5
D1PALF6	3.6±0.2	4.5±1.5	5.0±1.2	10.8±2.5	31.6±5.6
D1PALF9	2.7±0.3	5.4±0.5	6.8±1.4	11.4±1.3	22.3±3.6
D1PALF12	2.5±1.5	3.7±0.8	4.5±1.5	7.6±4.4	16.0±11.2
D1PALF15	1.0±0.2	1.3±0.4	2.2±0.8	3.9±1.1	5.9±1.8
D2PALF3	4.6±1.7	8.8±2.5	20.1±4.2	67.2±8.7	260.2±27.4
D2PALF6	3.7±1.7	6.3±1.2	8.7±2.0	20.2±7.6	48.0±23.6
D2PALF9	2.8±0.6	6.4±0.9	8.7±2.0	14.9±2.6	33.6±11.7
D2PALF12	2.5±1.5	3.8±0.8	4.7±0.8	8.4±2.4	24.5±21.1
D2PALF15	1.8±0.4	3.5±0.3	6.3±1.5	11.3±4.4	30.1±11.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

การหาความยาวท่อขายน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ความถ่วงจำเพาะของท่อขายน้ำซึมน้ำหนัก} &= 0.900 \\
 \text{ปริมาตรของท่อขายน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัม} &= 1000/0.900 \\
 &= 1111.111 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\
 \text{เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในท่อขายน้ำซึมน้ำหนักเท่ากับ} & 1.75 \text{ และ } 1.11 \text{ เซนติเมตร ตามลำดับ} \\
 \text{ปริมาตรของท่อขายน้ำซึมน้ำหนักยาว 1 เมตร} &= \pi(r_1^2 - r_2^2)h \\
 &= \pi(0.875^2 - 0.555^2) \times 100 \\
 &= 143.76 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\
 \text{ท่อขายน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัม มีความยาว} &= 1111.111/143.76 \\
 &= 7.73 \text{ เมตร}
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณค่าไฟฟ้าและแรงงานผลิตท่อยางน้ำซึมที่มีความยาว 1 กิโลเมตร

ยางผสมสูตรหนัก 200 กิโลกรัม ใช้เวลาในกระบวนการผสม	=	1 ชั่วโมง
ยางผสมสูตรหนัก 1 กิโลกรัม ใช้เวลาในกระบวนการผสม	=	(1×1)/200
	=	0.005 ชั่วโมง
การขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม 60 กิโลกรัม ใช้เวลาในกระบวนการอัดรีด	=	1 ชั่วโมง
การขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม 1 กิโลกรัม ใช้เวลาในกระบวนการอัดรีด	=	(1×1)/60
	=	0.017 ชั่วโมง
การเชื่อมโยงท่อยางน้ำซึม 7.8 กิโลกรัม ใช้เวลาในเตาอบลมร้อน	=	1 ชั่วโมง
การเชื่อมโยงท่อยางน้ำซึม 1 กิโลกรัม ใช้เวลาในเตาอบลมร้อน	=	(1×1)/7.8
	=	0.128 ชั่วโมง
ดังนั้น กระบวนการผลิตท่อยางน้ำซึม 1 กิโลเมตร ใช้เวลา = 0.005+0.017+0.128 = 0.15 ชั่วโมง		
ค่าแรงงาน 350 บาท/วัน (1 วัน = 8 ชั่วโมง)		
ดังนั้น ค่าแรงงานของกระบวนการผลิตท่อยางน้ำซึม 0.15 ชั่วโมง	=	0.15 ×43.75
	=	6.56 บาท
ค่าไฟฟ้า 1 หน่วย เท่ากับ 4.2 บาท ( 1 ชั่วโมง =25 หน่วย)		
ดังนั้น ค่าไฟฟ้าของกระบวนการผสมและขึ้นรูป 0.15 ชั่วโมง	=	0.15×25
	=	3.75 หน่วย
	=	3.75×4.2
	=	15.75 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวมนทิชา จันทรปัญญา
วัน เดือน ปีเกิด	20 ธันวาคม พ.ศ. 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	162/21 หมู่ 5 ต. แพรกษา อ. เมืองฯ จ. สมุทรปราการ 10280
ประวัติการศึกษา	2561 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.68 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2565 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ เกรดเฉลี่ย 3.88 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา
ผลงานทางวิชาการ	Junpunya, M. Ou-udomying, B. Amornsakchai, T. and Jangchud I. 2022. "Study of porous rubber pipes reinforced with waste tire fiber and pineapple leaf fiber for smart irrigation system." <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> . 1234 : 012004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้