

การศึกษาท่อน้ำซึมชนิดกลิ่นน้อยเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในเมือง

STUDY OF LOW ODOR POROUS RUBBER PIPE FOR
URBAN AGRICULTURE



ภาวิตา ขุนตาแก้ว
PAWITA KHUNTAKAEW

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2567

KMITL-2024-SC-M-012-063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF LOW ODOR POROUS RUBBER PIPE FOR
URBAN AGRICULTURE



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

2024

KMITL-2024-SC-M-012-063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาท่อยางน้ำซึมชนิดกึ่งนํ้าซึมชนิดกึ่งนํ้าซึมเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในเมือง
ชื่อนักศึกษา	นางสาวภาวิตา ขุนตาแก้ว
รหัสนักศึกษา	64605145
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีประยุกต์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

ขยะจากผลิตภัณฑ์ยางเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมร้ายแรงระดับโลกที่ต้องการการแก้ไขจากโครงสร้างเทอร์โมเซต ซึ่งแนวโน้มโลกนั้นมุ่งสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน คือการใช้ทรัพยากรโลกอย่างคุ้มค่ารวมถึงการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างรู้คุณค่า งานวิจัยนี้ตอบโจทย์ดังกล่าวด้วยการนำผงยางที่ได้จากขยะยางสังเคราะห์เอทิลีนพโรพิลีนไดอีน (Ground ethylene propylene diene rubber, G-EPDM) และผงยางรถยนต์ (Ground tire rubber, GTR) มาขึ้นรูปให้เป็นท่อยางน้ำซึมชนิดกึ่งนํ้าซึม เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำแบบแม่นยำร่วมกับระบบเกษตรอัจฉริยะ ตอบโจทย์อนาคตที่มีการปลูกพืชในเมือง โดยในงานวิจัยนี้มีการใช้เมทริกซ์เป็นยางอีพดีเอ็ม (EPDM) เชื่อมโยงโดยใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ และมีการใช้สารให้ฟองเอโซโดคาร์บอนาไมด์ชนิดปรับปรุง เพื่อใช้ให้เกิดโครงสร้างแบบเซลล์เปิด ผสมยางคอมปาวด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) จากนั้นทำการขึ้นรูปแผ่นยางน้ำซึมด้วยเครื่องผสมชนิดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) เพื่อเป็นแบบจำลอง (Model study) มีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อยางน้ำซึม ได้แก่ เวลาในการเชื่อมโยง อัตราส่วนของยาง EPDM:G-EPDM (50:50, 60:40 และ 70:30 ตามน้ำหนัก) ชนิดของผงยาง (ผงยาง G-EPDM และ ผงยาง GTR) โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา อัตราการซึมผ่านน้ำ ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) และศึกษากลิ่น จากการทดสอบพบว่าเวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ 55 นาทีในทุกอัตราส่วนของยาง:ผงยางที่ศึกษา เมื่อปริมาณผงยางมากขึ้นส่งผลให้ค่าความหนาแน่นและความหนืดสูงขึ้น ชิ้นงานจึงสามารถเกิดรูพรุนแบบปิดที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้มีความสามารถในการซึมผ่านน้ำได้ดี และเมื่อปริมาณผงยางมากขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ต่อมามีการศึกษาสูตรผสมที่มีอัตราส่วน 50:50 โดยเปรียบเทียบระหว่างผงยาง G-EPDM และผง GTR พบว่าสมบัติเชิงกลของตัวอย่างทั้งสองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ พบว่าตัวอย่างที่ใช้ผง GTR สามารถทนต่อความดันน้ำได้ดีกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสูตรที่ใช้ผง G-EPDM มีช่องว่างระหว่างผงยางใหญ่กว่าผงยาง GTR ทำให้มีโอกาสน้ำที่น้ำพุ่งที่แรงดันน้ำสูงมากกว่า จากการทดสอบความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ที่ 100 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง พบว่าแนวโน้มของสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการทดสอบใกล้เคียงกันทั้งสูตรที่ใช้ผงยาง G-EPDM และผง GTR เนื่องจากโครงสร้างหลักของเนื้อยาง EPDM มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากสภาพแวดล้อมและความร้อนได้ดี ชนิดผงยางไม่มีผลต่อสมบัติการเสื่อมสภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองความสามารถในการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมสูตรที่มีอัตราส่วน 50:50 ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวเชิงพาณิชย์ โดยเปรียบเทียบระหว่างผงยาง G-EPDM และผง GTR พบว่าทั้งสองสูตรเกิดการยุบตัวและเสียรูปหลังการเชื่อมโยง เกิดจากปริมาณความหนาแน่นของพันธะที่เชื่อมโยงหลังกระบวนการวัลคาไนซ์อาจไม่เพียงพอเพื่อรักษารูปร่างของท่อให้คงรูป และการเชื่อมโยงที่ช้าสำหรับเทคนิคการขึ้นรูปแบบอัดรีด ทำให้ไม่สามารถคงรูปได้ทัน จากการศึกษากลิ่นของท่อยางน้ำซึมโดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ใช้ยางรีเคลมและผงยางรถยนต์ (RR:GTR) กับสูตรที่ใช้ยาง EPDM จากการใช้แบบสอบถามทั้งหมด 20 คน พบว่ากลิ่นของยางสูตร RR:GTR อยู่ในเกณฑ์ที่รุนแรง แต่สูตรที่ใช้ยาง EPDM มีกลิ่นค่อนข้างจาง โดยยืนยันผลของกลิ่นจากการทดสอบ Headspace GC-MS โดยพบว่าท่อยางสูตร EPDM พบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) ที่ส่งกลิ่นเพียงตัวเดียว คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่พบในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับท่อยางสูตร RR:GTR ที่พบ VOCs ที่ส่งกลิ่นที่รุนแรงหลายชนิด ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน ไซลีน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ไดเมทิลซัลไฟด์ สรุปได้ว่าท่อยางน้ำซึมสูตรใหม่ในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ที่อาจจะต้องปรับระบบการเชื่อมโยงให้เหมาะสมกับเครื่องผลิตจริง

คำสำคัญ : กลิ่นน้อย, การเกษตรในเมือง, ขยะยาง, ท่อยางน้ำซึม, ยางอีพีเอ็ม

Thesis title	Study of Low Odor Porous Rubber Pipe for Urban Agriculture
Student name	Pawita Khuntakaew
Student ID	64605145
Degree	Master of Science (Applied Chemistry)
Department	Chemistry
Year	2024
Thesis advisor	Associate Professor Dr. ittipol jangchud

Abstract

Waste from rubber products is one of the most significant global environmental challenges due to crosslinked thermosetting structures. The global trend has been moving towards sustainable development, including efficient use of natural resources and water. This research addresses these issues by utilizing ground ethylene propylene diene rubber waste (G-EPDM) and ground tire rubber waste (GTR) to produce low-odor porous rubber pipes for precise irrigation in smart agriculture, especially urban agriculture. In this research, EPDM rubber was used as a matrix, crosslinked with a peroxide system. A modified azodicarbonamide blowing agent was incorporated to create an open cell structure. Rubber compounds were mixed using an internal mixer and shaped into porous rubber sheets as a model study using a two roll mill. Factors affecting sample properties were studied, such as curing time, ratios of EPDM rubber/G-EPDM (50:50, 60:40, and 70:30 by weight), and types of rubber powders (G-EPDM and GTR). Properties of porous pipes were investigated including physical properties, mechanical properties, morphology, water permeability, aging resistance and odor. It was found that an optimal curing time for all studied rubber powder ratios was 55 minutes. As the ratio of rubber powder increased, both density and viscosity were increased, leading to smaller closed pores and thus improving water permeability. Increased rubber powder also enhanced the overall mechanical properties. By comparing 50:50 formulation using G-EPDM and GTR rubber powders,

it revealed that the mechanical properties of both samples were similar. However, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

when testing water permeability, the samples using GTR demonstrated better resistance to water pressure. This was due to the formulation with G-EPDM having larger gaps between the rubber particles, making the pores more susceptible to tearing and increasing the chance of water leakage under high water pressure. From aging test at 100 °C for 70 hr, mechanical properties before and after aging were insignificantly different for both G-EPDM and GTR samples. This can be attributed to the inherent durability of the EPDM rubber structure against environmental and thermal aging. Types of rubber powders had no impact on aging resistance properties. In this work, feasibility for real rubber pipe production was also studied using a commercial single-screw extruder. Unfortunately, rubber pipes collapsed after curing due to the degree of crosslinking may not enough to maintain dimensional stability, hence leading to collapse at processing temperature, combined with slow crosslinking. By using questionnaire and GC-MS, odor of porous rubber pipes were studied. From 20 participants survey, it was found that the odor of rubber pipe in this work was minimal. By comparing the new pipe with the previous reclaimed rubber pipe, it was found that the reclaimed one produced a strong offensive odor, whereas the EPDM pipe had a relatively faint smell. By using GC-MS head-space technique, it was found that the EPDM emitted only a trace amount of volatile organic compound (VOC) and sulfur dioxide. In contrast, the RR:GTR pipes contained multiple VOCs with strong and potentially hazardous odors, including benzene, toluene, xylene, sulfur dioxide, and dimethyl sulfide. In conclusion, new low-odor porous rubber pipes in this work showed high potential for commercial production. However, minor adjustment to the curing system is needed for actual manufacturing equipment.

Keywords : Low odor, Urban agriculture, Rubber waste, Porous rubber pipe, EPDM rubber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา ตลอดจนเสนอแนะแนวทาง แก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการ รศ.ดร.สมบัติ ธีระวันต์ และผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ที่กรุณา สละเวลาให้คำแนะนำ และตรวจทาน แก่ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่อง เครื่องมือ อุปกรณ์ และ สารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงบุคลากรในบริษัทที่ให้ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็น ประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณบุญหาญ อู่อุดมยิ่ง บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ เรื่อง เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้ในด้านปฏิบัติการทดลองงานวิจัย รวมถึงบุคลากรในบริษัทที่ให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณบริษัท สมบูรณ์ แอนด์ เอส.พี รับเบอร์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ สำหรับ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม และให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท แมกซ์เวลล์ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุพิมพ์ยาง ที่ใช้ สำหรับในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัท เอ. เอฟ. ซุปเปอร์เซลล์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารให้ฟอง ที่ใช้สำหรับ ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอำนวยความสะดวกใน เรื่องอุปกรณ์ และอาคารสถานที่สำหรับปฏิบัติ รวมทั้งคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ เพื่อให้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้บริการในการตรวจวิเคราะห์ชิ้นงาน

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว และขอบคุณเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความ ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจสำคัญตลอดการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา ซึ่งผู้เขียนไม่สามารถ กล่าวนามในที่นี้ได้ทั้งหมด หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวภาวิดา ขุนตาแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM)	10
2.1.1 สมบัติโดยทั่วไปของยาง EPDM	12
2.1.2 การประยุกต์ใช้งานของยาง EPDM	12
2.2 ผงยาง	12
2.2.1 วิธีการบดยาง	14
2.2.2 การใช้ประโยชน์ผงยาง	14
2.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง	15
2.3.1 สารเชื่อมโยง	15
2.3.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน	16
2.3.1.1.1 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง	17
2.3.1.1.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง	18
2.3.1.2 การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์	19
2.3.1.2.1 โคเอเจนต์	20
2.3.2 สารตัวเติม	21
2.3.2.1 เหม่าดำ	22
2.3.2.1.1 สมบัติเหม่าดำที่มีผลต่อยางของยาง	22
2.3.2.2 ซิลิกา	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2.3 ดินขาว	23
2.3.2.4 แคลเซียมคาร์บอเนต	23
2.3.2.5 Sillitin Z 86	24
2.3.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ	24
2.3.3.1 สารแอนติออกซิแดนท์	25
2.3.3.2 สารแอนติไฮโซแนนท์	26
2.3.4 พลาสติกไฮเซอรั	26
2.3.5 สารให้ฟอง	27
2.3.6 คิกเกอร์	29
2.4 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)	29
2.4.1 ประเภทของ VOCs แบ่งออกตามลักษณะของโมเลกุล	29
2.4.2 ผลกระทบที่เกิดจาก VOCs	30
2.4.3 การปลดปล่อย VOCs จากผลิตภัณฑ์ยาง	30
2.4.4 การตรวจวิเคราะห์กลิ่นจาก VOCs	31
2.5 การเกษตรในเมือง	32
2.5.1 ตัวอย่างรูปแบบการเกษตรในเมือง	32
2.5.2 ข้อจำกัดของการทำเกษตรในเมือง	34
2.6 ท่อยางน้ำซึม	35
2.6.1 รูปแบบการใช้งานท่อยางน้ำซึม	36
2.7 การเกษตรอัจฉริยะ	35
2.7.1 องค์ประกอบของการเกษตรอัจฉริยะ	37
2.7.1.1 การเกษตรแบบแม่นยำ (Precision agriculture)	37
2.7.1.2 Internet of Things (IoT)	37
2.7.1.3 การใช้เซ็นเซอร์ และ RFID	38
2.8 ท่อยางน้ำซึมที่ผลิตในเชิงพาณิชย์	39
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	47
3.1 แผนการดำเนินงาน	47
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	49
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 วิธีการทดลอง	53
3.4.1 การผสมสูตรยาง	53
3.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานและเวลาการเชื่อมโยง	53
3.4.3 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อยางน้ำซึม	54
3.4.3.1 ศึกษาเวลาเชื่อมโยงที่เหมาะสม	54
3.4.3.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างยาง EPDM:ผงยาง EPDM	54
3.4.3.3 ผลของชนิดผงยาง	55
3.4.3.4 ผลของชนิดผงยาง G-EPDM และ ผงยาง GTR ที่ส่งผลต่อสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)	55
3.4.4.5 ผลของการขึ้นรูปเป็นท่อยางน้ำซึมระหว่างผงยาง G-EPDM และ ผงยาง GTR	55
3.4.4 การทดสอบและวิเคราะห์	56
3.4.4.1 วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงยางแต่ละชนิด	56
3.4.4.2 การทดสอบการเชื่อมโยงยาง	56
3.4.4.3 การทดสอบความหนืดมูนนี่	56
3.4.4.4 การทดสอบความหนาแน่น	56
3.4.4.5 การทดสอบสมบัติรับแรงดึง	56
3.4.4.6 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด	57
3.4.4.7 การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์	58
3.4.4.8 การศึกษาสัณฐานวิทยา	58
3.4.4.9 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)	58
3.4.4.10 การบันทึกกลิ่นจากบุคคลที่อยู่ในบริเวณที่ขึ้นรูปจำนวน 20 คน	58
3.4.4.11 วิเคราะห์ VOCs โดยเทคนิค Headspace GC-MS	58
3.4.4.12 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	60
4.1 วิเคราะห์อนุภาคของผงยางแต่ละชนิด	60
4.1.1 วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงยางแต่ละชนิด (Sieve analysis)	61
4.1.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผงยางแต่ละชนิด	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ศึกษาสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสม และปริมาณอัตราส่วน ของยาง EPDM ต่อผง G-EPDM	64
4.3 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดผงยาง G-EPDM และผงยาง GTR	75
4.3.1 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดผงยาง G-EPDM และ ผงยาง GTR โดยศึกษาการทดสอบสมบัติความทนทาน ต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)	78
4.4 ศึกษาการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม	79
4.5 ศึกษากลิ่นของท่อยางน้ำซึม	81
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปผลงานวิจัย	85
5.2 ข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก ก	97
ภาคผนวก ก	98
ภาคผนวก ข	99
ภาคผนวก ค	102
ภาคผนวก ง	104
ภาคผนวก จ	106
ประวัติผู้เขียน	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปของยาง EPDM	13
2.2 ตัวอย่างสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์	20
2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky pipe systems	40
2.4 ข้อมูลความดันในการใช้งาน ปริมาณน้ำ และราคาท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า	41
3.1 สมบัติบางประการของยาง EPDM เกรด Vistalon 5601	50
3.2 สมบัติบางประการของสารตัวเติม Sillitin Z 86 ($\text{SiO}_2\text{Al}[(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5]$)	50
3.3 สูตรที่ใช้ศึกษาปัจจัยต่างๆ	52
4.1 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของผงยาง G-EPDM และผงยาง GTR	63
4.2 แสดงสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างสูตรที่อัตราส่วน 50:50 ของ EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR	76
4.3 แสดงสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันระหว่างสูตรที่อัตราส่วน 50:50 ของ EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR ก่อนและหลังทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 จำนวนการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกและแนวโน้มการใช้ทรัพยากรน้ำ	1
1.2 เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals : SDGs) 17 ข้อ	3
1.3 แสดงลักษณะของท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe)	4
1.4 a) แผนภาพระบบเศรษฐกิจเส้นตรง และ b) แผนภาพระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน	5
1.5 a) ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) b) ผงยาง	6
1.6 a) สวนแนวตั้ง (Vertical garden) และ b) สวนแขวนเพดาน (Ceiling garden)	7
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPM	10
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM (มอนอเมอร์ชนิดที่ 3 คือ 1,4 Hexadiene)	10
2.3 โครงสร้างไดอินที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยาง EPDM	
a) 5-ethylidene-2-norbornene (ENB) b) Dicyclopentadiene (DCPD)	
c) 1,4-hexadiene (1,4 HD)	11
2.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง EPDM	12
2.5 ลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ	22
2.6 โครงสร้างของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ)	28
2.7 การปลูกพืชในเรือนกระจก (Greenhouses)	33
2.8 การปลูกพืชแนวตั้ง (Vertical garden)	33
2.9 สวนแขวนเพดาน (Ceiling garden)	34
2.10 ท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe)	35
2.11 ตัวอย่างการใช้งานท่อยางน้ำซึม	36
2.12 การใช้ IoT เพื่อการเกษตร	38
2.13 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท กสิพันธ์รัตน์ จำกัด	39
2.14 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท Leaky pipe systems จำกัด	40
2.15 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท LBS global จำกัด	41
3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของแผ่นยางน้ำซึม	48
3.2 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของท่อยางน้ำซึม	49
3.3 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึม	59
4.1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ a) แผ่นยางน้ำซึม และ b) ท่อยางน้ำซึม	61
4.2 แสดงกระบวนการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงยางโดยตะแกรงร้อน	62
4.3 รูปถ่ายผงยางที่ใช้ในงานวิจัยบนกระดาษกราฟขนาดช่อง 1 มม. a) ผงยาง G-EPDM	
b) ผงยาง GTR	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.4 การกระจายขนาดของผงยาง G-EPDM และ GTR	63
4.5 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของผงยางที่กำลังขยาย 150 เท่า a) G-EPDM b) GTR	64
4.6 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	65
4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	66
4.8 ค่าความหนืดมูนนี่ยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ที่อัตราส่วนที่ต่างกัน	66
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล	67
4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	68
4.11 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	68
4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	69
4.13 ค่าความแข็งแรงชอร์ OO ของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	69
4.14 ค่ามอดูลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด (M20) ของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	70
4.15 ค่ามอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยึด (M100) ของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน	71
4.16 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำขี้มของยางผสมสูตรที่ใช้อัตราส่วนของ EPDM:G-EPDM ที่ต่างกัน ที่เวลาการเชื่อมโยง 55 นาที a) 50:50 b) 60:40 c) 70:30	72
4.17 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดันต่างกันของแผ่นยางน้ำขี้มของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ใช้เวลาการเชื่อมโยง 55 นาที	72
4.18 แบบจำลองของระบบคอมโพสิตแผ่นยางน้ำขี้ม a) ปริมาณผงยางมาก b) ปริมาณผงยางน้อย	73
4.19 ลักษณะของน้ำที่ซึมผ่านแผ่นยางน้ำขี้มที่อัตราส่วนยาง EPDM:G-EPDM a) 50:50 b) 70:30	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.20 แบบจำลองลักษณะของน้ำที่ซึมผ่านแผ่นยางน้ำซึมที่อัตราส่วนยาง EPDM:G-EPDM a) 50:50 b) 70:30	74
4.21 แสดงสัณฐานวิทยาของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที	75
4.22 แผนภาพแสดงขนาดรูระหว่างผองของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR	76
4.23 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที	77
4.24 ท่อยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ EPDM:G-EPDM อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที	80
4.25 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที	80
4.26 แสดงผลสรุปคะแนนจากแบบสอบถามเรื่องกลิ่นของท่อยางทั้ง 3 ชนิด	81
4.27 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของท่อยางน้ำซึมสูตรยางรีเคลม และผองยางรถยนต์ (RR:GTR)	83
4.28 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของท่อยางน้ำซึมสูตร EPDM:G-EPDM	84
ก.1 Cure curve ของยางสูตรผสมระหว่างยาง EPDM:G-EPM	98
ข.1 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 200 เท่าของผองยาง a) G-EPDM และ b) GTR	99
ข.2 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2,000 เท่าของผองยาง a) G-EPDM และ b) GTR	100
ข.3 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 120 เท่าของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตร ที่ไม่ใส่สารให้ฟอง a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที	101
ค.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 50:50 โดยไม่มีสารเติมสารให้ฟอง	102
ค.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 50:50 เติมสารให้ฟอง	102
ค.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 60:40 เติมสารให้ฟอง	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

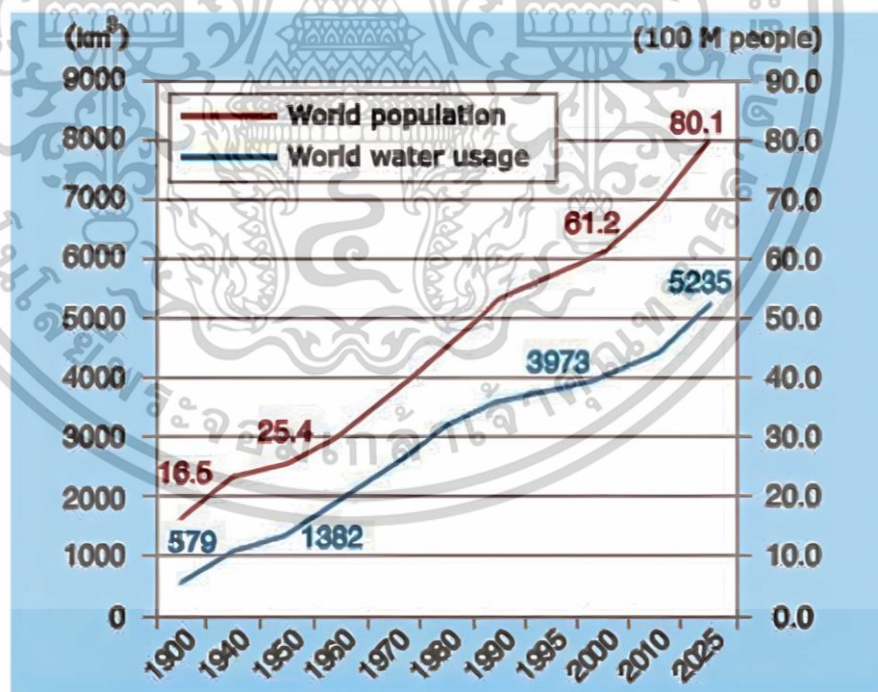
	หน้า
ค.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 70:30 เติมสารให้ฟอง	103
ง.1 ตัวอย่างแบบสอบถามเรื่องกลิ่นของตัวอย่างทั้งสามชนิดได้แก่ ชนิดที่ 1 ตัวอย่างสูตร RR:GTR ชนิดที่ 2 คือ ตัวอย่างสูตร EPDM:G-EPDM และชนิดที่ 3 คือตัวอย่างสูตร EPDM:GTR	104
ง.2 แผนภาพสรุปข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมด 20 คน a) ช่วงอายุ b) เพศ c) อาชีพ d) ประสบการณ์เกี่ยวกับยาง e) ปัญหาสุขภาพ	105
จ.1 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของตัวอย่างน้ำซึมสูตรยางรีเคลม และผงยางรถยนต์ (RR:GTR)	106
จ.2 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของตัวอย่างน้ำซึมสูตร EPDM:G-EPDM	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

องค์การสหประชาชาติ (United nations, UN) เผยรายงานคาดการณ์จำนวนประชากรโลกจะเพิ่มขึ้นสูงกว่า 9.7 พันล้านคนภายในปีค.ศ. 2050 และอาจเพิ่มขึ้นสูงถึง 1.1 หมื่นล้านคนภายในปีค.ศ. 2100 [1] ซึ่งส่งผลให้แนวโน้มความต้องการบริโภคอาหารเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 60 เมื่อเทียบกับสถานการณ์ปัจจุบัน ภาคการเกษตรจึงจำเป็นต้องใช้น้ำในปริมาณมากขึ้นจากเดิมกว่าร้อยละ 70 [2] อีกทั้งในปัจจุบันอุณหภูมิของโลกสูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) จึงส่งผลให้เกิดการแปรปรวนของอากาศ เช่น ฝนไม่ตกตามฤดูกาล ฝนตกมากกว่าปกติ อากาศร้อนจัด และความแห้งแล้งยาวนาน [3] ดังนั้นต้องมีการบริหารจัดการน้ำอย่างเหมาะสม เพื่อใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างคุ้มค่าที่สุด แก้ไขปัญหาน้ำท่วมและปัญหาภัยแล้ง สามารถใช้น้ำได้อย่างเพียงพอต่อจำนวนประชากรโลกในอนาคต



รูปที่ 1.1 จำนวนการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกและแนวโน้มการใช้ทรัพยากรน้ำ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการทำเกษตรในปัจจุบันไม่สามารถให้ผลผลิตที่เพียงพอต่อจำนวนประชากรโลก เนื่องด้วยความต้องการบริโภคผลผลิตทางเกษตรที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่เพาะปลูกของโลกมีแนวโน้มคงที่ [5] ด้วยเหตุนี้โลกจึงพยายามที่จะขับเคลื่อนวิสัยทัศน์เพื่อให้บรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable development goals, SDGs) แสดงดังรูปที่ 1.2 ซึ่งเป็นเป้าหมายการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน 17 ข้อ จากองค์การสหประชาชาติ (United nations) เพื่อเป็นแนวคิดพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมรวมทั้งการดำเนินธุรกิจยุคปัจจุบันและอนาคต SDGs มีวัตถุประสงค์เพื่อยุติความยากจน ตระหนักถึงความเป็นอยู่ในสังคม และสภาพสิ่งแวดล้อม โดยมีการผลักดันทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชน เพื่อเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน [6] ดังนั้นในภาคการเกษตรนั้นการทำเกษตรอัจฉริยะ (Smart farming) จึงเป็นบทบาทที่เกิดความน่าสนใจเพิ่มขึ้น กล่าวคือ เกษตรอัจฉริยะ เป็นการนำเกษตรสมัยใหม่ที่ประยุกต์ใช้ Internet of Things (IoT) ผสมผสานเทคโนโลยีเข้ามาบริหารจัดการระบบการเพาะปลูก เช่น หุ่นยนต์ เครื่องจักร และเซ็นเซอร์เครือข่ายอัจฉริยะ เป็นต้น ซึ่งให้ความสำคัญกับการทำเกษตรที่มีความแม่นยำสูง (Precision farming) โดยเน้นการทำเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม มีการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้คุ้มค่าที่สุด การใช้ระบบอัตโนมัติและอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจสอบและควบคุม เพื่อเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิต ช่วยลดต้นทุนการผลิต มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคและมีความยั่งยืน [7]

เมืองอัจฉริยะ (Smart city) ยังเป็นหนึ่งในการเปลี่ยนแปลงแห่งโลกอนาคต เนื่องจากจำนวนประชากรบนโลกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมืองขนาดใหญ่แบบมหานคร (Mega urban city) มีจำนวนมากขึ้นในอีก 15 ปีข้างหน้า และจากสถิติเฉลี่ยในปัจจุบัน มีผู้อยู่อาศัยในเมืองใหญ่ราว 55% ในขณะที่ 45% อาศัยอยู่นอกเขตเมืองโดยในอีก 30 ปีข้างหน้า คาดว่าสัดส่วนผู้อยู่อาศัยในเมืองใหญ่จะเพิ่มเป็น 68% สำหรับประเทศไทย ส่งผลให้มีการพัฒนาเมืองใหญ่ และการเตรียมการในด้านต่าง ๆ เพื่อรับมือต่อสถานการณ์ ซึ่งเมืองอัจฉริยะนั้นเป็นเมืองที่พัฒนาโดยใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัยมาปรับใช้ในการจัดการเมือง ลดการใช้งานทรัพยากรที่ไม่จำเป็น ลดมลภาวะทำให้เมืองเติบโตอย่างยั่งยืน และเพื่อให้ประชาชนในเมืองมีคุณภาพชีวิตที่ดี โดยหนึ่งในปัจจัยในการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ คือ สิ่งแวดล้อมอัจฉริยะ (Smart environment) เป็นการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยบริหารจัดการสิ่งแวดล้อม ลดมลภาวะอย่างเป็นระบบ เช่น การจัดการน้ำ ขยะของเสีย เป็นต้น [8, 9]




รูปที่ 1.2 เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable development goals : SDGs) 17 ข้อ [10]

ท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe) เป็นนวัตกรรมหนึ่งที่สามารถให้น้ำกับพืชได้ตลอดแนวรูพรุนของท่อ แสดงดังรูปที่ 1.3 โดยปรับอัตราการไหลของน้ำและความสม่ำเสมอของการให้น้ำได้ในปริมาณความต้องการของพืชแต่ละชนิดผ่านการควบคุมความดันน้ำ เป็นการใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างคุ้มค่า สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำเพื่อการเกษตรแบบแม่นยำอัจฉริยะได้ เพื่อช่วยให้เกษตรกรสามารถให้น้ำกับพืชที่ปลูกได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการให้น้ำด้วยท่อยางน้ำซึมนั้นจะประหยัดกว่าการให้น้ำแบบแรงดันน้ำ (Sprinkler) หลายเท่า อีกทั้งตัวท่อยางยังมีความยืดหยุ่นแข็งแรงทนทาน สามารถปรับวางให้เหมาะสมกับลักษณะพื้นที่บริเวณที่ต้องการปลูกพืชได้ ใช้ได้ทั้งบนดินและฝังใต้ดิน ช่วยในการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสมบัติดังกล่าวข้างต้นของท่อยางน้ำซึมมีข้อดีกว่าท่อน้ำซึมที่ทำจากพลาสติกที่สามารถแตกหักได้เมื่อได้รับแรงกระทำและมีปัญหาด้านอายุการใช้งานที่จำกัด เนื่องจากการอุดตันของตะไคร่บริเวณรูพรุนและการเสื่อมสภาพของท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

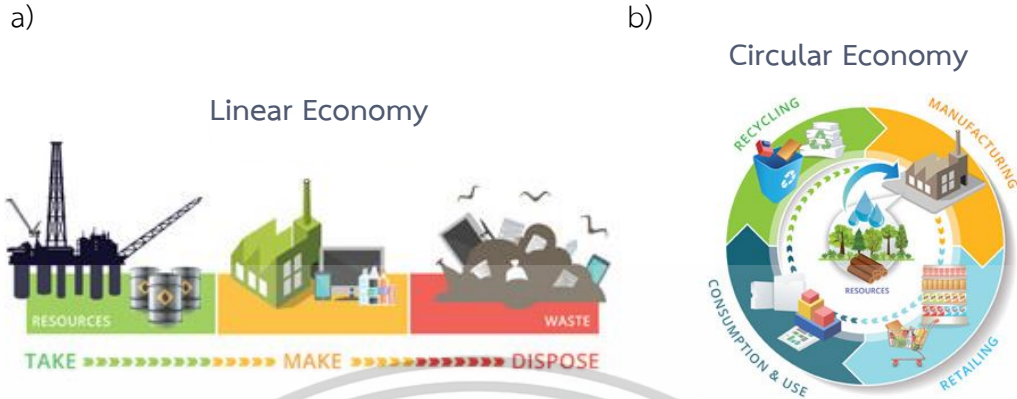


รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะของท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe) [11]

จากที่กล่าวไปข้างต้นว่าโลกที่กำลังเผชิญปัญหาการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ทำให้แนวโน้มความต้องการบริโภคอาหารเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้ความต้องการในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ทรัพยากรธรรมชาติมีอยู่อย่างจำกัด จนมีความเสี่ยงที่จะหมดลงในอนาคตอันใกล้อีกด้วย ซึ่งเดิมระบบการผลิตและการบริโภคของโลกเป็นไปในรูปแบบของเศรษฐกิจแบบเส้นตรง (Linear economy) โดยแนวทางในการใช้ทรัพยากรเป็นไปในลักษณะ $Take > Make > Dispose$ คือการนำทรัพยากรมาใช้ในจำนวนมหาศาล (Take) ก่อนจะนำทรัพยากรเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ (Make) จากนั้นส่งต่อถึงมือผู้บริโภคแล้วนำมาใช้งาน เมื่อผลิตภัณฑ์หมดสภาพการใช้งานก็จะถูกนำไปทิ้ง (Dispose) เป็นขยะ ซึ่งรูปแบบของเศรษฐกิจแบบเส้นตรงไม่มีการคำนึงถึงการนำเอาทรัพยากรหรือวัตถุดิบในระบบการผลิตมาหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ [12]

หลายประเทศทั่วโลกจึงได้ตระหนักถึงสถานการณ์ปัญหาของทรัพยากรธรรมชาติที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และเร่งให้ความสำคัญกับการจัดการทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดความคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพมากที่สุด อีกทั้งยังตระหนักถึงปัญหาด้านการจัดการของเสียที่อาจตกค้างจนส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีแนวโน้มรุนแรงเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นแนวคิดที่เรียกว่า “Circular economy” หรือระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน จึงเป็นประเด็นที่องค์กรระหว่างประเทศ รัฐบาล และในกลุ่มธุรกิจทั่วโลกต่างให้ความสนใจ ซึ่งระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน เป็นแนวคิดในการใช้ทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ ทั้งในด้านการออกแบบกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ บริการ และรูปแบบธุรกิจ [13] มีระบบการจัดการของเสียด้วยกระบวนการใช้ซ้ำ (Reuse) หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) และการผลิตใหม่ (Re-material) [14] ซึ่งแนวคิดดังกล่าวสามารถนำมาแก้ไขปัญหาด้านทรัพยากรธรรมชาติและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว โดยในทุกภาคส่วนได้รับประโยชน์จากระบบเศรษฐกิจที่พัฒนาขึ้นจากแนวคิดดังกล่าว ถือเป็นการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อมของประเทศอย่างยั่งยืนในอนาคต

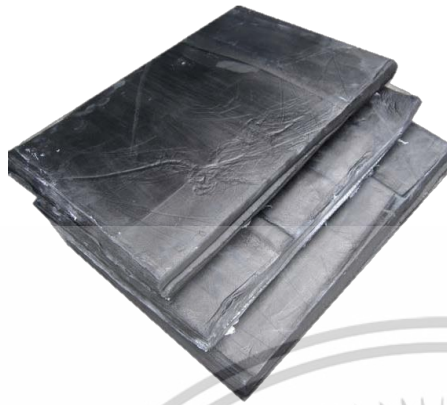
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 a) แผนภาพระบบเศรษฐกิจเส้นตรง และ b) แผนภาพระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน [15]

ในปัจจุบันความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ยางมีแนวโน้มสูงขึ้น ส่งผลให้ขยะยางมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การจัดการกับขยะยางเหล่านี้ถือเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมเซต (Thermoset) ที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมขวางเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติผ่านปฏิกิริยาการเชื่อมโยง จึงไม่สามารถนำยางไปหลอมขึ้นรูปใหม่ได้เหมือนกับพลาสติกบางชนิด อีกทั้งกระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติก็ใช้เวลานานนับร้อยปี ด้วยเหตุนี้การสะสมของขยะยางจึงทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการกับขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยาง เช่น การเผาไหม้เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่การเผาไหม้นั้นส่งผลให้เกิดแก๊สพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม การทำยางรีเคลม (Reclaimed rubber) เป็นการเปลี่ยนยางเก่าที่เป็นเทอร์โมเซตเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ และสามารถเกิดวัลคาไนซ์ได้เหมือนยางดิบหรือยางคอมพาวด์ทั่วไป และการแปรรูปขยะยางให้เป็นผงยาง (Ground rubber) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นสารตัวเติม (Filler) นำมาผสมในยาง หรือผสมกับยางมะตอยเพื่อปูพื้นถนน เป็นต้น ซึ่งการทำเป็นผงยางนั้นเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในวงกว้าง เพราะทำได้ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภาพตัวอย่างการแปรรูปขยะยางรถยนต์แสดงดังรูปที่ 1.5

a)



b)



รูปที่ 1.5 a) ยางรีเคลม (Reclaimed rubber) b) ผงยาง [16],[17]

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังร่วมกับบริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด ร่วมกันวิจัยเกี่ยวกับ “ท่อขีมน้ำซึม (Porous rubber pipe)” ซึ่งได้ศึกษาการขึ้นรูปท่อขีมน้ำซึมจากวัตถุดิบที่หลากหลาย เช่น พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) ยางรีเคลม (Reclaim rubber, RR) ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ผงยางรถยนต์ (Ground tire rubber, GTR) เสริมแรงด้วยเขม่าดำ (Carbon black) เส้นใยขยะยางรถยนต์ (Waste tire fiber, WTF) และเส้นใยใบสับประรด (Pineapple leaf fiber, PALF) ใช้สารให้ฟองและคิกเกอร์ยูเรียเพื่อสร้างโครงสร้างเซลล์เปิด [18-26] เมื่อขึ้นรูปท่อขีมน้ำซึมจากพลาสติกผสมกับผงยางรถยนต์พบว่าท่อขีมน้ำซึมมีความยืดหยุ่นต่ำสามารถแตกหักได้เมื่อได้รับแรงกระทำและมีปัญหาด้านอายุการใช้งานที่จำกัด เกิดการอุดตันของตะไคร่บริเวณรูพรุนได้ ต่อมาพัฒนาโดยการขึ้นรูปท่อขีมน้ำซึมจากยางธรรมชาติและยางรีเคลมผสมกับผงยางรถยนต์พบว่าท่อขีมน้ำซึมมีความแข็งแรงยืดหยุ่นสูง สามารถตัดโค้งได้ตามต้องการ น้ำสามารถซึมออกมาได้อย่างสม่ำเสมอ บริเวณรูพรุนที่ผนังท่อ แต่อย่างไรก็ตามท่อขีมน้ำซึมสามารถทนแรงดันน้ำได้ต่ำ จึงมีการพัฒนาท่อขีมน้ำซึมต่อเนื่องโดยการขึ้นรูปท่อขีมน้ำซึมชนิดเสริมแรงโดยใช้เส้นใยขยะยางรถยนต์และเส้นใยใบสับประรด พบว่าท่อขีมน้ำซึมที่ขึ้นรูปนั้นมีความแข็งแรง ทนความดันได้ดีขึ้น สามารถปรับอัตราการไหลน้ำได้จากการควบคุมความดันน้ำ อีกทั้งยังมีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่ข้อจำกัดของท่อขีมน้ำซึมในงานวิจัยก่อนหน้านี้คือท่อขีมน้ำซึมที่ขึ้นรูปนั้นผลิตจากขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางเก่าที่ใช้แล้ว ทำให้ท่อขีมน้ำซึมมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ และยังสามารถปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) ที่เป็นอันตราย โดยสารบางชนิดเช่น เบนซีน (Benzene) สามารถก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้อีกด้วย ซึ่งอาจจะไม่ค่อยเป็นปัญหามากนักหากใช้งานในที่โล่งแจ้ง เช่น ภายนอกอาคาร ภายในสวน หรือไร่ แต่หากต้องการใช้ภายในอาคาร หรือบริเวณในเมืองที่มีผู้คนอาศัยอยู่ ก็จะเป็นปัญหาได้ ดังนั้นหากต้องการท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางน้ำซึมที่กลั่นน้อยควรเลือกว่าวัสดุดีและสารเคมีที่ส่งกลั่นน้อยเพื่อนำมาใช้ในการผลิตท่ออย่าง อีทัง ขยะยางรถยนต์ซึ่งทำมาจากยางธรรมชาติ โครงสร้างมีพันธะคู่มิอิมตัวทำให้มีอายุการใช้งานจำกัด เนื่องจากสามารถเกิดการเข้าทำปฏิกิริยาจากโอโซนหรือออกซิเจนในบรรยากาศได้ ทำให้ไม่ทนทานต่อดิน ฟ้า อากาศ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาท่อยางน้ำซึมชนิดกลั่นน้อยเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในเมือง (Urban agriculture) และสามารถทนทานต่อดิน ฟ้า อากาศ โดยศึกษาการขึ้นรูปท่อยางที่ใช้วัสดุที่ยางที่เป็นขยะจากผลิตภัณฑ์ยางเอทีลีนพรอพิลีนไดอีน (EPDM) ซึ่งตอบโจทย์แนวคิด Circular economy และจากนั้นทำการศึกษาสมบัติเชิงกล ประสิทธิภาพการซึมผ่านของน้ำ โดยคาดว่าท่อยางน้ำซึมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการเกษตรในเมือง อีทังยังสามารถประยุกต์ใช้กับสวนแนวตั้ง (Vertical garden) หรือสวนแขวนเพดาน (Ceiling garden) แสดงดังรูปที่ 1.6 เพื่อเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้กับภายในอาคาร ห้างสรรพสินค้า ร้านอาหาร หรือแม้กระทั่งคนเมืองที่พักอาศัยอยู่ในคอนโดหรือทาวน์โฮมที่มีพื้นที่จำกัด ซึ่งสามารถช่วยทำให้เกิดทัศนียภาพที่สวยงามและช่วยลดอุณหภูมิของพื้นที่ โดยสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษของสวนแนวตั้งก็คือ ระบบการให้น้ำ หากระบบการให้น้ำมากไป ก็อาจทำให้รากต้นไม้เน่าตายได้ ซึ่งท่อยางน้ำซึมนั้นตอบโจทย์ เนื่องจากข้อดีของการใช้งานท่อยางน้ำซึม คือสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำได้ในปริมาณความต้องการของพืชแต่ละชนิด ทำให้ประหยัดทรัพยากรน้ำ สามารถควบคุมความชื้นในดินได้ ติดตั้งและดูแลรักษาง่าย ประหยัดเวลาในการให้น้ำแก่พืช และสามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำเพื่อการเกษตรแบบแม่นยำอัจฉริยะได้อีกด้วย



รูปที่ 1.6 a) สวนแนวตั้ง (Vertical garden) และ b) สวนแขวนเพดาน (Ceiling garden) [27, 28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีทังห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาท่อยางน้ำซึมชนิดกึ่งน้อยเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในเมือง (Urban agriculture) ซึ่งผลิตจากยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) และผงยางที่ได้จากขยะยาง โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติของท่อยางน้ำซึม ได้แก่ เวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสม อัตราส่วนของยาง EPDM ต่อผงยาง ชนิดของผงยางโดยเปรียบเทียบระหว่างผงยาง EPDM และผงยางรถยนต์ (GTR) สมบัติทนทานต่อการเสื่อมสภาพ และศึกษากลิ่นของท่อยางน้ำซึม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เตรียมตัวอย่างแผ่นยางน้ำซึม (Porous rubber sheet) ผสมสูตรโดยใช้ยาง EPDM และผงยาง ขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ได้แก่

- ศึกษาเวลาเชื่อมโยงที่เหมาะสมโดยศึกษาที่เวลาการเชื่อมโยง 25, 35, 45, 55 และ 65 นาที
- ศึกษาปริมาณอัตราส่วนของยาง EPDM ต่อผงยาง EPDM ที่อัตราส่วน 50:50 60:40 และ 70:30 (โดยน้ำหนัก)

- ศึกษาชนิดของผงยางระหว่างผงยาง EPDM และผงยางรถยนต์ (GTR)
- นำแผ่นยางน้ำซึมที่ขึ้นรูปได้มาศึกษาสมบัติทางกายภาพด้วยการหาความหนาแน่น ทดสอบความเหนียวของยางผสมสูตรด้วยเครื่องวัดความเหนียว (Mooney viscometer) ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) และทดสอบค่าความแข็งกดด้วยคูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ OO (Shore OO durometer) ทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) และทดสอบการซึมผ่านน้ำ

2) ศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จริง โดยเลือกสูตรผสมที่มีสมบัติที่ดีที่สุดมาผลิตเป็นท่อยางน้ำซึมด้วยกระบวนการอัดรีด เพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของท่อยางน้ำซึม ได้แก่ อัตราการซึมผ่านน้ำ ศึกษากลิ่นของท่อยางน้ำซึมจากการบันทึกความแรงของกลิ่นจากบุคคลที่อยู่ในบริเวณที่ขึ้นรูปจำนวน 20 คนโดยใช้แบบสอบถาม และศึกษาสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) จากการทดสอบ Headspace GC-MS

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมชนิดที่มีกลิ่นน้อย มีความแข็งแรง และทนทานต่อการเสื่อมสภาพ
ท่อยางน้ำซึมที่ขึ้นรูปนั้นสามารถใช้งานสำหรับการเกษตรในเมืองได้
- 2) สามารถใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยางได้
- 3) สามารถช่วยลดปริมาณขยะที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ยาง
- 4) ความรู้ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางที่มีนวัตกรรมที่ตอบโจทย์การใช้งาน
ในอนาคตและความต้องการของผู้บริโภค



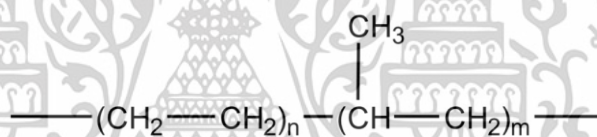
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

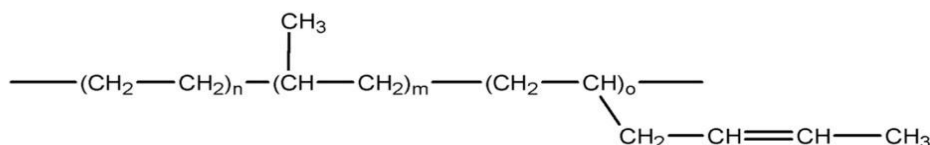
2.1 ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene propylene diene rubber, EPDM)

การสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) กับพรอพิลีน (Propylene) จะได้พอลิเมอร์ออสถุฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่ม (Random) เป็นยางที่เรียกว่า ยางอีพีเอ็ม (Ethylene propylene rubber, EPM) เนื่องจากยางชนิดนี้มีโครงสร้างที่อิมิตัวแสดงดังรูปที่ 2.1 ส่งผลให้ยางมีสมบัติเด่น คือ มีความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี แต่เนื่องจากในโครงสร้างไม่มีส่วนที่ไม่อิมิตัว (ไม่มีพันธะคู่) ดังนั้นข้อจำกัดของยาง EPM คือไม่สามารถเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur, S) ได้ ต้องเชื่อมโยงโดยใช้เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ซึ่งมีราคาสูง และยุ่งยาก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPM

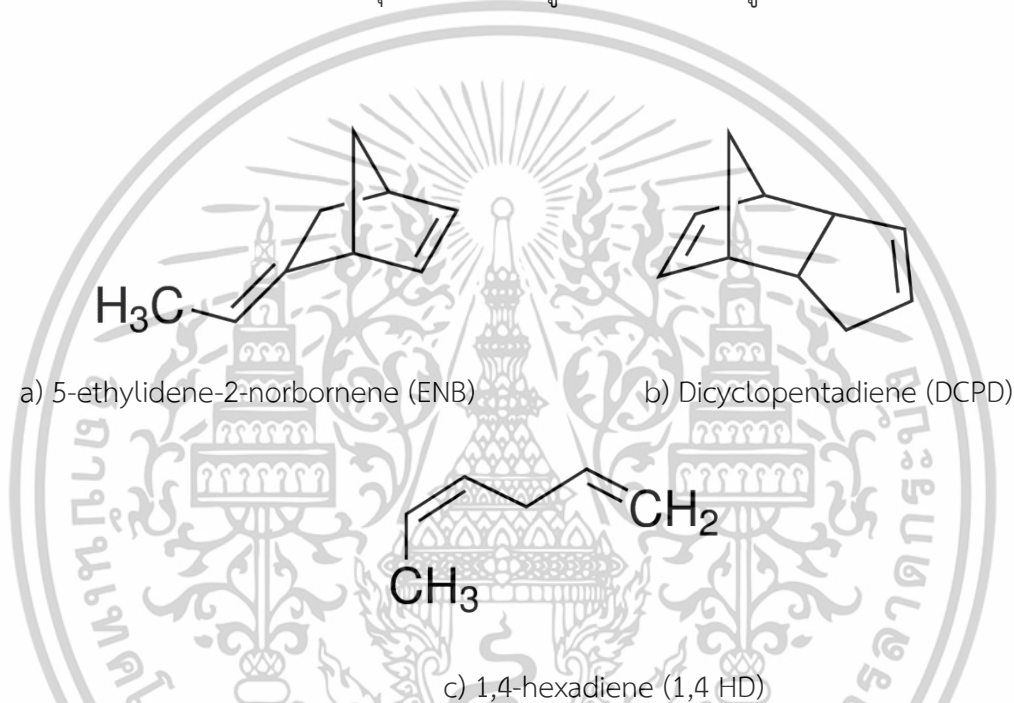
ดังนั้นจึงมีการพัฒนาจากยาง EPM ให้เป็นยางอีพีดีเอ็ม (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) โดยมีการเติมมอนอเมอร์ชนิดที่สามลงไปในขณะที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ประเภทไดอีนชนิดไม่คอนจูเกต (Nonconjugated diene) โดยไดอีนที่เติมลงไปไม่ได้อยู่ในสายโซ่หลักของโมเลกุล แต่จะไปเกาะอยู่ที่สายโซ่หลักในลักษณะกิ่งก้านสาขา เมื่อยาง EPDM มีส่วนที่ไม่อิมิตัวอยู่ในสายโมเลกุล (พันธะคู่) แสดงดังรูปที่ 2.2 จึงสามารถวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันและเปอร์ออกไซด์ได้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM (มอนอเมอร์ชนิดที่ 3 คือ 1,4 Hexadiene)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาง EPDM มีหลายเกรด แต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและพรอพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอิน โดยทั่วไปยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ประมาณร้อยละ 45-75 โดยโมล ซึ่งถ้าปริมาณของเอทิลีนในโครงสร้างสูงจะทำให้ห้องศาความเป็นผลึก (%Crystallinity) เพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ยาง EPDM มีความแข็งแรงในสภาพยังไม่คงรูปสูง (High green strength) อย่างไรก็ตามปริมาณเอทิลีนที่สูงนั้นส่งผลให้ยางมีข้อเสียดังกล่าว นั่นคือ การบดผสมยางที่อุณหภูมิต่ำจะทำได้ยากและสมบัติของยางที่อุณหภูมิต่ำจะไม่ดี เพราะการตกผลึกของยางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ในส่วนของปริมาณไดอินจะใช้อยู่ในช่วงร้อยละ 3-11 โดยโมล โดยไดอินที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมมีอยู่ 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างไดอินที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตยาง EPDM a) 5-ethylidene-2-norbornene (ENB) b) Dicyclopentadiene (DCPD) c) 1,4-hexadiene (1,4 HD) [29-31]

ปัจจุบันไดอินที่นิยมใช้เป็นมอนอเมอร์ตัวที่สามมากที่สุด คือ ENB เนื่องจากจะทำให้โมเลกุลของยาง EPDM ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันสูงสุด และเข้าได้ดีกับยางไม่อิ่มตัวอื่น ๆ ขณะที่การใช้ 1,4 HD มีสมบัติในการเชื่อมโยงซ้ำ แต่ได้ยางที่สมบัติใกล้เคียงยาง EPM ส่วนการใช้ DCPD ถึงแม้ราคาที่สูง เข้าได้ดีกับยางชนิดอื่น แต่เวลาในการเชื่อมโยงซ้ำที่ช้าที่สุด [32-36]

2.1.1 สมบัติโดยทั่วไปของยาง EPDM

ยาง EPDM เป็นยางสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นพันธะที่อิ่มตัวมีพันธะคู่ในโมเลกุลเป็นโซ่กิ่ง ดังนั้นจึงทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงแดด ความร้อน ออกซิเจน โอโซน เนื่องจากยาง EPDM เป็นยางชนิดที่ไม่มีขี้ผึ้ง ส่งผลให้มีความทนทานต่อสารเคมีที่มีขี้ผึ้ง เช่น น้ำ กรด-ด่าง คีโตน (Ketone) และแอลกอฮอล์ เป็นต้น โดยสมบัติทั่วไปของยาง EPDM แสดงดังตารางที่ 2.1 ในขณะเดียวกันยาง EPDM ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการทนน้ำมัน ตัวทำละลายไม่มีขี้ผึ้ง หรือแม้แต่การไม่ทนต่อการติดไฟ ดังนั้นในการเลือกใช้งานจึงควรเลือกการใช้งานให้เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด [32, 37]

2.1.2 การประยุกต์ใช้งานของยาง EPDM

ยาง EPDM ยางชนิดนี้ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตยางชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ (Radiator hose) เป็นต้น และนิยมใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานนอกอาคาร กลางแจ้ง และงานที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูง เช่น แผ่นยางมุงหลังคา ฉนวนยางหุ้มสายไฟ ฉนวนยางกันความร้อน สายพานตัววีส่งกำลัง และใช้ผสมกับพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก เช่น เพิ่มความเหนียวและความทนต่อแรงกระแทก (Impact resistance) เป็นต้น [32, 33]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยาง EPDM [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของยาง EPDM [35]

สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล	อุณหภูมิการใช้งาน	-50 ถึง +160 °C
	ความแข็ง (Hardness)	40-90 Shore A
	ค่าการเสียรูปถาวรหลังกด (Compression set)	ดี ถึง ดีเยี่ยม
	ความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance)	ดี
	ความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact resistance)	ดี
	ความทนทานต่อการหักงอ (Flex cracking resistance)	ดี
ความสามารถในการ ทนทานต่อสารเคมี	กรด (Acids)	ดีเยี่ยม
	อัลคาไล (Alkalies)	ดีเยี่ยม
	คีโตน (Ketones)	ดี ถึง ดีเยี่ยม
	น้ำมันเบรก (Brake fluids)	ดีเยี่ยม
	ตัวทำละลายที่มีฮาโลเจน (Halogenated solvents)	ไม่ดี
	ความทนทานต่อน้ำมัน (Oil resistance)	ไม่ดี
ความสามารถในการ ทนทานต่อ สภาพแวดล้อม	ความทนทานต่อโอโซน (Ozone resistance)	ดีเยี่ยม
	ความทนทานต่อแสงแดด (Sunlight resistance)	ดีเยี่ยม
	ความทนทานต่อไอน้ำ (Steam resistance)	ดีเยี่ยม
	ความทนทานต่อน้ำ (Water resistance)	ดีเยี่ยม
	ความทนทานต่อสภาพอากาศ (Weather resistance)	ดีเยี่ยม

2.2 ผงยาง

ผงยางได้จากการนำเศษยาง เช่น ยางล้อเก่า ครีบบยาง ยางตกเกรดหรือยางอื่น ๆ ที่เป็นขยะของเหลือใช้ มาผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นผงโดยใช้เครื่องบดซึ่งจัดเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งบดเพื่อให้ยางมีขนาดเล็กกลงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบในอุตสาหกรรม

โดยทั่วไป เครื่องบดที่ใช้ในการบดยางให้มีขนาดเล็กกลงมีหลายประเภท ซึ่งขนาดของยางที่ได้จากการบดขึ้นกับประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ใช้ เช่น เครื่องบดหยาบ (Shredder), เครื่องแกรนูลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Granulator), เครื่องบดที่มีการเซาะร่อง (Cracker mill), เครื่องฟัลเวโรเซอร์ (Pulverizer) และเครื่องบดแบบกระทบ (Impact mill)

2.2.1 วิธีการบดยาง

วิธีการบดยางเพื่อให้ได้ยางผงแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักคือ การบดที่อุณหภูมิห้อง และการบดที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งผงยางที่ได้แต่ละวิธีจะให้ขนาดอนุภาค โครงสร้าง และการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงยางแตกต่างกัน

1. การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) คือ การบดเศษยางให้มีขนาดเล็กที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เครื่องบดที่มีการเซาะร่อง (Cracker mill), เครื่องแกรนูลเลเตอร์ (Granulator), เครื่องฟัลเวโรเซอร์ (Pulverizer) รวมถึงเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ซึ่งขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงยางที่ได้จากกระบวนการนี้ขึ้นกับจำนวนรอบของการนำไปผ่านเครื่องบด โดยทั่วไปการบดด้วยวิธีนี้จะได้ผงยางที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.5-1.5 มิลลิเมตร (ไม่เกิน 40 เมช) และมีพื้นผิวที่ไม่เรียบ ค่อนข้างขรุขระ หากต้องการขนาดเล็กลงต้องนำไปผ่านเครื่องบดซ้ำหลาย ๆ รอบ

2. การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic grinding) คือ กระบวนการบดเชิงกลภายใต้อุณหภูมิต่ำ โดยเริ่มจากการนำเศษยาง (ควรมีขนาดเล็กกว่า 3 นิ้ว) มาทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแข็ง (Tg) โดยการแช่ไนโตรเจนเหลวจนกระทั่งยางแข็งเปราะคล้ายแก้ว แล้วนำยางไปบดด้วยเครื่องมือที่ทำให้เกิดอัตราเร็วของความเครียดสูง เช่น เครื่องบดแบบกระทบ (Impact mill) เพื่อให้ยางมีขนาดเล็กลง ผงยางที่ผ่านการบดที่อุณหภูมิต่ำจะมีขนาดเล็กกว่าวิธีการบดที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะมีขนาด 20-30 เมช และมีพื้นผิวนุ่มเรียบ แต่จะมีต้นทุนสูงเนื่องจากการใช้ไนโตรเจนเหลวในปริมาณมาก

2.2.2 การใช้ประโยชน์ผงยาง

ปัจจุบันมีการนำผงยางที่ได้จากการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบ โดยตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่

1. อุตสาหกรรมยาง ใช้ผงยางเป็นสารตัวเติมแบบไม่เสริมแรง (Non-reinforcing filler) ทั้งในอุตสาหกรรมยางล้อและผลิตภัณฑ์ยางอื่น ๆ เช่น แผ่นยาง บล็อกยางปูพื้น ยางบังโคลน และท่อยาง ซึ่งสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต แต่เนื่องจากผงยางมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเขม่าดำหรือซิลิกา ดังนั้นการเติมลงไปในยางอาจทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของผงยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องเข้ากันได้กับยางที่นำไปใช้ขนาดของอนุภาคของผงยางที่เติมลงไปควรมีขนาดเล็ก เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูงขึ้น ปริมาณยางผงที่เติมลงไปจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ เช่น ความทนต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาดและความต้านทานต่อการขีดถู

อย่างไรก็ตามผงยางมีความแข็งสูงกว่ายางดิบค่อนข้างมาก เนื่องจากผ่านการเชื่อมโยงแล้ว การเติมผงยางลงในสูตรยางคอมปาวด์จะทำให้ยางคอมปาวด์มีความหนืดสูงขึ้น มีฟองอากาศลดลง มีการบวมตัวหลังขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion) และเทคนิคการขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยลูกกลิ้ง (Calendering) ลดลง

2. งานวิศวกรรมโยธา มีการนำยางผงไปใช้ในงานวิศวกรรมโยธาหลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปผสมกับยางมะตอยเพื่อปูพื้นถนน เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงสามารถลดปัญหาการเกิดร่องหรือหลุมบนพื้นผิวถนน เนื่องจากพื้นผิวถนนมีความยืดหยุ่นมากขึ้น [39]

2.3 สารเติมแต่งสำหรับยาง

สารเติมแต่ง (Additives) เป็นสารเคมีที่ใช้ผสมลงไปในยาง เพื่อปรับปรุงสมบัติตามความต้องการเพื่อลดต้นทุนและเพื่อช่วยในกระบวนการผลิต (Processability) ให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น สารเคมีที่ใช้เป็นองค์ประกอบสำคัญของยางสูตรผสมหรือยางคอมปาวด์ (Rubber compound) ได้แก่

2.3.1 สารเชื่อมโยง

สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรง (Linear chains) เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) หรือเทอร์โมเซต (Thermoset) เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้มีเสถียรภาพของรูปร่างและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

วัลคาไนเซชัน (Vulcanization) หรือการเชื่อมโยง (Crosslink) เป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน จะไม่สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี เพราะยางจะเหนียวติด ไม่คงรูป ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง และไม่สามารถรับแรงได้ แต่เมื่อยางผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันแล้วจะทำให้ยางมีสมบัติดังนี้

- มีความแข็งแรง (Strength) เพิ่มขึ้น
- มีมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ดีขึ้น
- มีฮีสเทอรีซิส (Hysteresis) ลดลง
- มีเซต (Set) หรือการเปลี่ยนแปลงขนาดถาวรเมื่อได้รับแรงลดลง หรือเสถียรภาพของรูปร่างเพิ่มขึ้น
- เหนียวติด (Sticky) น้อยลง
- เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต ไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ทนต่อความร้อน แสงและการใช้งานนานขึ้น

2.3.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization) เป็นวิธีการที่นิยมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 90% เนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ซึ่งยางส่วนใหญ่ที่นิยมใช้เป็นอย่างดีไม่มีอิมตัว มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางไอโซพรีน (IR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) และยางบิวตะไดอิน (BR) ฯลฯ โดยเมื่อเติมกำมะถันลงไปนยาง จากนั้นให้ความร้อน จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Crosslinking) ขึ้นโดยที่กำมะถันจะไปเป็นตัวไปเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง และถ้าหากเพิ่มปริมาณการผสมของกำมะถันการเกิดพันธะเชื่อมโยงจะมีการเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปกำมะถันที่ใช้จะอยู่ที่ช่วงประมาณ 1 -3 phr กำมะถันที่ใช้ในยางควรจะมีขนาดอนุภาคเล็กเนื่องจากจะทำให้กำมะถันสามารถกระจายตัวในเนื้อยางได้อย่างดีส่งผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงได้อย่างทั่วถึง ซึ่งยางที่เกิดการเชื่อมโยงแล้วจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี และการเติมกำมะถันลงในยางจะเติมในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการเชื่อมโยงก่อนกำหนด โดยจะใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activator) ได้แก่ กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ (Stearic acid/ZnO)

กำมะถันที่นิยมใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิด คือ

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปผลึก ромบิก (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม (S_8) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิ สูงประมาณ 150 °C เป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถัน ในปริมาณ 1-3 phr ถ้าใส่กำมะถันปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดการ “บลูม” (Bloom) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำมะถันเกิดการแพร่จากภายในออกมาสะสมเป็นผลึกที่ผิวของผลิตภัณฑ์เห็นเป็นรอยคราบสีขาว-เหลือง ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สวยงาม ความสามารถในการยึดติด (Tack หรือ Tackiness) ที่ผิวหน้าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ละลายในตัวทำละลายและยาง ผสมเข้ากันได้ยากกว่ากำมะถันชนิดละลาย แต่เมื่อผสมเข้ากันแล้ว เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อน (Complex structure) กับยาง ทำให้ไม่เกิดการบวม จึงนิยมใช้กำมะถันชนิดนี้เมื่อต้องการใช้กำมะถันจำนวนมาก เช่น ยางชนิดแข็งมาก แต่ข้อจำกัดของกำมะถันชนิดไม่ละลายคือมีราคาแพง นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ที่อุณหภูมิสูงเกิน 100°C จึงต้องควบคุมอุณหภูมิผสมไม่ให้สูงเกิน ถ้าต้องการจะใช้ประโยชน์กำมะถันชนิดไม่ละลาย [36, 40]

2.3.1.1.1 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง

สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerators) เป็นสารเคมีที่เติมลงไป ในยางปริมาณเล็กน้อย เพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Rate of vulcanization) ให้เร็วขึ้น ลดเวลาการเชื่อมโยง (Cure time) เกิดการเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยง มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น และใช้ปริมาณกำมะถันน้อยลง ซึ่งการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นสิ่งที่จำเป็น สำหรับการเชื่อมโยงยางด้วยระบบกำมะถัน สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงสามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM เป็น 6 กลุ่มดังนี้

1. ซัลเฟนไมด์ (Sulfenamide) โดยชนิดที่นิยมได้แก่
 - CBS (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide)
 - TBBS (N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide)
2. ไทเอโซล (Thiazoles) โดยชนิดที่นิยมใช้ได้แก่
 - MBT (2-Mercaptobenzothiazole)
 - MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide)
3. กัวนิติน (Guanidines) โดยชนิดที่นิยมใช้ได้แก่
 - DPG (Diphenylguanidine)
 - DOTG (Di-o-tolylguanidine)
4. ไดไทโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamates) โดยชนิดที่นิยมได้แก่
 - ZMDC (Zinc dimethyldithiocarbamate)
 - ZDEC (Zinc diethyldithiocarbamate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ไทยูแรมไดซัลไฟด์ (Thiuram disulfides) โดยชนิดที่นิยมใช้ได้แก่

- TMTD (Tetramethylthiuram disulfide)
- TETD (Tetraethylthiuram disulfide)

6. ไทยูแรมชนิดอื่นที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์ (Thiuram other than disulfides)

อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง ส่วนใหญ่มักใช้สารเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่า เพื่อให้สารเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดทำงานแบบเสริมกัน (Synergistic effect) ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงสูงขึ้น เรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (Primary accelerator)” และเรียกสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณน้อยกว่าว่า “สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ (Secondary accelerator)” [36, 41]

2.3.1.1.2 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) คือสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมใช้ในกระบวนการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic acid) เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป โดยซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริก เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต โดยจะอยู่ในรูปของซิงค์ไอออน (Zinc ions, Zn^{2+}) ที่สามารถละลายได้ในยาง และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง สามารถปรับปรุงสมบัติยางให้ดีขึ้น ทำให้ความอดุลัสสูงขึ้น โดยทั่วไปนิยมใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 3-5 phr ร่วมกับกรดสเตียริกในปริมาณ 1-3 phr

กรดไขมัน (Fatty acid) เป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ โดยกรดไขมันส่วนใหญ่ที่นิยมใช้เป็นกรดอะลิฟาติกอิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 12-18 อะตอม เช่น กรดสเตียริก (เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต) กรดลอริก (เกิดเป็นซิงค์ลอริเอต) นอกจากกรดสเตียริกจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นในการเชื่อมโยงแล้ว กรดสเตียริกยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ในการผสมยาง ทำให้เกิดการผสมง่ายขึ้น เนื่องจากความหนืดของยางลดลง [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 การเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์

การเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization) ถือเป็นระบบการเชื่อมโยงที่เก่าแก่รองลงมาจาก การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน ซึ่งเริ่มมีการใช้เปอร์ออกไซด์ตั้งแต่ต้น ค.ศ.1950 โดยกลไกเกิดการเชื่อมโยงมีดังนี้ เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radicals) เมื่อให้ความร้อนสูงขณะเชื่อมโยงอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางด้วยการดึงไฮโดรเจนอะตอมจากยาง ทำให้ยางเกิดเป็นสารโซ่โมเลกุลที่มีอนุมูลอิสระ (Macro-radicals) โดยยางที่มีอนุมูลอิสระบนสายโซ่จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง เกิดเป็นพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bonds)

การเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้ทั้งยางที่อิ่มตัว (Saturated rubbers) และยางที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated rubbers) นิยมใช้กับยางอิ่มตัวที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น ยางเอทิลีนพรอพิลีน (EPM) และยางซิลิโคน (Q) หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโครงสร้างน้อยมาก เช่น EPDM และ HNBR เนื่องจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องอาศัยความว่องไวของพันธะไม่อิ่มตัวในสายโซ่โมเลกุลยางในการเกิดปฏิกิริยาเหมือนระบบการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน

ข้อดีของยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ที่เหนือกว่ากำมะถันคือ ยางจะทนทานต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนและแรงกระทำดีกว่า เนื่องจากพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์เป็นพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C-C bonds) ซึ่งมีพลังงานพันธะสูงถึง 350 kJ/mol เทียบกับพันธะที่เกิดจากการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันทั้งแบบโมโนซัลไฟดิก (C-S bonds) มีพลังงานพันธะ 285 และพอลิซัลไฟดิก (S-S bonds) มีพลังงานพันธะ 170 kJ/mol ทำให้ยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีความเสถียรมากกว่า อีกทั้งยางที่เชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์มีการเปลี่ยนรูปถาวรหรือเซต (Permanent set) น้อยกว่า มีสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility) ดีกว่า และยังสามารถใช้เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการสีธรรมชาติ ยางใส หรือสีขาว เนื่องจากกำมะถันทำให้เกิดสีเหลืองได้ สีของยางที่ได้มีความเสถียรมากกว่า มีการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าเมื่อได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV light discoloration)

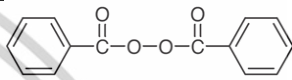
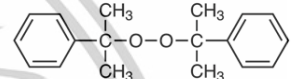
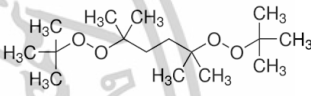
ในการใช้งานสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ ควรหลีกเลี่ยงการเก็บสารที่อุณหภูมิสูง (สูงเกิน 40 °C) เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลาย นอกจากนี้ควรเก็บให้ห่างจากแหล่งให้ความร้อนและไฟฟาสถิตย เนื่องจากเปอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายและดับไฟยาก

มีสารประกอบเปอร์ออกไซด์หลายชนิดที่สามารถใช้ได้ในการเชื่อมโยงยาง เช่น ไดอะซิลเปอร์ออกไซด์ (Diacyl peroxides) และเปอร์ออกซีเอสเทอร์ (Peroxy esters) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติสารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP)
- ไดเทิร์ตบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-tert-butyl peroxide, DBP)
- ไดเมทิลไดเทิร์ตบิวทิลเปอร์ออกซีเฮกเซน (2,5-Dimethyl-2,5-di-(tert-butylperoxy) hexane) ชนิดนี้มีกลิ่นน้อยกว่าชนิดอื่น [36]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ [42]

ชื่อการค้า	ชื่อทางเคมี	โครงสร้าง
Luperox A	Dibenzoyl peroxide	
Luperox DC	Dicumyl peroxide	
Luperox 101	2,5-Bis(tert-butylperoxy)- 2,5-dimethylhexane	
Luperox DI	Di-tert-butyl peroxide	

2.3.1.2.1 โคเอเจนต์

โคเอเจนต์ (Co-agents) คือสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ให้ยังมีสมบัติที่ดีขึ้น เนื่องจากโคเอเจนต์ช่วยระงับยับยั้งปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reaction) ของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นที่ไม่ได้ทำให้อนุมูลอิสระเกิดควมรวม (Coupling) เป็นพันธะเชื่อมโยง เช่น ปฏิกิริยาตัดสายโซ่ (Chain scission) ปฏิกิริยาแบบแบ่งส่วน (Disproportionation)

โคเอเจนต์สามารถเข้าร่วมในปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยเปอร์ออกไซด์ได้ สองลักษณะขึ้นกับโครงสร้างเคมีของมัน คือเกิดทั้งปฏิกิริยารวมตัว (Addition reaction) และปฏิกิริยาจับไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) หรือเกิดเฉพาะปฏิกิริยารวมตัวอย่างเดียว โดยโคเอเจนต์ที่สำคัญในระบบการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางด้วยเปอร์ออกไซด์ได้แก่ สารประกอบจำพวก ไดเมทาคริเลต (Dimethacrylate), อะคริเลตเอสเทอร์ (Acrylate ester) และ ไชยานูเรต (Cyanurate) [43]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สารตัวเติม

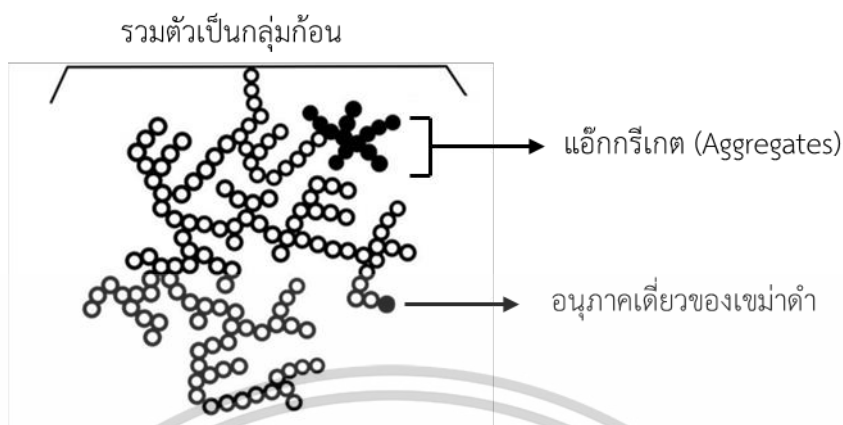
สารตัวเติม (Fillers) เป็นสารเติมแต่งที่เติมลงไปในยางเพื่อลดต้นทุน บางชนิดสามารถปรับปรุงสมบัติของยาง เพื่อเสริมแรงให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น สามารถใช้ผสมในยางเพื่อเพิ่มปริมาณของยางผสมสูตรหรือผลิตภัณฑ์ยางเพื่อลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ได้แก่

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนเพียงอย่างเดียว ไม่ช่วยในการเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดินขาว (Kaolin หรือ Clay) ฯลฯ [36]

2.3.2.1 เขม่าดำ

เขม่าดำ (Carbon black) เป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) เขม่าดำมีประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูง นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่มีสีดำ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของคาร์บอนที่เป็นคาร์บอนอสัณฐานและไฮโดรเจนอะตอม ผลิตได้จากกระบวนการเผาไหม้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากปิโตรเลียมภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน (Pyrolysis) โดยมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างคล้ายพวงองุ่น (Grape-like structure) กลุ่มก้อนของอนุภาคที่ติดกันนี้อาจเรียกว่า “แอ็กกรีเกต” (Aggregates) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ [43]

2.3.2.1.1 สมบัติเขม่าดำที่มีผลต่ออย่างของยางมีดังนี้

1. ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เขม่าดำเกือบทุกตัวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยปริมาณเขม่าดำที่ 40-50 phr จะทำให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด
2. ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ขนาดอนุภาคของเขม่าดำส่งผลต่อความทนทานต่อการขัดถู ความทนทานต่อการขัดถูจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเขม่าดำเล็กลง โดยปริมาณเขม่าดำที่ 60 phr จะทำให้ความทนทานต่อการขัดถูสูงสุด
3. ความแข็งกด (Hardness) ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ และเมื่อขนาดอนุภาคเขม่าดำลดลงความแข็งกดจะเพิ่มขึ้น
4. ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) เขม่าดำจะทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง เมื่อใส่เขม่าดำเพิ่มขึ้นความทนทานต่อการฉีกขาดจะลดลง [43]

2.3.2.2 ซิลิกา

เนื่องจากอนุภาคเขม่าดำซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมยางมีสีดำทำให้เมื่อเติมเข้าไปในสูตรยางแล้วสีของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จะมีสีดำ ไม่สามารถเติมสีหรือเปลี่ยนสีของยางได้จึงมีการเลือกใช้สารตัวเติมกลุ่มซิลิกา (Silica) ซึ่งเป็นอนุภาคที่สามารถเสริมแรงให้กับยางได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิกา (Silica) เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำชนิดอื่น โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ข้อดีของซิลิกาคือช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat buildup) เพิ่มความต้านทานการขัดถู (Abrasion resistance) และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง เป็นต้น ในการใช้งานซิลิกานิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เช่น สารประกอบไซเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัสดุ และเนื่องจากซิลิกามีขั้วหรือมีความชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้สารตัวเติมชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้วเช่น ยางไนไตรล์ (NBR) หรือยางคลอโรพรีน (CR) มากกว่ายางที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) และยางเอสปีอาร์ (SBR) [43]

2.3.2.3 ดินขาว

ดินขาว หรือที่เรียกว่า “เคโอลิน” (Kaolin), “ไชนาเคลย์” (China clay) หรือไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrated aluminum silicate, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารตัวเติมที่ได้จากธรรมชาติ คือการขุดจากแร่ดินขาวหรือ “เคโอลิไนต์” (Kaolinite) แล้วทำให้บริสุทธิ์ มีสีขาว เป็นผงขนาดเล็ก เป็นสารตัวเติมชนิดกึ่งเสริมแรง (Semi-reinforcing fillers) หรือไม่เสริมแรง ช่วยลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว เป็นสารตัวเติมสีไม่ดำที่นิยมใช้มากที่สุด มีราคาถูก มีความแข็งแรงสูง และมีพื้นผิวที่เฉื่อย (Inert) นิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มความแข็ง (Stiffness) และเพิ่มความเหนียว (Toughness) ให้กับพอลิเมอร์ เพิ่มสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของแก๊สในผลิตภัณฑ์ยาง และเนื่องจากดินขาวมีความหนาแน่นค่อนข้างสูง (2.60 g/cm^3) เมื่อใส่ปริมาณมากจะทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีน้ำหนักมาก

อย่างไรก็ตามข้อควรระวังในการใช้ดินขาวในการผสมสูตรยางคือ ดินขาวมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการเชื่อมโยงของยางได้ ความสามารถในการดูดซับความชื้นของดินขาวอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำและความชื้น [43]

2.3.2.4 แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) เป็นสารที่เกิดจากการตกตะกอนของหิน กระจกสัตว์ และการสะสมตัวของเปลือกหอย ปะการัง และหินในท้องทะเล แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมอินทรีย์ที่ไม่มีประสิทธิภาพการเสริมแรง (Non-reinforcing filler) หรือเสริมแรงเพียงเล็กน้อย จึงนิยมใช้ผสมเพื่อเพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิตเพียงอย่างเดียว นิยมใส่ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ เช่น พลาสติก ยาง กาว อาจรู้จักแคลเซียมคาร์บอเนตในหลายชื่อเช่น หินปูน (Limestone) หินอ่อน (Marble) แคลไซต์ (Calcite) ชอล์ค (Chalk) อะราโกไนต์ (Aragonite) โดโลไมต์ (Dolomite, $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$) เปลือกหอย (Shell) และสารขาว หรือไวติง (Whiting) แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นหนึ่งในสารตัวเติมที่นิยมใช้เนื่องจากมีความขาว (Whiteness) สมบัติเสียดทาน (Abrasion) ต่ำ มีหลายขนาดให้เลือกใช้ และมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัด คือมีความหนาแน่นสูง (ประมาณ 2.72 g/cm^3) ไม่สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับกรด เนื่องจากจะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการทำปฏิกิริยากับกรด [36]

2.3.2.5 Sillitin Z 86

Sillitin Z 86 เป็นส่วนผสมจากสินแร่ธรรมชาติสองชนิดได้แก่ ซิลิกา และเคโอลิไนต์ที่มีโครงสร้างลักษณะเป็นแผ่นบางซ้อนเป็นชั้น (Lamellar kaolinite) เป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงได้มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อน มีสมบัติในการกระจายตัวที่ดีมาก สามารถเติมลงในยางได้ในปริมาณมาก และสามารถใช้กันอย่างสุทธผสมที่ใส่พลาสติกไซเซอรินในปริมาณมากได้ สามารถใช้ได้ทั้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีสนิม หรือเป็นสีดำก็ได้ โดยสารตัวเติมชนิดนี้จะนำมาใช้เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานการฉีกขาด ความต้านทานการขีดถู ค่าการเสีรูปถาวรหลังกด ทนทานต่อสภาพดิน ฟ้า อากาศ ทนทานต่อการเสื่อมสภาพ และมีสมบัติในการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion) ที่ดีมาก อีกทั้งยังไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเชื่อมโยงยาง [44]

2.3.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในการผสมสูตร เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยาง ลดอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยาง โดยยางชนิดที่ไม่อิมิตัวนั้นจะอ่อนแอและง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยา การเสื่อมสภาพของยางจะเกิดช้ามากถ้าไม่มีตัวเร่ง แต่โดยทั่วไปแล้วในธรรมชาติ แสง ความร้อน โอโซน และความไม่บริสุทธิ์ของโลหะจะเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้เพิ่มอัตราเร็วในการเสื่อมสภาพของยาง นอกจากนี้ช่วงที่มีการอบยาง (Aging) ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิว

กระบวนการเสื่อมสภาพของยาง สามารถแบ่งออกเป็น 6 แบบ ได้แก่

1. เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน (Heat aging)
2. เสื่อมสภาพเนื่องจากการกระตุ้นของโลหะที่เป็นตัวเร่ง (Metallic poisoning)
3. เสื่อมสภาพเนื่องจากการหักงอไปมา (Flex cracking)
4. เสื่อมสภาพเนื่องจากการที่ตั้งทิ้งไว้นาน (Self aging)
5. เกิดรอยแตกเนื่องจากบรรยากาศ (Atmospheric cracking)
6. เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง (Light aging)

ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางเพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพ เพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีส่วนป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) หรือสารแอนติโอโซนแนนท์ (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิด จะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวนาน [40]

2.3.3.1 สารแอนติออกซิแดนท์

สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากออกซิเจน (O_2) เข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งออกซิเจนเป็นตัวการสำคัญของการเสื่อมสลายของยาง

สารแอนติออกซิแดนท์ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่เปื้อนสี (Nonstaining antioxidant) แบ่งเป็น 4 กลุ่มย่อยคือ สารประกอบฟอสไฟต์ (Phosphites) ฟีนอล (Hindered phenols) บิสฟีนอล (Hindered bisphenols) และไฮโดรควิโนน (Hydroquinones)
2. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดเปื้อนสี (Staining antioxidant) นิยมใช้ 2 กลุ่มคือ สารประกอบไดไฮโดรควิโนลีน (Dihydroquinolines) และไดฟีนิลเอมีน (Diphenylamines) เป็นแอนติออกซิแดนท์ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีคล้ำ หรือดกสี นิยมใช้กับยางที่มีสีดำได้ [40]

2.3.3.2 สารแอนตี้โอโซนแนนท์

สารแอนตี้โอโซนแนนท์ (Antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากโอโซน (O_3) ซึ่งโอโซนจะทำให้เกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ดึงยาง เมื่อนำยางไปยืดไว้ในบรรยากาศแล้วตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง ยางชนิดไม่อิมัตว์ เช่น ยางธรรมชาติ จะเกิดการแตกของยาง เนื่องจากโอโซนมากกว่ายางชนิดอิมัตว์ เช่น ยางบิวทิล (IIR) หรือยางอีพ็อกซี (EPR) โดยทั่วไปแล้วสารแอนตี้โอโซนแนนท์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. Para-phenylene diamine (PPD) สารแอนตี้โอโซนแนนท์ชนิดนี้ที่สำคัญและนิยมใช้กันอย่างมาก ได้แก่ IPPD สารนี้เป็นทั้งสารแอนตี้ออกซิแดนท์ และแอนตี้โอโซนแนนท์โดยปกติจะใช้สารนี้ในปริมาณ 2 - 3 phr เช่น Permax IPPD และ Santofex IP โดยข้อเสียของสารชนิดนี้คือ เกิดการตกสีเหมาะที่จะใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีสีคล้ำ
2. ซี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin wax) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) ช่วยในการผสมและหล่อลื่น (Lubricants) ขณะผสม นอกจากนี้ยังจัดเป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพอีกประเภทหนึ่ง เมื่อเติมสารซี้ผึ้งลงในยาง จะเกิดการแพร่ (Migrate) ออกมาที่ผิวยาง กลายเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนกระทบกับผิวยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน [40]

2.3.4 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารที่เติมลงในยางเพื่อเพิ่มความนิ่มให้กับยาง และช่วยลดความหนืด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น โดยพลาสติไซเซอร์เป็นสารโมเลกุลเล็กที่แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องเข้ากันได้ดีกับยางไม่แพร่ออกมาที่ผิวหน้า (Bleeding) ของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างพลาสติไซเซอร์สำหรับยางเช่น กรดไขมัน (Fatty acid) น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum oils) สารจำพวกเอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine) เป็นต้น ซึ่งปริมาณพลาสติไซเซอร์ที่ใช้จะใส่ให้สัมพันธ์กับปริมาณสารตัวเติมที่ใส่ในยาง กล่าวคือพลาสติไซเซอร์จะช่วยลดความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม [36]

2.3.5 สารให้ฟอง

สารให้ฟอง (Blowing agents) เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อช่วยให้เกิดรูพรุนในรูปของฟองน้ำ (Sponge) หรือยางรูพรุนขนาดเล็ก (Micro cellular rubber) โดยโมเลกุลของสารให้ฟองจะสลายตัวให้แก่สอออกมา เมื่อได้รับความร้อนในขณะที่ทำการเชื่อมโยง

สารทำให้เกิดฟองโดยทั่วไปควรมีลักษณะดังต่อไปนี้

- สามารถละลายในยางได้ กระจายตัวได้ดี
- ควรปล่อยแก๊สออกมาในช่วงอุณหภูมิแคบและแน่นอน เพื่อสามารถควบคุมได้ง่าย
- แก๊สที่ออกมาไม่ควรกัดกร่อนโลหะ เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเชื่อมโยงของยาง
- ไม่ทำให้ยางนั้นมึนกลื่นไม่ดีและไม่ทำให้ยางเป็นพิษ
- ไม่ทำให้ยางยุบตัวหรือหดตัวภายหลังการเชื่อมโยง
- มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง ไม่ไวไฟ
- ราคาถูก

สารให้ฟองสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์ จะมีประสิทธิภาพที่ต้องใช้ปริมาณมากถึง 10 phr การกระจายตัวไม่ดี ราคาค่อนข้างถูก โดยสารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้ ได้แก่

- แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate, NH_4HCO_3) เมื่อถูกให้ความร้อนจะสลายตัวเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย

- แอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) ซึ่งจะแตกตัวด้วยความร้อนอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิ 30°C และแตกตัวเร็วที่อุณหภูมิ $55-60^\circ\text{C}$ จะได้แก๊สแอมโมเนียและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแอมโมเนียมคาร์บอเนตจะกระจายตัวในยางได้ไม่ดี ทำให้ยางที่ได้มีรูพรุนไม่สม่ำเสมอ

- โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, NaHCO_3) เป็นสารที่ไม่เป็นพิษในปริมาณ 5-10phr โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารที่สลายตัวอย่างช้าที่อุณหภูมิ 100°C และสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 140°C เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปัจจุบันนิยมใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตมากที่สุด เนื่องจากแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต เมื่อสลายตัวจะให้แก๊สแอมโมเนียและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต่างและกรด

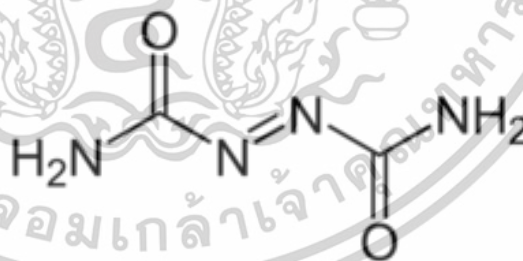
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ แก๊สเหล่านี้ถ้าเก็บในยางจะรวมตัวกันได้ ดังนั้นโอกาสของยางที่ขยายตัวจะยุบตัวกลับเล็กน้อยได้ นอกจากนี้ความเป็นต่างทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

2. สารให้ฟองชนิดอินทรีย์ เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถกระจายตัวและละลายได้ดีในยาง ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งปัจจุบันมีการใช้สารให้ฟองชนิดอินทรีย์เกือบทั้งหมด โดยสามารถแบ่งเป็นกลุ่มตามโครงสร้างดังนี้

- สารประกอบเอโซ (Azo compounds) เช่น Diazoamino-compounds, Azonitrile และ Azodicarbonamide (AZ)
- อนุพันธ์ของไฮดราซีน (Hydrazine derivatives) เช่น Benzenesulfohydrazide (BSH), Benzene-1,3-disulfohydrazide และ p-Toluene sulfonic acid hydrazide
- สารประกอบไนโตรโซ เช่น Dinitropentamethylene tetramine (DNPT) [40]

เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟองที่นิยมใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง เป็นผงผลึกสีเหลืองถึงสีส้มแดง ไม่มีกลิ่น สลายตัวให้แก๊สไนโตรเจน ไม่มีสารพิษเกิดหลังจากการสลายตัว ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีไม่ทำให้เกิดการเผาไหม้ สามารถทำให้เกิดการสลายตัวได้ง่าย ซึ่งจะเกิดการสลายตัวในช่วง อุณหภูมิ 205-215°C หากใส่สารกระตุ้นบางชนิดลงใน AZ จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเหลือ 150°C หรือต่ำกว่านั้น โดยจะให้ปริมาณแก๊สประมาณ 220 cm³/g โดยอนุภาคขนาดเล็กจะสลายตัวได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ [45]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 คิกเกอร์

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) หรือ คิกเกอร์ (Kickers) เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาของสารให้ฟอง ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองได้ง่ายขึ้น สามารถใช้สารให้ฟองได้ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้าง และสามารถใช้งานได้กับสารให้ฟองหลายชนิด ซึ่งการเลือกคิกเกอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานมีความสำคัญ โดยปัจจัยที่ใช้พิจารณาในการเลือกใช้ ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง สภาพะของการใช้งาน ความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility) กับพอลิเมอร์ และไม่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง [36]

2.4 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs)

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 2 ถึง 12 อะตอม มีความดันไอมากกว่า 0.14 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นตัวทำละลายที่ดี ระเหยเป็นไอได้ง่าย กระจายตัวไปในอากาศได้ในอุณหภูมิและความดันปกติ เมื่อระเหยออกสู่อากาศจะสร้างปัญหาแก่บริเวณรอบ ๆ เนื่องจากมีความเป็นพิษ ส่งกลิ่นและอาจก่อให้เกิดหมอกที่เกิดจากสารเคมี โดยในชีวิตประจำวันสามารถได้รับสาร VOCs จากผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สีทาบ้าน ควันบุหรี่ น้ำยาฟอกสี ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด น้ำยาสำหรับย้อมผมและตัดผม สารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น และ VOCs เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ โดยเกิดการปลดปล่อยสารออกมาในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม และปนเปื้อนในอากาศ

2.4.1 ประเภทของ VOCs แบ่งออกตามลักษณะของโมเลกุล เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

1. Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ประกอบด้วยกลุ่มอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเตา (Fuel oils), น้ำมันเชื้อเพลิง (Gasoline) และสารตัวทำละลายในอุตสาหกรรม (แอลกอฮอล์, คีโตน, เฮกเซน) ส่วนกลุ่มสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น สารตัวทำละลาย (เบนซีน, โทลูอิน, ไซลีน, สไตรีน) สาร VOCs กลุ่มนี้มาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้ กองขยะ พลาสติก สารตัวทำละลาย สีทาวัสดุ เป็นต้น มีผลเสียต่อสุขภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Chlorinated VOCs หรือ Halogenated hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรม สารกลุ่มนี้มีความเป็นพิษมากกว่า และเสถียรตัวในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่ม Non-chlorinated VOCs เพราะมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่แข็งแรงมาก สลายตัวยาก มีความคงตัวสูงและสะสมได้นาน ครอบคลุมการทำงานของสารพันธุกรรม หรือยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในเซลล์ และมีฤทธิ์ในการก่อมะเร็ง หรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้ ตัวอย่างของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ชนิด Halogenated VOCs เช่น คลอโรฟอร์ม คลอโรมีเทน เมทิลคลอไรด์ นีโอพรีน ไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

2.4.2 ผลกระทบที่เกิดจาก VOCs

จากการใช้สาร VOCs อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่งผลให้ในแต่ละปีมีการปลดปล่อยสาร VOCs ออกสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณค่อนข้างสูง โดยสารดังกล่าวเป็นสาเหตุหนึ่งของมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม เช่น มลภาวะทางน้ำ มลภาวะทางดิน มลภาวะทางอากาศ รวมทั้งมลภาวะอากาศภายในอาคาร โดยสาร VOCs มีผลต่อชั้นของโอโซนของโลก โดยปกติโอโซนจะอยู่ในชั้นบรรยากาศสูง ทำหน้าที่กรองแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) แต่สาร VOCs มีผลทำให้โอโซนบนชั้นบรรยากาศสูงเข้ามาอยู่ในชั้นบรรยากาศใกล้โลก และโอโซนนี้จะทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ เช่น ปวดศีรษะ ทำให้เจ็บไข้ มีอาการเจ็บคอ เกิดอาการผื่นคันในการหายใจ เกิดอาการแสบร้อนในตา ระคายเคืองตา จมูก คอ ทรวงอก หากได้รับเป็นเวลานานเนื้อเยื่อปอดจะถูกทำลายอย่างถาวร และมีผลกระทบต่อระบบภูมิคุ้มกันของมนุษย์ นอกจากนี้โอโซนยังเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ทำให้สิ่งก่อสร้างชำรุด และเมื่อสาร VOCs ถูกปลดปล่อย เกิดการรั่วไหล หรืออาจเกิดจากฝนที่ตกและชะสาร VOCs ที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศลงสู่ดินหรือแหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดความเป็นพิษขึ้น สัตว์ไม่สามารถอยู่ได้แหล่งน้ำได้ การเจริญเติบโตของพืชลดลง ป่าไม้ไม่เจริญงอกงาม ความสมบูรณ์ของระบบนิเวศป่าลดลง บางกรณีสาร VOCs สามารถผ่านชั้นดินปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน ทำให้น้ำใต้ดินมีสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค [46, 47]

2.4.3 การปลดปล่อย VOCs จากผลิตภัณฑ์ยาง

ผลิตภัณฑ์ยางสามารถปลดปล่อย VOCs ได้เนื่องจากมีสารเคมีหลายชนิด เช่น พลาสติไซเซอร์ สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง สารแอนติออกซิแดนซ์ที่ใช้ในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งการปลดปล่อย VOCs สามารถก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศภายในอาคารและอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยจากงานวิจัยพบว่าสารที่ถูกปลดปล่อยจากยางธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นสารระเหยที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำของ

กรดไขมัน อะโรมาติก คีโตน อัลดีไฮด์ เอสเทอร์ กรดและแอลเคน ส่วน VOCs ที่พบได้ทั่วไปในยางสังเคราะห์ คือ สไตรีน และบิวตะไดอิน ซึ่งพบในยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) และยางบิวตะไดอิน (BR) ส่วนเบนซินแม้ว่าจะไม่ได้ใช้โดยตรงในการผลิตยาง แต่เบนซินอาจเป็นผลพลอยได้หรือสิ่งเจือปนในกระบวนการผลิตยางบางประเภท ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง ผลิตภัณฑ์ยางอาจมีพลาสติกไซเซอร์และสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เช่น พาทาเลตและไทยูแรม ซึ่งสามารถปล่อย VOCs ได้

ชนิดและปริมาณของ VOCs ที่ปลดปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์ยางอาจแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของยางและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต และสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ อายุของผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อลดการสัมผัส VOCs จากยาง แนะนำให้เลือกผลิตภัณฑ์ที่ระบุว่าปลดปล่อย VOCs ต่ำ หรือผ่านการทดสอบและการรับรองที่เหมาะสม จัดเก็บผลิตภัณฑ์ยางในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ห่างจากพื้นที่อยู่อาศัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีกลิ่นแรง จะสามารถช่วยป้องกันการสะสมของ VOCs ภายในอาคารได้ [48]

2.4.4 การตรวจวิเคราะห์กลิ่นจาก VOCs

การตรวจวิเคราะห์กลิ่นของ VOCs เป็นกระบวนการที่สำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับความอันตรายและความสามารถในการปลดปล่อย VOCs ในสิ่งแวดล้อม สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีการและเทคนิคต่าง ๆ โดยตัวอย่างเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไป มีดังนี้

1. จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose) เป็นอุปกรณ์ที่มีชุดเซ็นเซอร์เคมีที่สามารถตรวจจับและวิเคราะห์กลิ่นได้ เซ็นเซอร์เหล่านี้เลียนแบบระบบการดมกลิ่นของมนุษย์ สามารถระบุและแยกความแตกต่างของกลิ่นต่าง ๆ รวมถึงกลิ่นที่เกี่ยวข้องกับ VOCs ได้
2. แก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพซึ่งใช้ในการระบุชนิดและหาปริมาณ VOCs ได้ด้วยการวิเคราะห์เฟสแก๊สของตัวอย่าง โดยวิธีนี้ให้ข้อมูลที่ละเอียดเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของ VOCs และกลิ่นที่เกี่ยวข้อง
3. การตรวจวัดกลิ่นด้วยการดม เป็นการใช้อยู่อาศัยจากประสาทสัมผัสด้านกลิ่นของมนุษย์มาใช้ในการตรวจวัด ทำได้ง่ายและแสดงความรู้สึกที่แท้จริง เนื่องจากการตรวจรับกลิ่นโดยใช้ประสาทสัมผัสของมนุษย์ในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ทำให้เกิดกลิ่นนั้น วิธีนี้สามารถใช้ในการตรวจวัดและประเมินความรุนแรงของกลิ่น VOCs ได้ [49]

2.5 การเกษตรในเมือง

การเกษตรในเมือง (Urban agriculture) เป็นการผลิตทางการเกษตรทุกชนิดที่ทำในพื้นที่เขตเมือง ไม่ว่าจะผลิตที่บ้านหรือในพื้นที่แปลงปลูกที่ไม่ใช่ที่อยู่อาศัย โดยการเกษตรในเมือง จัดเป็นส่วนหนึ่งของการสร้างโครงข่ายพื้นที่สีเขียวในเขตเมือง (Urban Green Infrastructure) เพิ่มพื้นที่สีเขียวในพื้นที่ที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ เป็นการช่วยเพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพ ช่วยลดผลกระทบ จากกิจกรรมการดำรงชีวิตของคนในเมืองที่ส่งผลต่อระบบนิเวศ หรือที่เรียกว่า “รอยเท้าระบบนิเวศ” (Ecological footprint) ช่วยลดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change mitigation) สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช และช่วยลดคาร์บอนโมโนออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ ช่วยลดปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง (Urban heat island) จากกระบวนการคายระเหยน้ำของพืช และสามารถลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกได้

อีกทั้งการเกษตรในเมือง ยังสอดคล้องกับ BCG economy model ซึ่งเป็นรูปแบบการพัฒนาเศรษฐกิจแบบใหม่ ที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าของสินค้าทางการเกษตร นำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต เช่น อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things) เกษตรแม่นยำ (Precision agriculture) เกษตรอัจฉริยะ (Smart farming) เพื่อลดต้นทุน ลดของเหลือทิ้งจากการผลิต มีการผลิตอย่างแม่นยำเพื่อเพิ่มคุณภาพของผลผลิต มีปริมาณผลผลิตที่สอดคล้องกับความต้องการของตลาด ผลผลิตที่ได้มีความปลอดภัยจากสารเคมี ซึ่ง BCG economy model จะเป็นการต่อยอดจากรูปแบบการพัฒนาเศรษฐกิจแบบเดิมที่รัฐบาลพยายามผลักดันอยู่ให้เป็นการพัฒนาเศรษฐกิจแบบก้าวกระโดด กระจายโอกาสกระจายรายได้ นำความมั่งคั่งไปสู่ชุมชนในท้องถิ่นอย่างทั่วถึง และเป็นเทรนด์ธุรกิจที่เน้นไปทางความยั่งยืน [50]

2.5.1 ตัวอย่างรูปแบบการเกษตรในเมือง

1. การปลูกพืชในเรือนกระจก (Greenhouses) ประโยชน์ของการปลูกพืชในเรือนกระจกคือ สามารถเพาะปลูกพืชผักได้ตลอดทั้งปี เนื่องจากอยู่ในสถานที่ปิดที่สามารถควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมได้ เช่น อุณหภูมิ หรือความชื้น โดยสามารถจัดตั้งเรือนกระจกที่ใช้เพาะปลูกนี้ ได้ตามสถานที่ทั่วไป เช่น พื้นที่ว่างระหว่าง อาคาร สวนหลังบ้าน ระเบียงบ้านหรือชั้น ดาดฟ้าของตัวอาคาร เป็นต้น [51]



รูปที่ 2.7 การปลูกพืชในเรือนกระจก (Greenhouses) [52]

2. การปลูกพืชแนวตั้ง (Vertical garden) เป็นการจัดสวนหรือการปลูกพืชในแนวตั้ง แทนการปลูกแนวราบ หรือการปลูกในเรือนเพาะชำในแบบปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการใช้ชีวิตของคนเมืองที่พักอาศัยอยู่คอนโดหรือทาวน์โฮมที่มีขนาดพื้นที่น้อย การปลูกต้นไม้ขนาดใหญ่จึงไม่เหมาะเท่าไร การจัดสวนแนวตั้งจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถรองรับการเติบโตของต้นไม้ได้ในพื้นที่ที่มีอย่างจำกัด อีกทั้งยังเป็นสวนที่เหมาะสมกับอาคารตึกสูง หรือห้างสรรพสินค้าอีกด้วย [53, 54]



รูปที่ 2.8 การปลูกพืชแนวตั้ง (Vertical garden) [55]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สวนแขวนเพดาน (Ceiling garden) เป็นการจัดสวนที่บริเวณด้านบนเพดาน สามารถจัดได้ในหลายสถานที่เพื่อเพิ่มความสวยงามรู้สึกถึงธรรมชาติ เช่น ห้องอาหาร ร้านกาแฟ ห้องสำนักงาน ภายในห้างสรรพสินค้า และแม้แต่เข้าไปอยู่ในส่วนของห้องต่าง ๆ ในอาคารบ้านเรือน ซึ่งความสูงของเพดานอาจจะอยู่ที่ 3-5 เมตร ถือว่ากำลังพอเหมาะและสวยงาม โดยรูปแบบของใบไม้ ต้นไม้ใช้ได้หลากหลายรูปแบบ [56]



รูปที่ 2.9 สวนแขวนเพดาน (Ceiling garden) [57, 58]

2.5.2 ข้อจำกัดของการทำเกษตรในเมือง

1. ข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ ถึงแม้ว่าเป้าหมายสำคัญของการทำการเกษตรในเมือง คือการใช้พื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์ แต่บางครั้งการหาสถานที่ที่เหมาะสมกับการทำการเกษตรอาจจะไม่สามารถทำได้ง่ายนัก เพราะสถานที่เหล่านั้นต้องเอื้อต่อการทำการเกษตร อาทิ อยู่ใกล้แหล่งน้ำ (หรือ ท่อประปา) และสามารถระบายน้ำและอากาศได้ดี เป็นต้น

2. การขาดความรู้และประสบการณ์ในการทำการเกษตรในเมือง เช่น การปลูกพืชเรือนกระจก การปลูกพืชแนวตั้ง จำเป็นต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ เนื่องจากรูปแบบของการทำการเกษตรในเมืองแตกต่างจากการทำการเกษตรแบบทั่วไป เช่น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงการมีความรู้ความเข้าใจในการบริหารจัดการด้านน้ำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ต้นทุนสูง ราคาวัสดุอุปกรณ์อาจเป็นปัจจัยสำคัญในการทำเกษตรในเมือง เนื่องจากบางสถานที่อาจจะต้องปรับปรุงพื้นดินใหม่เพื่อให้เหมาะแก่การเจริญเติบโตของพืช หรืออาจจะต้องจัดหาท่อส่งน้ำ รวมถึงหลอดไฟ เพื่อติดตั้งสำหรับการทำสวนแนวตั้ง เป็นต้น

4. อาจเกิดการขาดแคลนน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคภายในชุมชนในช่วงหน้าแล้ง เนื่องจากปริมาณน้ำอาจมีไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้บริโภค การนำน้ำมาใช้เพื่อทำการเกษตรในเมือง อาจก่อให้เกิดความเดือดร้อนแก่ผู้คนภายในชุมชนได้ ในขณะที่เดียวกันหากน้ำที่นำมาใช้ในการทำการเกษตรในเมืองมีปริมาณน้อยเกินไป ก็อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิตทางการเกษตรได้ [51]

2.6 ท่อยางน้ำซึม

ท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe) เป็นเทคโนโลยีการให้น้ำกับพืชที่เกิดจากแนวคิดที่จะอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และลดการใช้ขยะที่เกิดจากการใช้ผลิตภัณฑ์ยางเก่าที่ใช้แล้ว โดยนำขยะยางมาผสมกับยางหรือพอลิเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมหรือกาวระหว่างอนุภาคผงยาง และทำให้เกิดรูพรุนด้วยสารให้พอง (Blowing agent) ขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion) ภายใต้ความร้อนและแรงดัน โดยขึ้นรูปได้เป็นท่อกลมที่ผนังของท่ออย่างมีลักษณะขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ซึ่งรูพรุนดังกล่าวนี้มีขนาดเล็กมากในระดับที่มองไม่เห็นด้วยสายตา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและความยาวของท่อจะมีความแตกต่างกันออกไปตามความต้องการของผู้ใช้งานและผู้ผลิต ท่อมีความยืดหยุ่นสูง สามารถปรับวางให้เหมาะสมกับลักษณะพื้นที่บริเวณที่ต้องการปลูกพืชได้ ใช้ได้ทั้งบนดินและฝังใต้ดิน การให้น้ำกับพืชด้วยท่อยางน้ำซึมเป็นรูปแบบหนึ่งของการให้น้ำแบบจุลภาคที่มีความคล้ายคลึงกับการให้น้ำแบบหยดเพราะเป็นการให้น้ำปริมาณน้อยอย่างช้า ๆ โดยเมื่อมีการจ่ายน้ำเข้าสู่ท่อ ยางจะหดออกมาตามรูพรุนรอบท่อ โดยอัตราการจ่ายน้ำของท่อยางน้ำซึมขึ้นอยู่กับความดันน้ำต้นสาย ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณน้ำให้เหมาะสมการต้องการของพืชในแต่ละชนิด [59]



รูปที่ 2.10 ท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe) [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 รูปแบบการใช้งานท่อน้ำซึม

ในปัจจุบันมีการนำท่อน้ำซึมไปใช้ในหลากหลายรูปแบบ เช่น ใช้งานท่อน้ำซึมกับสวนแนวตั้ง (Vertical garden) สวนแนวนอน (Landscape garden) และสวนแขวนเพดาน (Ceiling garden) นำไปใช้งานโดยฝังไว้ใต้ดิน และสามารถนำมาใช้งานเป็นท่อออกซิเจนที่ใช้สำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำ



a) สวนแนวตั้ง (Vertical garden) [61]



b) สวนแนวนอน (Landscape garden) [62]



c) สวนแขวนเพดาน (Ceiling garden) [63]



d) ท่อออกซิเจนสำหรับใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ [64]

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการใช้งานท่อน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การเกษตรอัจฉริยะ

การเกษตรอัจฉริยะ (Smart agriculture) เป็นแนวทางการเกษตรสมัยใหม่ที่น่าเทคโนโลยีมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดการใช้ทรัพยากรให้เหมาะสมกับสิ่งแวดล้อม แนวคิดนี้พัฒนามาเพื่อแก้ไขปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ การขาดแคลนทรัพยากร และความต้องการผลผลิตที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก ทั้งนี้ การเกษตรอัจฉริยะยังครอบคลุมการทำเกษตรแบบแม่นยำ (Precision agriculture) การใช้งานเซ็นเซอร์และ RFID (Radio frequency identification) ในการติดตามข้อมูล รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) อย่างกว้างขวาง โดยการเกษตรอัจฉริยะจะเป็นทางออกที่ดีในการรักษาทรัพยากรและเพิ่มคุณภาพของผลผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

2.7.1 องค์ประกอบหลักของการเกษตรอัจฉริยะ

2.7.1.1 การเกษตรแบบแม่นยำ (Precision agriculture)

การเกษตรแบบแม่นยำเป็นการใช้ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมการเพาะปลูกในแต่ละพื้นที่แบบเจาะจง เช่น อัตราการใช้ปุ๋ยและน้ำที่เหมาะสม และการวิเคราะห์ความต้องการของพืชในแต่ละช่วงเวลา ข้อมูลเหล่านี้สามารถเก็บได้จากดาวเทียม โดรน และเซ็นเซอร์พื้นฐานที่ติดตั้งไว้ในพื้นที่การเกษตร ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรสามารถปรับปรุงการผลิตให้เหมาะสมกับทรัพยากรที่มี และยังช่วยลดการใช้ปุ๋ยและน้ำเกินจำเป็น

การเกษตรแม่นยำช่วยให้เกษตรกรสามารถวางแผนการจัดการพื้นที่เพาะปลูกได้อย่างเป็นระบบ ตัวอย่างเช่น การระบุพื้นที่ที่ต้องการสารอาหารเพิ่มเติมหรือน้ำเสริมเฉพาะจุด นอกจากการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต การเกษตรแม่นยำยังช่วยลดต้นทุนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

2.7.1.2 Internet of Things (IoT)

เทคโนโลยี IoT คือการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านอินเทอร์เน็ต ทำให้เกิดการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์และการควบคุมอุปกรณ์จากระยะไกล ในบริบทการเกษตร อุปกรณ์ IoT ที่นิยมใช้ได้แก่ เซ็นเซอร์ดิน เซ็นเซอร์อุณหภูมิ และระบบรดน้ำอัตโนมัติ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะเชื่อมโยงกันเพื่อเก็บข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมรอบพื้นที่เพาะปลูก และส่งข้อมูลไปยังระบบกลาง เพื่อให้เกษตรกรสามารถติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้ได้ทันที

การใช้งาน IoT ในการเกษตรอัจฉริยะช่วยให้เกษตรกรสามารถปรับปรุงการจัดการพื้นที่การเกษตรแบบตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว โดยข้อมูลเหล่านี้จะทำให้เกษตรกรทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้น

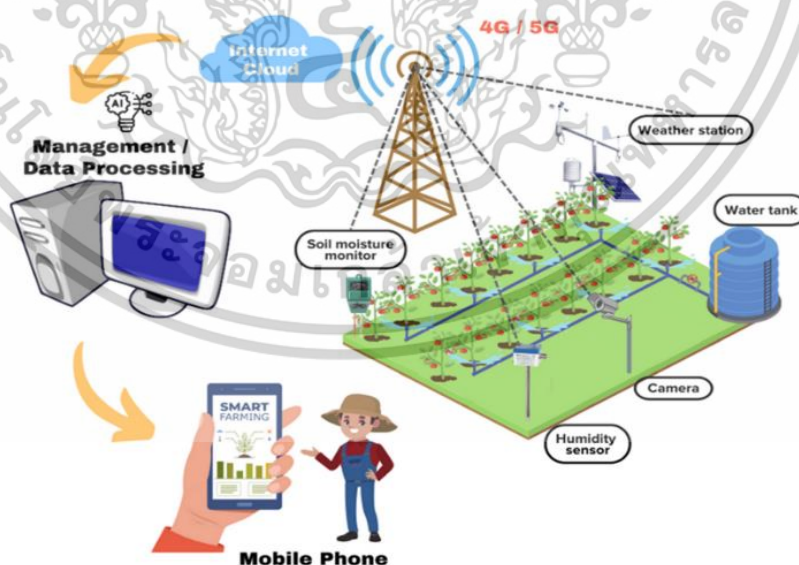
และสามารถแก้ไขได้อย่างทันเวลา เช่น หากเซ็นเซอร์ตรวจพบว่าระดับความชื้นในดินลดต่ำ ระบบรดน้ำอัตโนมัติก็สามารถทำงานได้ทันที นอกจากนี้ IoT ยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การใช้น้ำในการรดน้ำต้นไม้จะถูกควบคุมให้เหมาะสม ลดการสูญเสียน้ำ และเพิ่มผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ

2.7.1.3 การใช้เซ็นเซอร์ และ RFID

RFID (Radio frequency identification) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถติดตามตำแหน่งและการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์หรือสัตว์ในฟาร์ม รวมถึงบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของพืชหรือสัตว์ได้อย่างต่อเนื่อง RFID ทำงานโดยการฝังชิปไว้ในอุปกรณ์หรือเครื่องมือและใช้คลื่นวิทยุในการสื่อสารข้อมูลไปยังระบบกลาง ทำให้เกษตรกรสามารถติดตามข้อมูลการผลิตได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

นอกจาก RFID แล้ว เซ็นเซอร์ยังเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในกระบวนการเกษตรอัจฉริยะ เช่น เซ็นเซอร์ความชื้นที่ใช้ตรวจสอบระดับความชื้นในดิน เซ็นเซอร์แสงที่ใช้วัดปริมาณแสงที่พืชได้รับ และเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่ใช้ติดตามอุณหภูมิในพื้นที่เพาะปลูก ข้อมูลจากเซ็นเซอร์เหล่านี้จะถูกส่งผ่านระบบ IoT ไปยังระบบวิเคราะห์และแสดงข้อมูลให้เกษตรกรแบบเรียลไทม์

การใช้เซ็นเซอร์และ RFID มีข้อดีหลายประการ เช่น การลดความผิดพลาดในการติดตามข้อมูล เพราะทุกอุปกรณ์สามารถสื่อสารกันได้อย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติ ข้อมูลทั้งหมดสามารถนำมาวิเคราะห์และประเมินความต้องการของพืชในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างแม่นยำ [65-69]

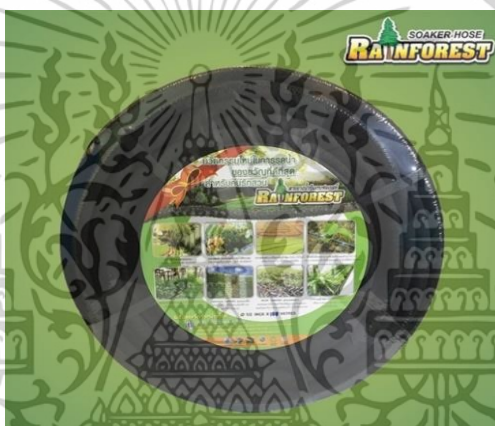


รูปที่ 2.12 การใช้ IoT เพื่อทำการเกษตร [69]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ท่อยางน้ำซึมที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

บริษัท กสิพันธ์รัตน์ จำกัด [70] ผลิตท่อยางน้ำซึมแสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถใช้สำหรับการจัดสวนแนวตั้งและแนวราบได้ เช่น บ้าน ออฟฟิศ หรือสวนสาธารณะ แม้กระทั่งสวนบนตึกกระฟ้า โดยท่อยางน้ำซึมสามารถวางบนดินและใต้ดินได้ เพราะท่อยางน้ำซึมนี้มีรูพรุนโดยรอบให้น้ำสามารถออกได้อย่างสม่ำเสมอ พืชจึงได้รับน้ำถึงรากและทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี โดยลดการเกิดวัชพืชและลดการสูญเสียน้ำธาตุจากการชะหน้าดิน ท่อน้ำยางซึมมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 16 มิลลิเมตร ความดันที่ใช้ในการให้น้ำประมาณ 0.3 - 2 bar ต่อปริมาณน้ำที่ออกมา 1.2-7.2 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง



รูปที่ 2.13 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท กสิพันธ์รัตน์ จำกัด [70]

บริษัท Leaky pipe systems จำกัด [71] ได้ผลิตท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมแสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งถูกนำมาใช้ในการให้น้ำทางด้านการเกษตร สวนหย่อม สามารถวางท่อได้ตามลักษณะพื้นที่ที่ต้องการได้ และจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อใช้ร่วมกับการใช้วัสดุมาเพื่อคลุมดินเนื่องจากจะลดการระเหยของน้ำ โดยการทำงานของท่อน้ำซึมเป็นการให้น้ำทีละน้อย ๆ ที่ความดันต่ำต่อก่อนน้ำหรือถึงน้ำที่ถูกวางไว้บนที่สูง สามารถให้น้ำโดยไม่จำกัดพื้นที่แต่ขึ้นกับความแรงของแหล่งน้ำที่ใช้ ความดันที่ใช้ในการให้น้ำประมาณ 1-2 bar ต่อปริมาณที่ออกมา 2-4 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง รายละเอียดของท่อแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท Leaky pipe systems จำกัด [71]

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky pipe systems [71]

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในและ ภายนอก (mm)	ความยาวท่อ สูงสุดในการ ใช้งาน	ลักษณะการใช้งาน
LP12H	9, 14	50	ใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน โดยทั่วไปใช้กับสวนหย่อม สามารถใช้ได้ทั้งโครงการใหญ่และเล็ก
LP12L	9, 14	100	ใช้งานบริเวณใต้ดิน ร้วต้นไม้เตี้ย ๆ ที่มีการคดเคี้ยว สนามหญ้า บริเวณที่เป็นเนิน นอกจากนี้ยังใช้ได้กับการเพาะปลูกในเรือนกระจก

LBS global company [72] ผลิตท่อน้ำซึมจากขยะพยางรถยนต์แสดงดังรูปที่ 2.15 เพื่อใช้งานในการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นสวนหย่อม ในโรงเรือน (Greenhouse) หรือการปลูกในกระถางต้นไม้ โดยสามารถให้น้ำได้อย่างแม่นยำ ประหยัดน้ำมากถึง 50 % สามารถใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน ท่อมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความดันที่ใช้ในการให้น้ำประมาณ 0.5-3 bar ต่อปริมาณที่ออกมา 2-6 ลิตร/เมตร/ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ผลิตภัณฑ์ท่อน้ำซึม บริษัท LBS global จำกัด [72]

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลความดันในการใช้งาน ปริมาณน้ำ และราคาท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า

บริษัท	ความดัน (bar)	ปริมาณน้ำ (l/m/h)	บาท/เมตร
บริษัท กสิพันธ์ จำกัด	0.3-2	1.2-7.2	50
Leaky pipe	1-2	2-4	68
LBS global company	0.5-3	2-6	35

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ศึกษาการขึ้นรูปท่ออย่างน้ำซึมจากยางธรรมชาติ (NR) ยาง EPDM (Ethylene Propylene Rubber) และผงยางรถยนต์ (Ground tire rubber, GTR) โดยใช้ไดไนโตรโซเพนตะเมทิลินเตตระมีน (DNPT) หรือใช้เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง และสารประกอบยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง ผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบความร้อน (Hot air oven) โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของท่ออย่างน้ำซึม เช่น อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยาง EPDM เวลาในการเชื่อมโยง ปริมาณเขม่าดำ อัตราส่วนยางต่อผงยางรถยนต์ และปริมาณสารให้ฟอง พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของยาง EPDM มากขึ้นความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง มีความต้านทานต่อโอโซนดี และเมื่อเวลาการเชื่อมโยงมากขึ้นความแข็งแรงดึง และระยะยืดจนขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดสูงสุดจุดหนึ่ง จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยาง EPDM และเวลาการเชื่อมโยงไม่มีผลต่อความแข็งแรง ความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึม การเติมเขม่าดำเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของท่อน้ำซึม พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง หลังจากนั้นสมบัตินี้จะด้อยลง และเมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น สมบัติทางกายภาพมีแนวโน้มลดลง ส่วนอัตราส่วนการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่าท่อยางน้ำซึมที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดี และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำสามารถใช้งานได้จริง สามารถปรับอัตราการซึมผ่านของน้ำให้เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภท โดยการปรับความดันของน้ำตามความต้องการ [73, 74]

อีกทั้งมีงานวิจัยที่ศึกษาการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมหลากหลายชนิด โดยเน้นการเตรียมจากยางธรรมชาติ (NR) ยางรีโคลม (RR) และผงยางรถยนต์ (Ground tire rubber, GTR) มีการใช้เขม่าดำ (Carbon black, CB) เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง โดยใช้สารให้ฟองเป็นไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) และยูเรียเป็นสารกระตุ้นสารให้ฟอง ผสมสูตรทำด้วยเครื่องผสมชนิดเดือร์หรืออาจจะเป็นเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบความร้อน (Hot air oven) จากงานวิจัยทั้งหมดพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำพบว่าความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นสมบัติเหล่านี้ลดลง เนื่องจากปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไป ทำให้เขม่าดำกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณผงยางรถยนต์ ทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง และเมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์เล็กส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอัตราการซึมผ่านน้ำลดลง และในบางงานวิจัยได้ใช้เส้นใยขยะยางรถยนต์ (Waste tire fiber, WTF) และเส้นใยใบสับประรด (Pineapple leaf fiber, PALF) เพื่อเป็นเส้นใยเสริมแรงร่วมกับเขม่าดำ ซึ่งพบว่าสมบัติบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ฦ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างเขม่าดำต่อเส้นใยมีความเหมาะสม และพบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใย ความหนืดของยางผสมสูตรและค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งยางผสมสูตร WTF มีความหนืดน้อยกว่ายางผสมสูตร PALF เมื่อศึกษาสมบัติการซึมผ่านน้ำ พบว่าท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใย ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางของท่อมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านน้ำที่ลดลงเมื่อเพิ่มความดัน อย่างไรก็ตามท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย WTF มีอัตราการซึมผ่านน้ำที่มาก แต่เปอร์เซ็นต์การขยายตัวเส้นผ่านจุดศูนย์กลางมีแนวโน้มต่ำกว่าท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วย PALF นอกจากนี้ท่อยางน้ำซึมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีค่าทนความดันระเบิดสูงกว่าท่อยางน้ำซึมที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรง [18-21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการศึกษาสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมจากจากผงยางรถยนต์ (GTR) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE), พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยมีเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง ใช้ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นสารเชื่อมโยง และมีสารช่วยผสมเป็น PE-g-MA (Polyethylene graft maleic anhydride) โดยศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสัณฐานวิทยา พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารให้ฟองทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง โมดูลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น แต่จะทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP และสารช่วยผสมเป็น PE-g-MA เป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง โมดูลัสและเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาดสูงขึ้น แต่ปริมาณการซึมผ่านของน้ำลดลง อีกทั้งมีการศึกษาอัตราส่วนของ GTR:LDPE, GTR:LLDPE และGTR:HDPE โดยสูตรที่เหมาะสมในการผลิตท่อน้ำซึมทางการเกษตรคือ GTR:LDPE และ GTR:HDPE เท่ากับ 60:40 และ GTR:LLDPE เท่ากับ 70:30 [22-26]

ได้มีงานวิจัยที่ศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงพันธะและสมบัติของยาง EPDM โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้เปอร์ออกไซด์ประเภทอินทรีย์ 3 ชนิด ได้แก่ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, Luperox DC) ได-(เทอร์ท-บิวทิลเปอร์ออกซี) ไดไอโซโพรพิลเบนซีน (Di(t-butylperoxy) diisopropylbenzene, Luperox F) 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได(เทอร์ท-บิวทิลเปอร์ออกซี) เฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di(t-butylperoxy) hexane, Luperox 101) โดยจากผลวิจัยพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเกิดการเชื่อมโยงพันธะก่อนเวลาอันสมควร นอกจากนี้พบว่าปริมาณของอนุมูลอิสระที่ได้จากการแตกตัวของสารเปอร์ออกไซด์ ส่งผลต่อโครงสร้างการเชื่อมโยงพันธะและสมบัติเชิงกลของยาง EPDM มีการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเปอร์ออกไซด์ต่อสมบัติของยาง EPDM พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงพันธะและสมบัติเชิงกลของยาง EPDM ดีขึ้น โดย Luperox F ให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูงสุด มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม และเนื่องจาก Luperox DC มีครึ่งชีวิต (Half-life) ที่สั้นกว่า เกิดการแตกตัวเร็วและว่องไวสูง ทำให้อัตราเร็วในการเชื่อมโยง และเวลาในการเริ่มเชื่อมโยงเร็วกว่า ดังนั้นเมื่อเชื่อมโยงด้วย Luperox DC ทำให้ยางที่ได้มีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ (Processability) ต่ำกว่าการใช้ Luperox F และ Luperox 101 อีกทั้งยังมีการศึกษาการใช้โคเอเจนต์ร่วมกับการเชื่อมโยงยางด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากโคเอเจนต์ว่องไวต่อปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ ทำให้ช่วยยับยั้งปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reaction) ของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมโยง และยังมีการศึกษาสมบัติการไหล (Rheological behavior) ของยาง EPDM ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคอัดรีด (Extrusion) โดยมีการเติมสารให้ฟอง DNPT เพื่อสร้างโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์เปิด และเขม่าดำเพื่อเสริมแรง ใช้ไดควิมิลเปอร์ออกไซด์ (Luperox DC) เป็นสารเชื่อมโยงจากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาพบว่ารูปทรงของชิ้นงานที่ออกจากหัวตายไม่ได้เป็นทรงกลมโดยธรรมชาติ จำนวนพุนจะมีปริมาณมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน ปริมาณสารให้พอง และอุณหภูมิ โดยความเค้นเฉือน (Shear stress) จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน (Shear rate) และความเค้นเฉือนจะลดลงเมื่อเติมสารให้พอง [37, 75-77]

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยาง EPDM มีน้ำมันและสารตัวเติมในปริมาณสูง ดังนั้นเป็นไปได้ว่าเมื่อนำมาบดเป็นผงยางอาจทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรงที่มีมอดุลัสต่ำ จึงมีการศึกษาโดยการนำขยะจากผลิตภัณฑ์ยาง EPDM มาบดที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องบดเชิงกล และนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในเนื้อยาง EPDM พบว่าการเติมผงยางส่งผลให้ความหนืดมูนนี้เพิ่มขึ้น แต่เวลาในการเริ่มเชื่อมโยงลดลง สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจากการเคลื่อนตัว (Migration) ของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจากผงยางไปยังเนื้อยาง และเมื่อปริมาณผงยางสูงขึ้น ค่าแรงบิดสูงสุดจะลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการเคลื่อนตัวของกำมะถันจากเนื้อยางไปยังผงยาง และทำให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของเนื้อยางหลักลดลง และพบว่าการเติมผงยางในปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การสะสมความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความยืดหยุ่นลดลงเล็กน้อย และความต้านทานต่อการขูดถูลดลง อีกทั้งยังมีการศึกษาพฤติกรรมการไหล (Rheological behavior) ของยางคอมปาวด์ในช่วงอุณหภูมิ 90–110°C และอัตราเฉือน (Shear rate) ช่วง 306.7–1533.24 s⁻¹ เมื่อเพิ่มปริมาณผงยางก็พบว่าการบวมตัวของยางที่ออกจากหัวตาย (Die Swell) ลดลง เนื่องจากแต่เดิมผงยางนั้นมีการเชื่อมโยงภายในอยู่แล้ว อีกทั้งผงยางยังมีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมปาวด์สูงขึ้นด้วย และการเติมผงยางทำให้อัตราเฉือนวิกฤต (Critical shear rate) เพิ่มขึ้น โดยผลที่เกิดขึ้นนั้นคล้ายกับการเติมเขม่าลงในยางคอมปาวด์ และเมื่ออัตราเฉือนวิกฤตเพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานที่ออกจากหัวตายมีการบิดเบี้ยวน้อยลงในช่วงอัตราเฉือนที่กว้างขึ้น [78-82]

วัสดุบางชนิดที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบภายในรถยนต์สามารถปลดปล่อยสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) จากพื้นผิววัสดุออกสู่อากาศภายในรถยนต์และทำให้ส่งกลิ่นเหม็นได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกวัสดุและสารเคมีต่าง ๆ ที่มีกลิ่นน้อย เพื่อใช้เป็นแถบยางติดขอบประตูและกระจกสำหรับรถยนต์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วแถบยางเหล่านี้มักทำจากยาง EPDM เพราะสามารถทนทานต่อสภาพอากาศได้ดีเยี่ยม โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อกลิ่นของแถบยางมีดังนี้ ยาง EPDM ควรเลือกใช้ชนิดที่มีปริมาณของมอนอเมอร์ตัวที่สามต่ำ เช่น เลือกใช้ยาง EPDM ที่มีปริมาณ 5-ethylidene-2-norbornene (ENB) ต่ำ เนื่องจาก ENB สามารถตกค้างในผลิตภัณฑ์ยางหลังการเชื่อมโยงและส่งกลิ่นได้ สารเชื่อมโยงที่นิยมใช้ คือ กำมะถัน แต่เนื่องจากเกิดกลิ่นในระหว่างกระบวนการเชื่อมโยง จึงสามารถใช้ปริมาณกำมะถันที่น้อยและเพิ่มปริมาณการใช้สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้กลิ่นที่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ลดลง ส่วนการใช้เปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยง กลิ่นของผลิตภัณฑ์ไม่ได้ดี เหนือกว่าการใช้กำมะถัน สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เช่น กรดสเตียริก ซิงค์ออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากซิงค์ออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์นั้นมีแนวโน้มที่จะมีโลหะหนัก เช่น ตะกั่วหรือสารประกอบของโลหะเหล่านั้น และการไฮโดรไลซิสของกรดสเตียริกอาจทำให้เกิดคราบสี ดังนั้น ควรลดปริมาณสารทั้งสองชนิดให้น้อยที่สุดแต่ยังสามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ โดยปกติแล้วสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงบางชนิดมีสารพิษที่อันตรายคือ ไนโตรซามีน ซึ่งสามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้ ส่งผลกระทบต่อด้านสิ่งแวดล้อมและทำให้เกิดกลิ่นที่ผิดปกติ ดังนั้นต้องเลือกสารเร่งที่มีความเป็นพิษต่ำและไม่ส่งกลิ่น เช่น การเลือกใช้สารเร่งประเภทซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamide) ไทเอโซล (Thiazoles) และ แอลคิลไทโอฟอสเฟต (Alkyl thiophosphate) หากใช้สารให้ฟองโดยทั่วไปจะใช้สารให้ฟองชนิดอินทรีย์ที่สลายตัวด้วยความร้อน นิยมใช้ Diphenylsulfonylmethyl (OBSH) และ Azodicarbonamide (AZ) ซึ่งสลายตัวได้แก๊สไนโตรเจนที่ไม่ก่อให้เกิดพิษ ส่วนประเภทสารตัวเติมที่ใช้ หากใช้เป็นเขม่าดำควรเลือกเขม่าดำที่ได้จากแก๊สธรรมชาติ เนื่องจากเขม่าดำทั่วไปจะประกอบด้วย Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) ซึ่งการระเหยของ PAHs จะส่งกลิ่นและเป็นอันตรายต่อร่างกาย ดังนั้นควรเลือกใช้เขม่าดำที่มีปริมาณ PAHs น้อยกว่า 5% หรือไม่มีเลย ส่วนสารตัวเติมที่เป็นเรอีนินทรีย์ โดยทั่วไปจะนิยมใช้แคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากส่งกลิ่นน้อย ส่วนการเลือกใช้สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) นิยมใช้น้ำมันพาราฟิน หรือน้ำมันขาว ซึ่งแต่ละเกรดจะมีปริมาณสิ่งเจือปนและ PAHs ต่างกัน หากต้องการให้มีกลิ่นน้อยให้ใช้เกรดทางการแพทย์ซึ่งไม่มี PAHs [83]

Wang, H. et al. ได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้โคเอเจนต์ร่วมกับการใช้เปอร์ออกไซด์ในการเชื่อมโยงยาง EPDM โดยโคเอเจนต์ที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ Isocyanurate (TAIC), Trimethylol propane trimethacrylate (TMPTMA) และ High vinyl polybutadiene (HVPBd) ซึ่งพบว่าเมื่อเติมโคเอเจนต์แต่ละชนิดลงไป สามารถทำให้ยาง EPDM มีการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดย TMPTMA ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อ TMPTMA เติมลงไปจะทำให้ยางมีเวลาเริ่มเชื่อมโยงที่สั้นที่สุด คือสามารถเกิดการเชื่อมโยงอย่างรวดเร็วเมื่อเปอร์ออกไซด์เริ่มสลายตัว รองลงมาเป็น TAIC และ HVPBd ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเชื่อมโยงยางที่อุณหภูมิ 175°C หรือสูงกว่านั้น การใช้โคเอเจนต์ชนิดที่ต่างกันส่งผลต่อเวลาในการเริ่มเชื่อมโยงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อเติมโคเอเจนต์ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และความแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสที่ 50 เปอร์เซ็นต์การดึงจะลดลง เมื่อเทียบกับยาง EPDM ที่ไม่ได้เติมโคเอเจนต์ [84]

El-Wakil, A. et al. ได้ศึกษาชนิดของสารตัวเติมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง EPDM โดยผลการทดสอบจะแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าของแต่ละสมบัติที่ศึกษาเทียบกับจำนวนวันในการทดสอบการเสื่อมสภาพ (Aging test) สารตัวเติมที่ใช้มี 3 ชนิด ได้แก่ แคลเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอเนต (CaCO_3), Sillitin N 85 และเขม่าดำชนิด Semi reinforcing furnace (SRF) โดยปริมาณสารตัวเติมที่ใช้อยู่ที่ 30 phr ใช้กัมมะถันเป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งการทดสอบการเสื่อมสภาพ ทดสอบโดยการบ่มด้วยความร้อนที่ 90°C เป็นเวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 วัน จากการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของยาง EPDM ที่ใช้สารตัวเติมเป็นเขม่าดำมีค่าสูงสุด ตามด้วย Sillitin N 85 ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม 2 วัน เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ EPDM เพิ่มขึ้น เพราะกระบวนการเชื่อมโยงเกิดเสร็จสมบูรณ์ที่ระยะเวลาการบ่ม 2 วัน จากนั้นการบ่มจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของยาง การเชื่อมโยงระหว่างยางเกิดการสลายตัว (Degradation) จากนั้นค่าความแข็งแรงดึงจึงลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นจนถึง 10 วัน ในส่วนของยาง EPDM ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตและที่ไม่มีสารตัวเติม ค่าความแข็งแรงดึงลดลงตามระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการบ่มทำให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงลดลงตั้งแต่เริ่มต้น [85]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่ออย่างน้ำซึมชนิดใหม่ที่มีกลื่นน้อย โดยจะเตรียมแผ่นยางน้ำซึมจากยาง EPDM และผงยางที่ได้จากขยะยาง เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ จากนั้นเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นท่ออย่างน้ำซึม โดยจะศึกษาเปรียบเทียบ อัตราส่วนของยาง EPDM ต่อผงยาง G-EPDM ชนิดของผงยางระหว่างผงยาง G-EPDM และผงยางรถยนต์ (GTR) และศึกษาการใส่สารให้ฟอง โดยมีแผนการดำเนินการดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาเวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสมและศึกษาปริมาณอัตราส่วนของยาง EPDM และผงยาง G-EPDM

ตอนที่ 2 ศึกษาชนิดของผงยางระหว่างผงยาง EPDM และผงยางรถยนต์ (GTR)

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

ตอนที่ 4 ศึกษาการขึ้นรูปท่ออย่างน้ำซึม

ตอนที่ 5 ศึกษากลื่นของท่ออย่างน้ำซึม

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.1-3.3 โดยขึ้นรูปชิ้นงานทุกสูตรด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) จากนั้นศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

- การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) เพื่อทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสที่ 20 และ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด นอกจากนี้ใช้ดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ OO (Shore OO durometer) เพื่อทดสอบค่าความแข็งกด

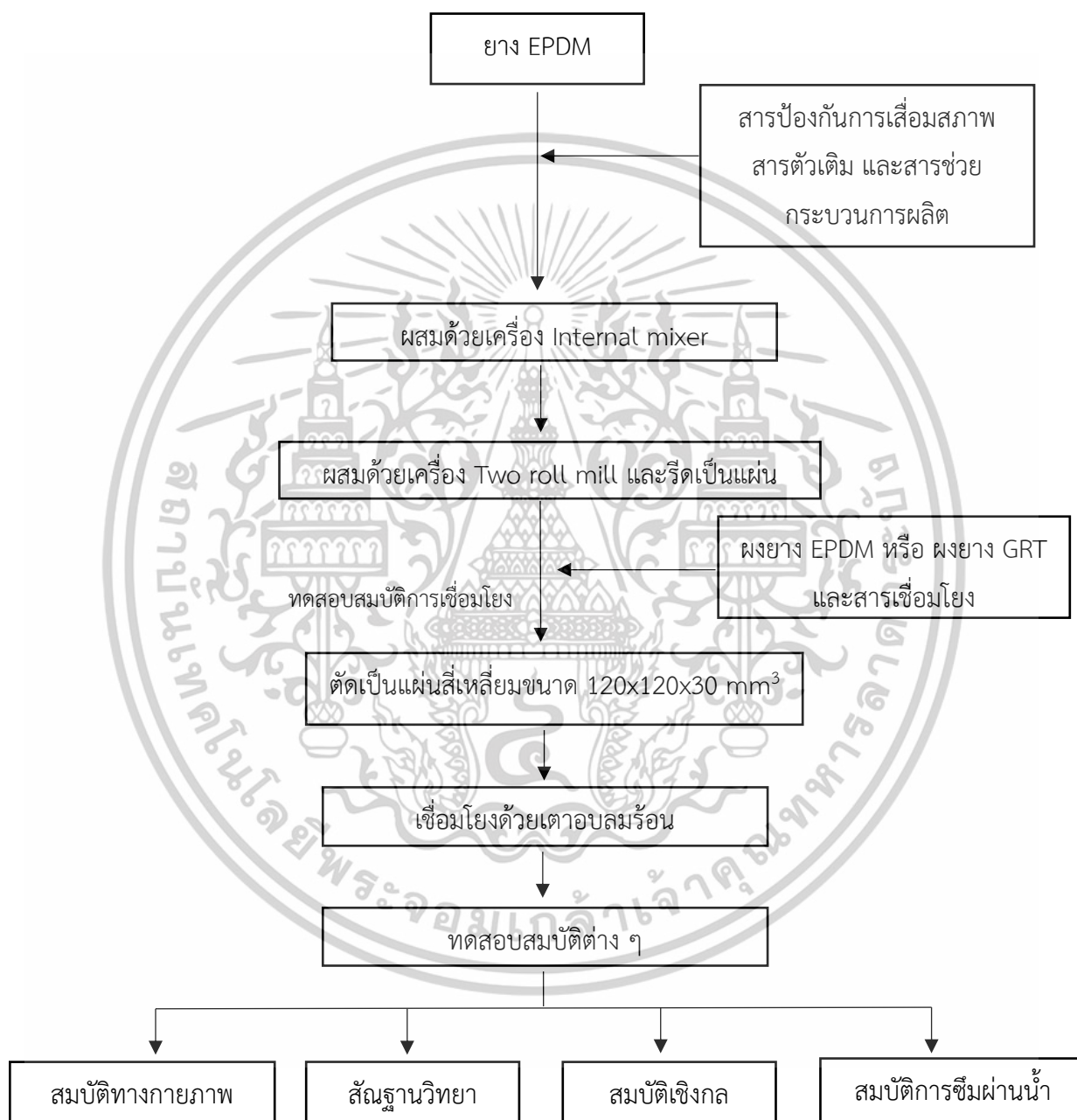
- การศึกษาสมบัติทางกายภาพ โดยการหาความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงาน

- การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฟองอากาศ

- การศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำ (Water permeability) ที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 bar

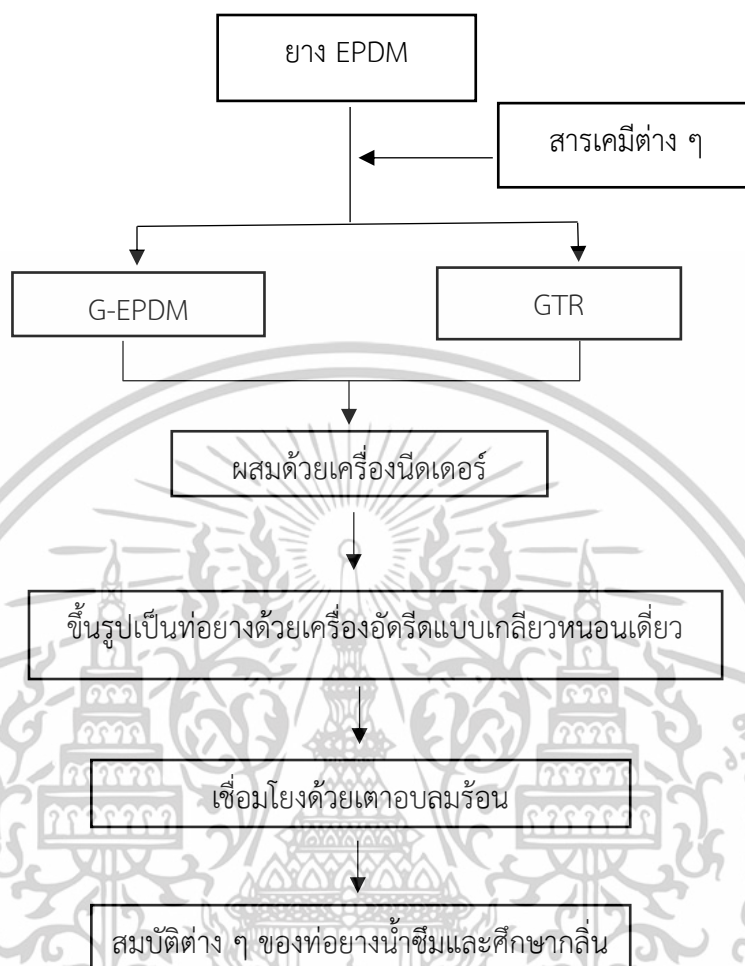
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง เลือกยางผสมสูตรที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดของการศึกษาในแต่ละตอนจากแผนดำเนินการ นำมาขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยวยศึกษาสมบัติท่อยางน้ำซึมและศึกษากลิ่น



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของแผ่นยางน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการเตรียมชิ้นงานและการทดสอบของท่อน้ำซึม

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ยาง EPDM เกรด Vistalon 5601 เกรดการค้า บริษัท ExxonMobil Chemical จำกัด
- สมบัติบางประการของยาง EPDM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.1
- ผงยาง EPDM บริษัท แมกซ์เวลล์ เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด
- ผงยางรถยนต์ (GTR) บริษัท แสงไทยผลิตยาง จำกัด
- สารตัวเติม Sillitin Z 86 เกรดการค้า บริษัท Hoffmann Mineral จำกัด
- สมบัติบางประการของสารตัวเติมซิลิกาที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.2
- สารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ (Luperox 101) เกรดการค้า บริษัท Arkema จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โคเอเจนต์ Trimethylolpropane trimethacrylate (TMPTMA) เกรดการค้า บริษัท Sartomer จำกัด
- สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil)
- สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) Octylated diphenyl amine (ODPA) เกรดการค้า บริษัท Double A Plus Intertrade จำกัด
- สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) Wingstay L เกรดการค้า บริษัท OMNOVA Solutions จำกัด
- สารให้ฟอง Azodicarbonamide modified (AZ) เกรดการค้า บริษัท A.F. Supercell จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยาง EPDM เกรด Vistalon 5601

สมบัติ	ค่าที่ได้	มาตรฐานการทดสอบ
ปริมาณสารแอนติออกซิแดนท์ (%wt)	0.17	ExxonMobil Method
ปริมาณ Ethylene (%wt)	69	ASTM D3900
ปริมาณ Ethylidene norbornene, ENB (%wt)	5.0	ASTM D3900
ความหนืดมูนนี่ [ML 1+4, 125°C]	72	ASTM D1646

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของสารตัวเติม Silletin Z 86 ($\text{SiO}_2\text{Al}[(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5]$)

สมบัติ	ค่าที่ได้	มาตรฐานการทดสอบ
ขนาดอนุภาค D_{50} (μm)	2	ISO 13320
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.6	DIN EN ISO 787 part 10
ความหนาแน่นรวม (Bulk density) (g/cm^3)	0.25	DIN ISO 903-1976
ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) (m^2/g)	14	DIN ISO 9277
ค่าการดูดซับน้ำมัน ($\text{g}/100 \text{ g}$)	50	DIN EN ISO 787 part 5
ค่า pH	8.5	DIN EN ISO 787 part 9
ปริมาณ SiO_2 (%)	82	DIN 51001 (RFA)
ปริมาณ Al_2O_3 (%)	12	DIN 51001 (RFA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90; Chareon Tut Co., Ltd.)
2. เครื่องผสมนืดเตอร์ (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. เครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill, รุ่น YFTR-6; Yong Fong Machinery Co., Ltd.)
5. เครื่องวัดความหนืดมูนี่ (Mooney viscometer, รุ่น SMV-201; Shimadazu Corporation.)
6. เครื่องวัดการเชื่อมโยงไม่มีงานหมุน (Moving die rheometer, รุ่น MDR 3000 Basic; Montech Co., Ltd.)
7. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extruder, รุ่น PARAMAX SEB Series for Extruder; Sumitomo Drive Technologies, Ltd.)
8. เตาอบลมร้อน (Hot air oven, รุ่น 30-750; Memmert GmbH + Co. KG)
9. เครื่องตัดชิ้นงานตัวอย่างแบบอเนกประสงค์ (Universal sample cutter, รุ่น 6052; Instron Corporation)
10. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, รุ่น QC-536M1; Comotech Testing Machines Co., Ltd.)
11. เครื่องวัดความแข็งชอร์โอโอ (Shore OO Hardness, รุ่น GS-754G; Teslock Co., Ltd.)
12. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, รุ่น LEO 1455VP; Carl Zeiss Co., Ltd.)
13. เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ

ตารางที่ 3.3 สูตรที่ใช้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)				
	ศึกษาอัตราส่วนยาง : ผงยาง			ศึกษาชนิดของผงยาง	
	50 : 50	60 : 40	70:30	ผงยาง EPDM	ผงยาง GTR
ยาง EPDM	100	100	100	100	100
ผงยาง G-EPDM	100	67	43	100	-
ผงยาง GTR	-	-	-	-	100
Sillitin Z 86	100	100	100	100	100
น้ำมันพาราฟิน	80	80	80	80	80
Azodicarbonamide modified	6	6	6	6	6
สารเติมแต่งอื่น ๆ : เปอร์ออกไซด์ 3, TMPTMA 1, ODP A 1 และ Wingstay L 1					

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การผสมสูตรยาง

1. ชั่งยางและสารเคมี ตามตารางที่ 3.3
2. ผสมเม็ดยาง EPDM สารตัวเติม Sillitin Z 86 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ ODP Wingstay L และสารให้ฟอง โดยผสมทุกอย่างให้กระจายตัวดีในถุงผสมเป็นเวลา 2 นาที
3. นำส่วนผสมข้อที่ 2 มาใส่ในเครื่องผสมแบบปิด สลับกับน้ำมันพาราฟิน เป็นเวลา 30 นาที ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 120°C
4. เติมผงยางโดยผสมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two roll mill) (ใช้เวลาประมาณ 10 นาที)
5. เติมโคเอเจนต์ (TMPTMA) และสารเชื่อมโยงเปอร์ออกไซด์ (Luperox 101) (ใช้เวลาประมาณ 5 นาที) แล้วรีดยางให้เป็นแผ่น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืนก่อนนำไปใช้งาน

3.4.2 การขึ้นรูปชิ้นงานและเวลาการเชื่อมโยง

ชั่งยางและสารเคมีตามตารางที่ 3.3 โดยทำการผสมยางตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.4.1 โดยมีการขึ้นรูปชิ้นงาน 2 วิธี คือ การขึ้นรูปเป็นแผ่นยางน้ำซิมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง และการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว

1. การขึ้นรูปเป็นแผ่นยางน้ำซิมด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง นำยางผสมสูตรมารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งให้มีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร และตัดให้ได้ขนาด 120 x 120 x 3 mm³ แล้วนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 25 35 45 55 และ 65 นาที และทำการโพสต์เคียวเพื่อกำจัดกลิ่น และอนุมูลอิสระที่ตกค้างโดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2. การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว นำยางผสมสูตรที่ตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 5 cm ใส่เข้าไปในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวโดยมีอุณหภูมิของสกรู (Screw) กระบอกลำสกรู (Barrel) และอุณหภูมิของตาย (Die) 50°C ปรับความเร็วสกรู (Screw speed) 30 รอบต่อนาที ยางที่ออกจากตายจะมีลักษณะเป็นท่อ โดยมีรายละเอียดของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวดังนี้

- ความยาว : เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L:D) = 12:1

- เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diametrical screw clearance) = 0.13-0.20 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ดาย (Die) มีลักษณะเป็นวงกลม 2 อันซ้อนกัน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 และ 18 mm

เมื่อได้ตัวอย่างน้ำซึมจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวแล้วทำการเชื่อมโยงตัวอย่างด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 55 นาที และทำการโพสต์เคียวเพื่อกำจัดกลิ่น และอนุมูลอิสระที่ตกค้างโดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.4.3 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของตัวอย่างน้ำซึม

3.4.3.1 ศึกษาเวลาเชื่อมโยงที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน ยางEPDM:ผงยาง EPDM เท่ากับ 50:50 60:40 และ 70:30 และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.3 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 25 35 45 55 และ 65 นาที และทำการโพสต์เคียวเพื่อกำจัดกลิ่น และอนุมูลอิสระที่ตกค้าง โดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล

3.4.3.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างยาง EPDM:ผงยาง EPDM

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน ยางEPDM:ผงยาง EPDM เท่ากับ 50:50 60:40 และ 70:30 และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.3 ด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 55 นาที และทำการโพสต์เคียวเพื่อกำจัดกลิ่น และอนุมูลอิสระที่ตกค้างโดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และทดสอบการซึมน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3.3 ผลของชนิดผงยาง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน ยางEPDM:ผงยาง เท่ากับ 50:50 โดยใช้สารตัวเติม Siliitin Z 86 ในปริมาณ 100 phr ผงยาง EPDM หรือผงยาง GTR ในปริมาณ 100 phr และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.3 ด้วยเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 55 นาที และทำการโพสต์เคียวเพื่อกำจัดกลิ่น และอนุมูลอิสระที่ตกค้างโดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และทดสอบการซึมผ่านน้ำ

3.4.3.4 ผลของชนิดผงยาง G-EPDM และ ผงยาง GTR ที่ส่งผลต่อสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน ยางEPDM:ผงยาง EPDM หรือผงยาง GTR เท่ากับ 50:50 สารให้ฟอง 6 phr และสารตัวเติม Sillitin Z 86 100 phr และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.3 ด้วยเครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปด้วยเครื่องผสมแบบ 2 ลูกกลิ้ง จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 55 นาที และทำการโพสต์เคียวเพื่อกำจัดกลิ่น และอนุมูลอิสระที่ตกค้างโดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพโดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบก่อนและหลังทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ

3.4.3.5 ผลของการขึ้นรูปเป็นท่ออย่างน้ำซึมระหว่างผงยาง G-EPDM และ ผงยาง GTR

ขั้นตอนที่ 1 ทำการผสมตามสูตรที่ประกอบด้วยอัตราส่วน ยางEPDM:ผงยาง เท่ากับ 50:50 โดยใช้สารตัวเติม Siliitin Z 86 ในปริมาณ 100 phr ผงยาง EPDM หรือผงยาง GTR ในปริมาณ 100 phr และสารเติมแต่งตามตารางที่ 3.3 ด้วยเครื่องผสมชนิดเดอร์และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด จากนั้นทำการเชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C เป็นเวลา 55 นาที และทำการโพสต์เคียวเพื่อกำจัดกลิ่น และอนุมูลอิสระที่ตกค้างโดยนำไปเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100° C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2 ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างน้ำซึ่ม ศึกษาคลื่น

3.4.4 การทดสอบและวิเคราะห์

3.4.4.1 วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงยางแต่ละชนิด

ซึ่งผงยางแต่ละชนิดปริมาณ 50 กรัม ร้อนผ่านตะแกรงร้อนที่มีขนาดของรูตะแกรงแตกต่างกันเพื่อคัดแยกขนาดอนุภาค โดยขนาดของตะแกรงจะกำหนดเป็นมาตรฐานด้วย Mesh No. การใช้งานตะแกรงคัดแยกขนาดนี้จะใช้งานร่วมกับเครื่องเขย่า เพื่อร่อนอนุภาคให้ตกลงด้านล่าง โดยตะแกรงคัดแยกขนาดที่ใช้จะประกอบไปด้วยตะแกรงคัดแยกขนาด Mesh No. 35, 50, 70, 100, 200 และ 270

3.4.4.2 การทดสอบการเชื่อมโยงยาง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D5289 วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบยางผสมสูตรด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงไม่มีงานหมุน (MDR) ใช้อุณหภูมิการทดสอบ 170°C หาค่าเวลาการเชื่อมโยง (Cure time, t_{c90})

3.4.4.3 การทดสอบความหนืดมูนนี่

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

3.4.4.4 การทดสอบความหนาแน่น

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงด้วยเตาอบลมร้อน แล้วให้ได้ขนาดประมาณ 40x40x3 mm³ ทำการทดสอบโดยคำนวณหาจากน้ำหนักและปริมาตรของชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่น

3.4.4.5 การทดสอบสมบัติรับแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D412 การเตรียมชิ้นงานทดสอบทำการตัดชิ้นงานที่เชื่อมโยงแล้วให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะ Die C เป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ซึ่งกำหนดสถานะในการทดสอบดังนี้

ระยะทดสอบ (Gauge length) 25 mm

ความเร็วที่ใช้ดึง (Test speed) 500 mm/min

โหลดเซลล์ (Load cell) 2 kN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบขาด
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะเริ่มต้น (mm²)

$$20\% \text{ Modulus} = F/A \quad (3.2)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบยืด 20%
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะเริ่มต้น (mm²)

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

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบยืด 100%
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบขณะเริ่มต้น (mm²)

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

เมื่อ L คือ ระยะที่ชิ้นงานทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (mm)
L₀ คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (mm)

3.4.4.6 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D624 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 (kN/m)
F คือ แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด (kN)
d คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

3.4.4.7 การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240 วิธีการทดสอบ ทดสอบด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ OO (Shore OO durometer) โดยชิ้นงานทดสอบความแข็งกดจำนวน 10 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) วางซ้อนกันบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานข้างล่างให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 15 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด ค่าที่รายงานเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัด 10 ครั้ง

3.4.4.8 การศึกษาพื้นฐานวิทยา

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยทำการตัดชิ้นงานที่มีการเชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่าง และการกระจายตัวของรูพรุน

3.4.4.9 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

การทดสอบ ASTM D573 ทดสอบโดยการนำชิ้นงานไปต้มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 70 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและเปรียบเทียบกับสมบัติของชิ้นทดสอบก่อนต้มเร่ง รายงานผลในรูปของค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงฉีกขาด มอดูลัส และความแข็ง

3.4.4.10 การบันทึกกลิ่นจากบุคคลที่อยู่ในบริเวณที่ขึ้นรูปจำนวน 20 คน

โดยศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างน้ำซิมชนิดเก่าที่ทำจากยางธรรมชาติผสมยางรีเคลมและใช้ผงยางรถยนต์ กับตัวอย่างน้ำซิมชนิดใหม่ที่ตัวจากเนื้อยาง EPDM และผงยาง EPDM หรือ ผงยาง GTR ว่าส่งกลิ่นแตกต่างกันอย่างไร โดยให้บุคคลที่อยู่ในบริเวณที่ขึ้นรูปจำนวน 20 คน ลงบันทึกความแรงของกลิ่นที่ได้รับโดยใช้แบบสอบถาม

3.4.4.11 วิเคราะห์ VOCs โดยเทคนิค Headspace GC-MS

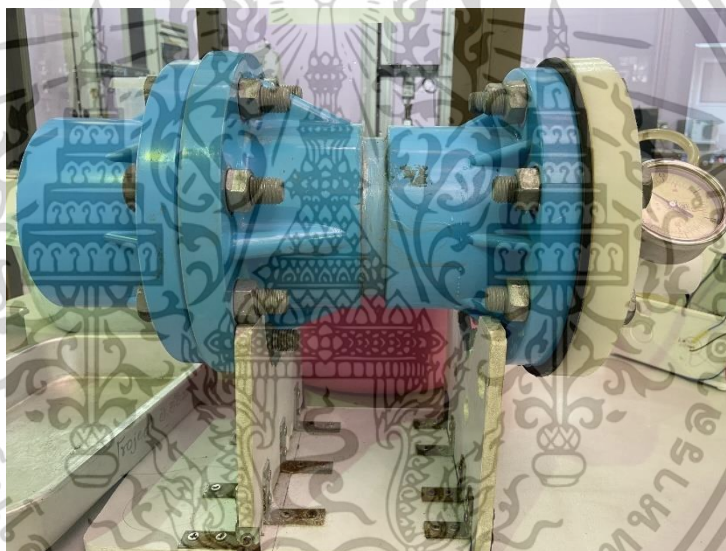
เตรียมตัวอย่างชิ้นงานที่มีน้ำหนักประมาณ 2 กรัมใส่ขวดแก้วมีฝาปิดปริมาตร 10 มิลลิลิตร ขวดถูกนำไปต้มที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่าง 1 มิลลิลิตรจาก headspace ของขวดและฉีดเข้าไปในพอร์ตฉีดของ GC ที่อุณหภูมิ 240°C ในโหมด splitless โดยใช้คอลัมน์ RTX-VMS (30 ม. × 0.25 มม., ความหนาของฟิล์ม 0.25 μm , พร้อมกับตั้งอุณหภูมิเตาอบดังนี้ เริ่มต้นที่ 40°C 5 นาที เพิ่มอุณหภูมิที่อัตรา 2°C ต่อนาทีจนถึง 80°C และเพิ่มอัตรา 4°C ต่อนาทีจนถึง 245°C 15 นาที สภาวะการทำงานของแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer) คือโหมด ionization แบบ electron ionization อุณหภูมิ auxiliary 240°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของแหล่งไอออน (ion source) 250°C อุณหภูมิของ quadrupole 150°C และช่วงการสแกน m/z 35 ถึง 500 เวลาทั้งหมดของทดสอบอยู่ที่ประมาณ 81 นาที

3.4.4.12 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ

วิธีการทดสอบตัวอย่างแผ่นยางน้ำซึม สุ่มเลือกตัวอย่างจำนวน 3 แผ่น ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) โดยติดตั้งเกจวัดความดัน (Pressure gauge) ที่เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านน้ำ ที่ความดันต่าง ๆ คือ 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 bar โดยทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งตัวอย่างแผ่นยางน้ำซึมมีลักษณะเป็นวงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 cm รายงานผลในรูปของปริมาณการซึมผ่านของน้ำต่อพื้นที่ของแผ่นยางต่อเวลา ($l/m^2/h$) แสดงวิธีการทดสอบดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาท่อยางน้ำซึมชนิดก้นน้อยที่สามารถทนทานต่อดิน ฟ้า อากาศ เพื่อนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำแบบแม่นยำ ซึ่งเป็นการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังตอบโจทย์การใช้งานเกษตรอัจฉริยะ สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการเกษตรในเมือง (Urban agriculture) ใช้กับสวนแนวตั้ง (Vertical garden) หรือสวนแขวนเพดาน (Ceiling garden) เป็นต้น โดยท่อยางจะขึ้นรูปโดยใช้วัสดุที่ยืดหยุ่นและเป็นขยะจากผลิตภัณฑ์ยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (EPDM) และขยะจากรถยนต์ ซึ่งตอบโจทย์แนวคิด Circular economy ในงานวิจัยนี้เน้นศึกษาการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมที่มีก้นน้อย เพื่อนำไปใช้งานจริงกับสวนแนวตั้ง (Vertical garden) ศึกษาความทนทานต่อดิน ฟ้า อากาศของท่อยาง ศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำ และศึกษาต้นทุนในการผลิต ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแนวเปรียบเทียบ (Comparative study) เพื่อศึกษาผลของบางปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของท่อยางน้ำซึม เช่น เวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสม อัตราส่วนระหว่างยาง EPDM ต่อผงยาง ชนิดของผงยางระหว่างผงยาง EPDM (G-EPDM) และผงยางรถยนต์ (GTR) โดยแบ่งขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

ตอนที่ 1 วิเคราะห์อนุภาคของผงยางแต่ละชนิด

ตอนที่ 2 ศึกษาสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสม และปริมาณอัตราส่วนของยาง EPDM ต่อผงยาง EPDM (G-EPDM)

ตอนที่ 3 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดผงยาง EPDM (G-EPDM) และ ผงยาง GTR

ตอนที่ 4 ทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

ตอนที่ 5 ศึกษาการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม และศึกษากลับ

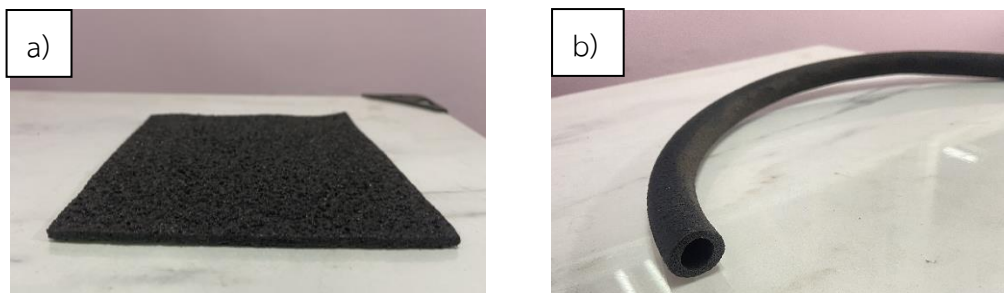
ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมตัวอย่าง 2 ลักษณะ คือ

1. ตัวอย่างแผ่นยางน้ำซึม (Porous rubber sheet) เพื่อใช้ศึกษาแบบจำลอง (Model study) ขนาด $120 \times 120 \times 3 \text{ mm}^3$ แสดงดังรูปที่ 4.1(a) เพื่อใช้ศึกษาในตอนต้นที่ 2-4

2. การเตรียมตัวอย่างเป็นท่อยางน้ำซึม (Porous rubber pipe) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหมุนเดี่ยว เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $18.0 \pm 1 \text{ mm}$ ความหนา $3.0 \pm 0.5 \text{ mm}$ แสดงดังรูปที่ 4.1(b) เพื่อใช้ศึกษาในตอนต้นที่ 5 โดยเลือกเฉพาะสูตรที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

การทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติเชิงกล เพื่อวิเคราะห์ผลโดยเลือกสูตรที่น่าสนใจนำมาขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมเพื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ และศึกษากลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ a) แผ่นยางน้ำซึม และ b) ท่อยางน้ำซึม

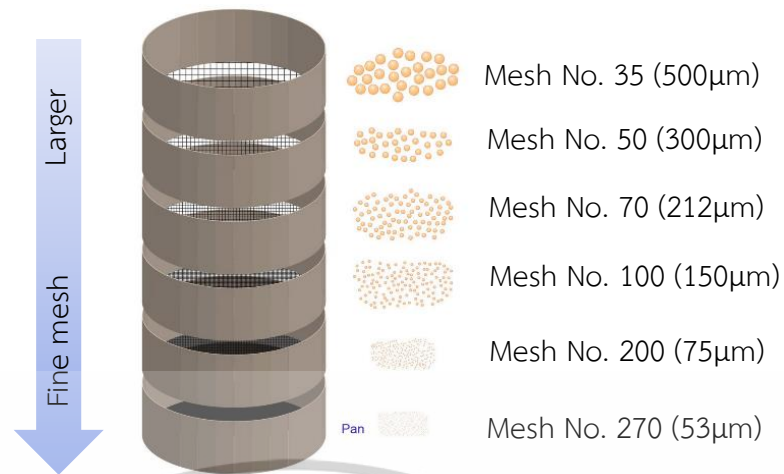
4.1 วิเคราะห์อนุภาคของผงยางแต่ละชนิด

ในงานวิจัยนี้มีการใช้ผงยางในสัดส่วนที่มาก เนื่องจากต้องการให้เกิดโครงสร้างแบบเซลล์เปิด (Open cell) ในชิ้นงาน เพื่อให้ น้ำสามารถซึมผ่านออกมาได้ ซึ่งผงยางจะทำหน้าที่เหมือนสารตัวเติม (Filler) ดังนั้นขนาดและรูปร่างของผงยาง จึงส่งผลต่อการเกิดรูระหว่างผงยาง และสมบัติเชิงกล จำเป็นต้องมีการศึกษาการกระจายขนาดของอนุภาคของผงยาง ศึกษารูปร่างของผงยางจากภาพถ่าย และสัณฐานวิทยา

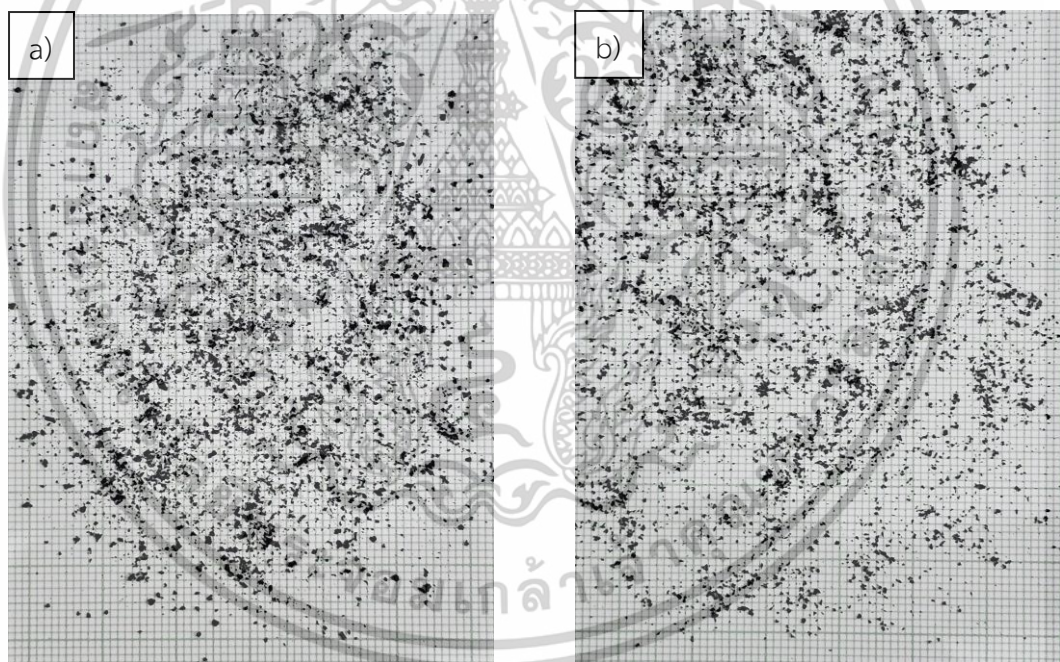
4.1.1 วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงยางแต่ละชนิด (Sieve analysis)

จากการนำผงยาง EPDM (G-EPDM) และผงยางรถยนต์ (GTR) มาวิเคราะห์ขนาดด้วยเทคนิค Sieve analysis โดยแสดงผลดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1 พบว่าการกระจายขนาดอนุภาคของผงยาง G-EPDM ส่วนใหญ่ประมาณ 48% ตกค้างบนตะแกรงที่มีขนาดความละเอียดมากกว่า 35 เมช (>500 μm) และพบการกระจายขนาดในช่วง 35-50 เมช (300-500 μm) ประมาณ 25% โดยที่ขนาดของผงยางในช่วง 50-270 เมช รวมกันเพียงประมาณ 27% ดังนั้นสรุปได้ว่าอนุภาคผงยาง G-EPDM มีขนาดที่เป็นผงเล็ก ๆ เพียงเล็กน้อย และจากการวิเคราะห์ผงยาง GTR แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคผงยาง GTR ส่วนใหญ่ ประมาณ 51% ตกค้างบนตะแกรงความละเอียดในช่วง 35-50 เมช (300-500 μm) และพบการกระจายขนาดในช่วง 50-70 เมช (212-300 μm) ประมาณ 23% โดยที่ขนาดของผงยางในช่วง 70-270 เมช รวมกันประมาณ 15% และที่ขนาดมากกว่า 35 เมช (>500 μm) พบประมาณ 11% จะเห็นได้ว่าผงยาง G-EPDM มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ที่ใหญ่กว่าขนาดของผงยาง GTR และเมื่อสังเกตจากรูปถ่ายผงยางดังรูปที่ 4.3 จะพบว่าผงยาง G-EPDM มีขนาดใหญ่มากกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

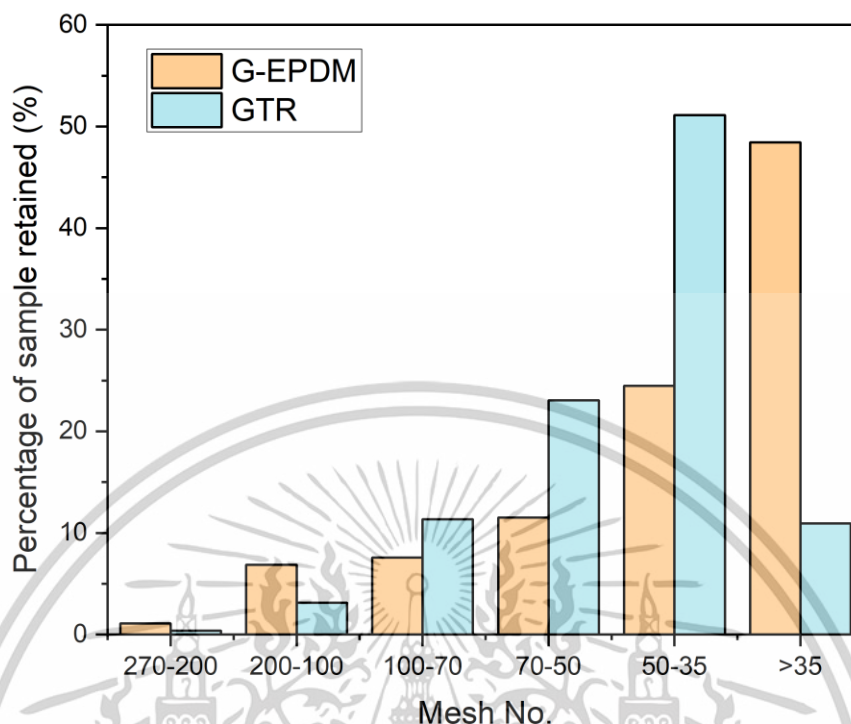


รูปที่ 4.2 แสดงกระบวนการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงยางโดยตะแกรงร่อน (ดัดแปลงจาก [86])



รูปที่ 4.3 รูปถ่ายผงยางที่ใช้ในงานวิจัยบนกระดาษกราฟขนาดช่อง 1 มม. a) ผงยาง G-EPDM
b) ผงยาง GTR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การกระจายขนาดของผงยาง G-EPDM และ GTR

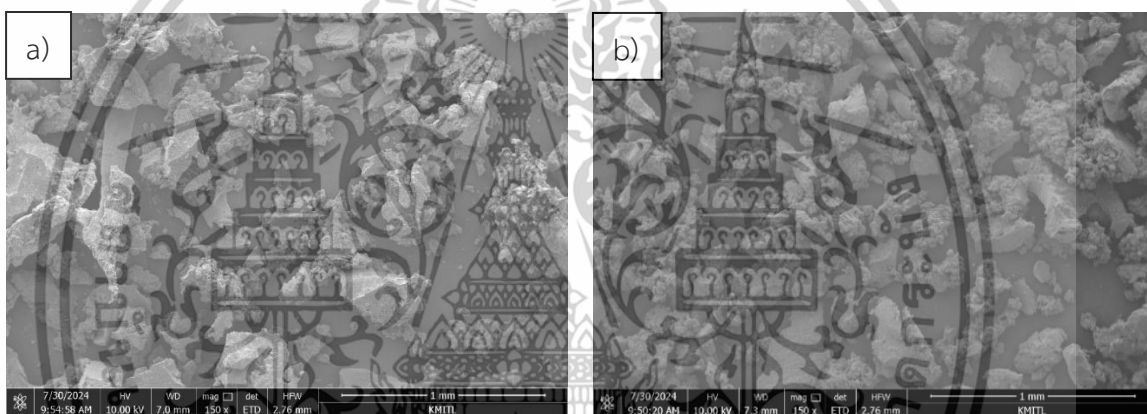
ตารางที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของผงยาง G-EPDM และผงยาง GTR

ขนาดตะแกรงเมช	เปอร์เซ็นต์ตัวอย่างที่ตกค้าง (%)	
	G-EPDM	GTR
270-200 (53-75 μm)	1.10	0.38
200-100 (75-150 μm)	6.87	3.13
100-70 (150-212 μm)	7.59	11.34
70-50 (212-300 μm)	11.50	23.06
50-35 (300-500 μm)	24.49	51.13
>35 (>500 μm)	48.45	10.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผงยางแต่ละชนิด

จากการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผงยางทั้ง 2 ชนิด พบว่าผงยาง GTR มีขนาดเล็กกว่าผงยาง G-EPDM โดยยืนยันผลจากการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงยางที่กล่าวไปข้างต้น และผงยาง GTR มีลักษณะของอนุภาคที่ขรุขระมากกว่าผงยาง G-EPDM ซึ่งมีลักษณะอนุภาคที่ค่อนข้างมีเหลี่ยมคม แสดงดังรูปที่ 4.5 เนื่องจากผงยาง G-EPDM และผงยาง GTR ได้มาจากขยะของผลิตภัณฑ์ยาง EPDM และยางรถยนต์ที่เป็นยางธรรมชาติ ซึ่งจะผ่านกระบวนการบดด้วยเครื่องบด โดยยาง EPDM มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) สูงกว่ายางธรรมชาติ ($T_{g(EPDM)} = -60^{\circ}\text{C}$, $T_{g(NR)} = -72^{\circ}\text{C}$ [87, 88]) ทำให้ผงยาง G-EPDM มีสถานะคล้ายแก้วซึ่งมีความแข็งมากกว่าผงยาง GTR ที่มีความเป็นยาง ทำให้ในขณะที่บดยาง EPDM ที่มีความแข็งจึงถูกบด ถูกตัดได้ง่ายกว่า ดังนั้น ผงยาง G-EPDM ที่ได้จึงมีความเป็นเหลี่ยมคมมากกว่าผงยาง GTR



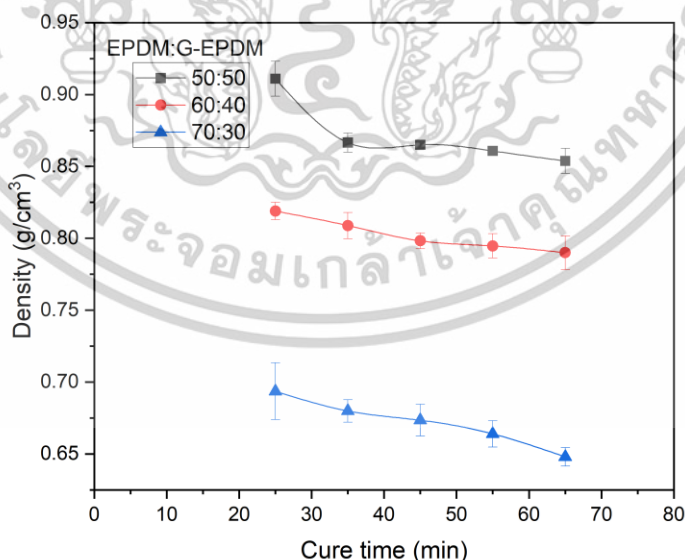
รูปที่ 4.5 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของผงยางที่กำลังขยาย 150 เท่า a) G-EPDM
b) GTR

4.2 ศึกษาสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสม และปริมาณอัตราส่วนของยาง EPDM ต่อผง G-EPDM

กระบวนการเชื่อมโยงยางเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นยางเนื่องจากยางที่ไม่ผ่านการเชื่อมโยงโดยทั่วไปจะไม่แข็งแรง ไม่สามารถคงรูปได้ และอาจมีการเหนียวติด จึงต้องมีการเชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางเพื่อให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์เป็นตัวอย่างน้ำขี้มนชนิดเซลล์เปิด (Open cell) เพื่อให้น้ำสามารถซึมออกมาอย่างสม่ำเสมอจึงต้องเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมโยง และการสลายตัวเป็นแก๊สของสารให้ฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลที่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปแล้ว อุณหภูมิสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) ของสารให้ฟอง AZ อยู่ในช่วงอุณหภูมิ $205-215^{\circ}\text{C}$ แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารให้ฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์ชนิดดัดแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

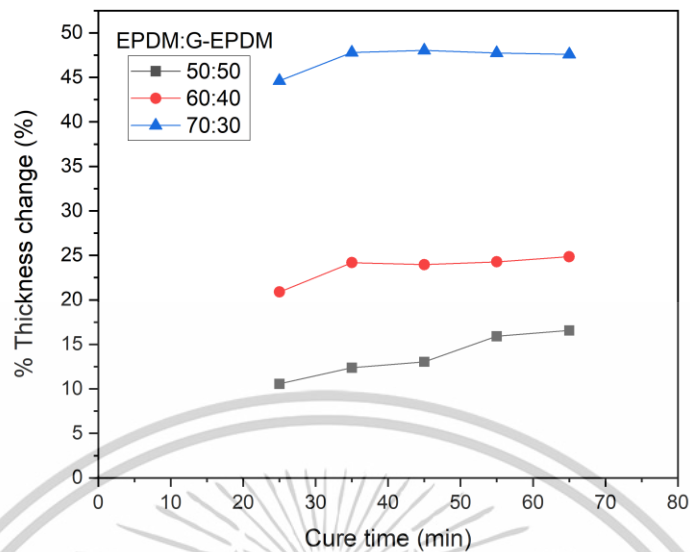
(Azodicarbonamide modified) เนื่องจากต้องการสารให้ฟองที่ไม่ส่งกลิ่น อีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลง โดยจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 160°C ในงานวิจัยนี้ทำการเชื่อมโยงโดยใช้เตาอบลมร้อน (Hot air oven) จึงไม่สามารถนำเวลาการเชื่อมโยงจากเครื่อง MDR มาใช้ได้ เนื่องจากเตาอบลมร้อนใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนมาสู่ยางคอมปาวด์ ซึ่งทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเครื่องมือทดสอบ MDR ที่ถ่ายเทความร้อนโดยตรงจากโลหะที่สัมผัสกับยางคอมปาวด์โดยตรง

งานวิจัยนี้ศึกษาเวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสม (Cure characteristics) และกลไกในการเกิดฟอง โดยการขึ้นรูปเป็นแผ่นยางน้ำซึมที่มีอัตราส่วนยาง EPDM ต่อผงยาง EPDM (EPDM:G-EPDM) เท่ากับ 50:50 60:40 และ 70:30 (โดยน้ำหนักเทียบกับยาง) มีการใช้สารให้ฟอง AZ 6 phr จากนั้นทำการเชื่อมโยงโดยการให้ความร้อนด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 170°C โดยเริ่มเชื่อมโยงที่ 25-65 นาที ซึ่งจากการศึกษาเวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูป พบว่าสารให้ฟองเริ่มทำงานในช่วง 35 นาทีแรก ซึ่งนำไปสู่การเกิดฟองที่เป็นเซลล์ปิด (Close cell) ภายในชิ้นงาน ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง และเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาเพิ่มขึ้นค่อนข้างมากใน 35 นาทีแรก แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 และเมื่อเวลาเชื่อมโยงนานขึ้น จะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการเชื่อมโยงที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสลายตัวของสารให้ฟองเกิดยากขึ้น ทำให้ทั้งสองค่าข้างต้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

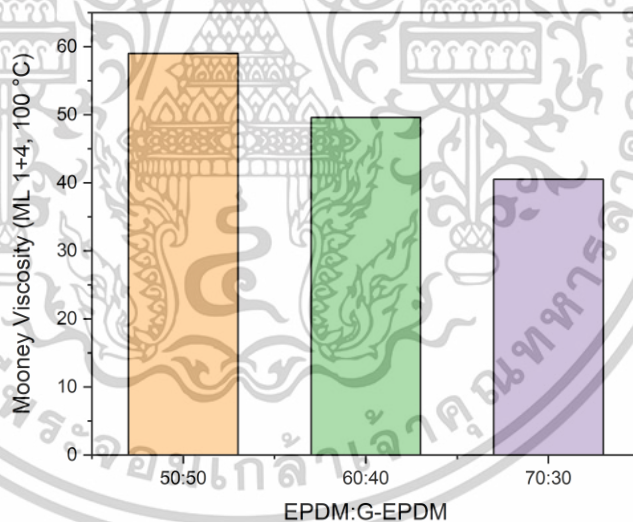


รูปที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



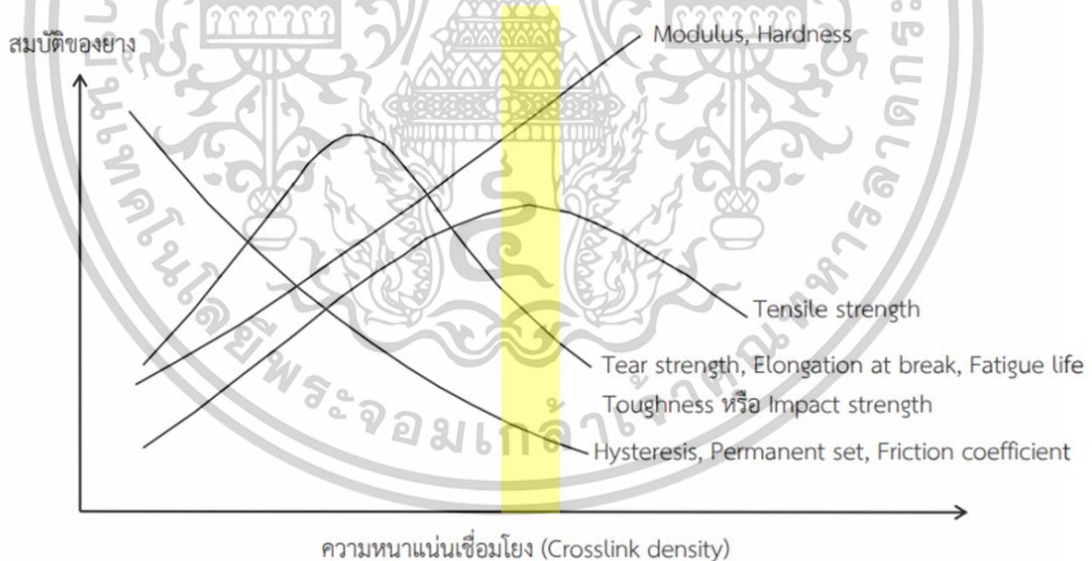
รูปที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.8 ค่าความหนืดมูนนี่ยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ที่อัตราส่วนที่ต่างกัน

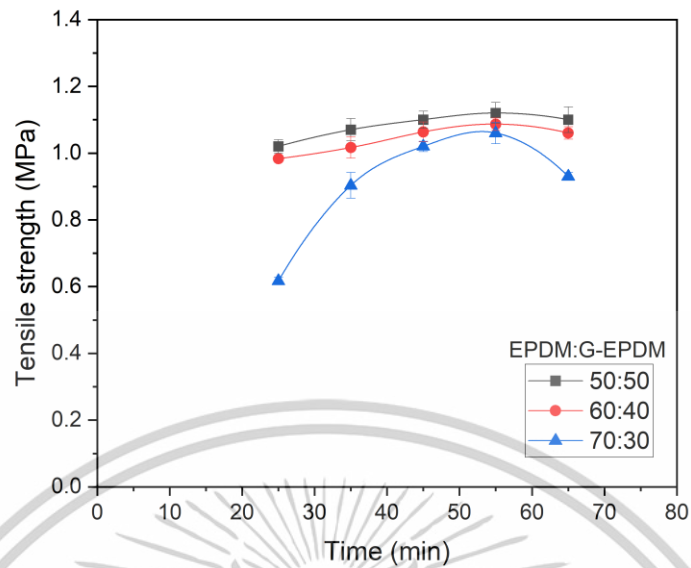
โดยจากการศึกษาเวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสม ยังพบว่าในช่วงแรกยางยังเกิดการเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างโมเลกุลของยางเป็นสายโซ่ตรง สายโซ่โมเลกุลยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและหลุดออกจากกันได้ (Disentangle) และเมื่อเวลาเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) จะเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) สูงขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมโยง (Optimum point) ที่เวลาเชื่อมโยง 55 นาที แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ในจุดนี้โครงสร้างโมเลกุลของยางได้เชื่อมโยงเป็นตาข่ายสามมิติ (3-Dimensional network) ที่สมบูรณ์ หลังจากจุดสูงสุดสายโซ่จะเคลื่อนที่ได้อย่างจำกัดเนื่องจากเกิดโครงสร้างร่างแหที่หนาแน่น ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่เพื่อกระจายแรงที่ได้รับได้ ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าความแข็งแรงฉีกขาดลดลง แสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ขณะเดียวกันค่าความแข็ง (Hardness) ค่ามอดุลัสที่ 20 และ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20, M100) เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยง แสดงดังรูปที่ 4.13 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น[89, 90]โดยแนวโน้มของสมบัติเชิงกลที่พบในข้างต้นเมื่อค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นนั้นเป็นไปตามรูปที่ 4.9 ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) จะลดลงอย่างมากในช่วงแรกและลดลงช้า ๆ เมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.12 เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเสียรูปแบบแรงดึง [91-93]

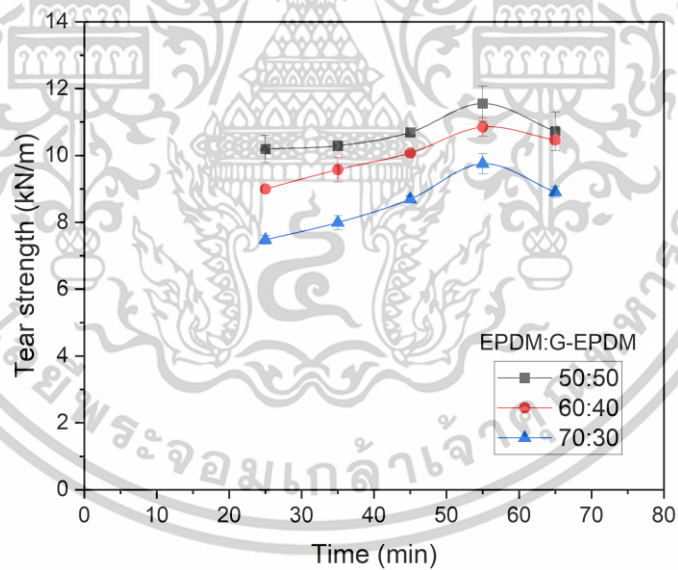


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกล [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

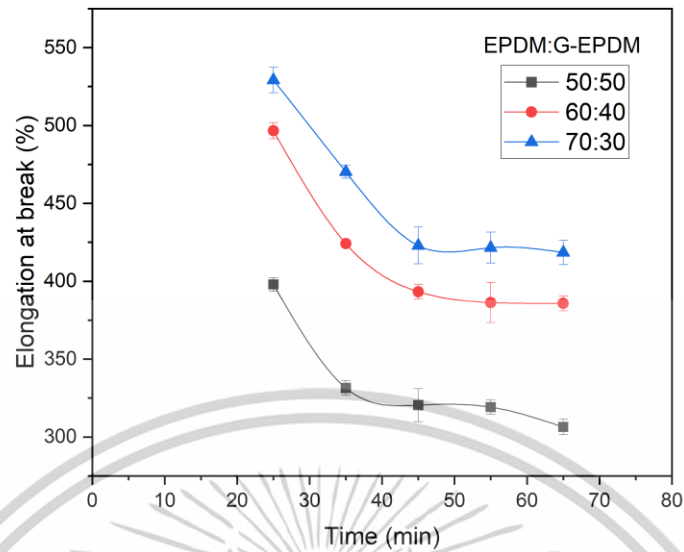


รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

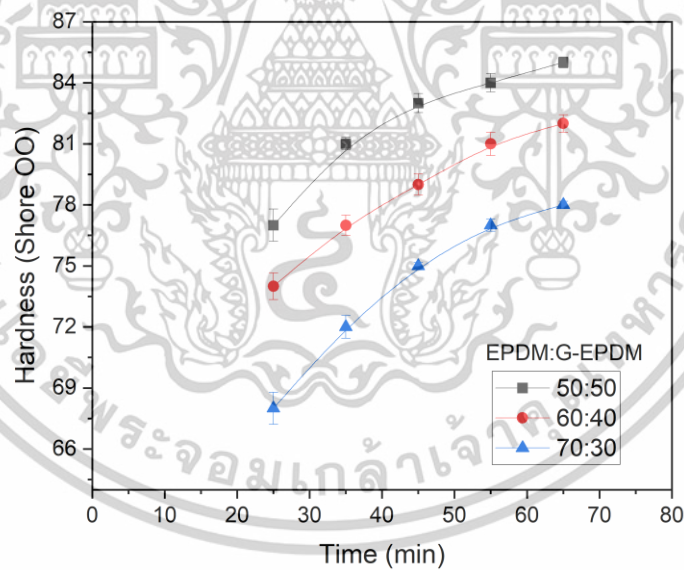


รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

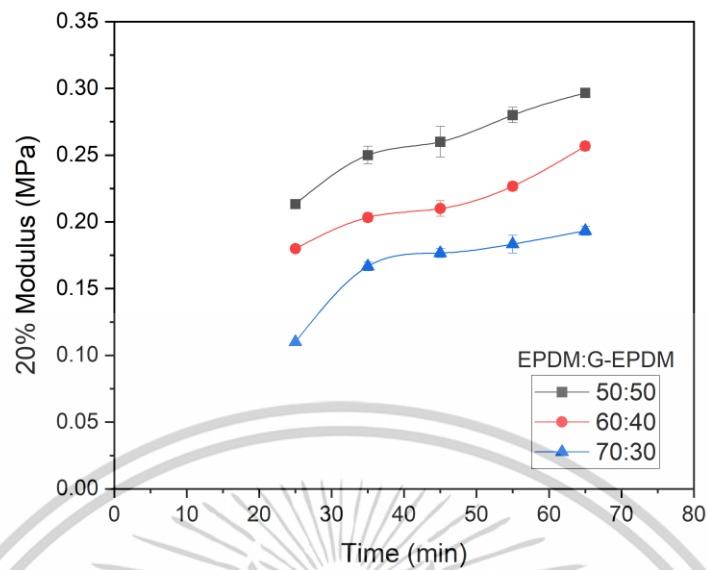


รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วน และเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

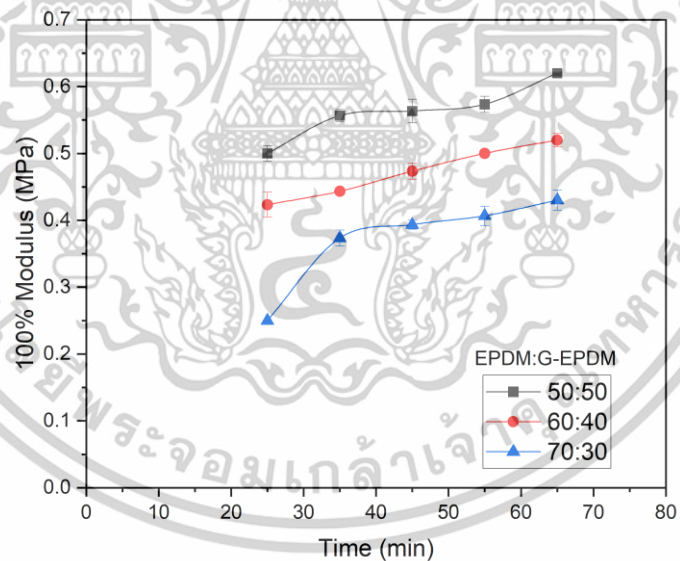


รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งกดชอร์ OO ของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ค่ามอดุลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20) ของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

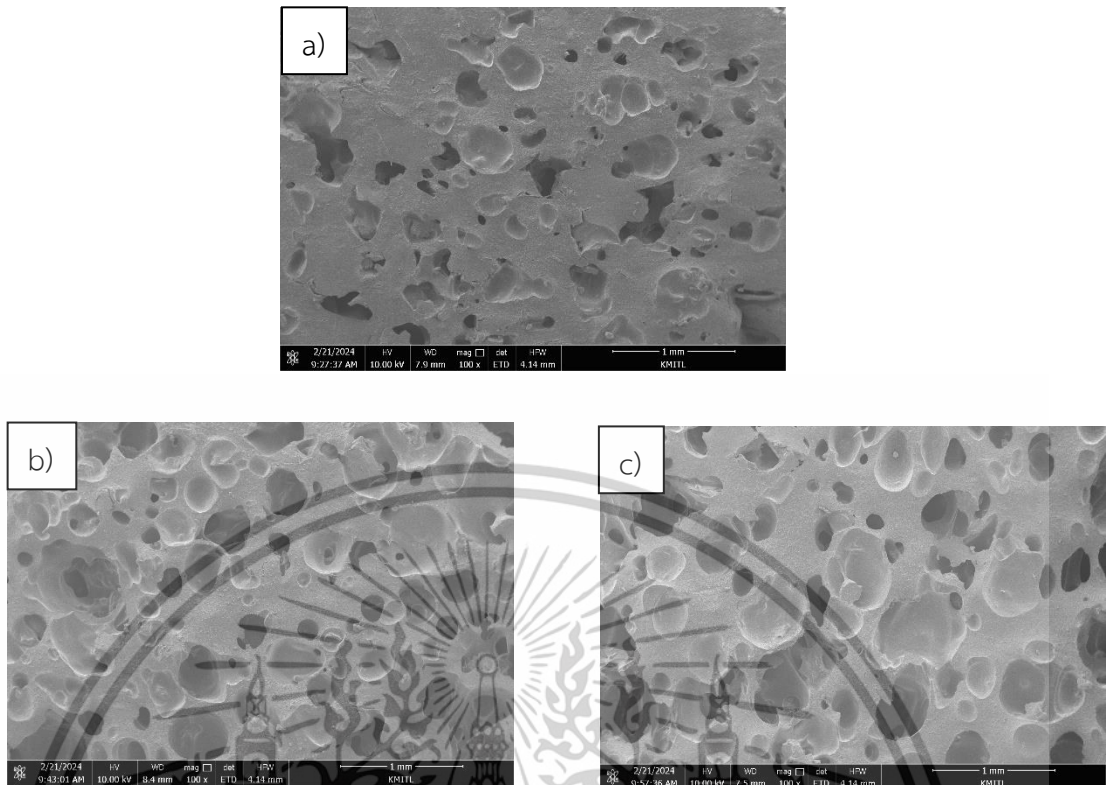


รูปที่ 4.15 ค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M100) ของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ในอัตราส่วนและเวลาในการเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน

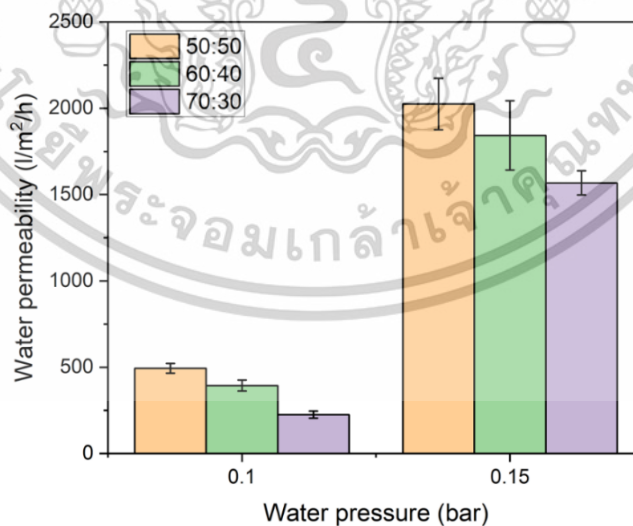
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้มีการควบคุมปริมาณสารให้ฟองคงที่ที่ปริมาณ 6 phr โดยเป็นการเทียบกับปริมาณเนื้อยางที่เป็นเมทริกซ์ อย่างไรก็ตามในสูตรมีการใช้ปริมาณเนื้อยางผงบดที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นที่อัตราส่วนเนื้อยาง EPDM:ผงบด G-EPDM ที่ 70:30 60:40 และ 50:50 จึงมีเปอร์เซ็นต์ของสารให้ฟองที่ประมาณ 4.2% 3.6% และ 3% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีปริมาณเนื้อยางที่มากจะทำให้มีการใช้สารให้ฟองมาก และเนื่องจากฟองที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟองจะเกิดที่บริเวณเมทริกซ์เนื้อยาง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากค่าความหนาแน่นแสดงดังรูปที่ 4.6 ที่อัตราส่วน 70:30 มีค่าต่ำที่สุด และพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่อัตราส่วน 70:30 มีค่าสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณเนื้อยางมากจะสามารถเกิดฟองได้มากที่สุด ยืนยันผลการเกิดฟองจากภาพสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.16 อีกทั้งเมื่ออัตราส่วนผงบดที่มากขึ้นทำให้ความหนืดมูนนี้เพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.8 ดังนั้นประสิทธิภาพการสลายตัวของสารให้ฟองจะขยายตัวน้อยลงเมื่อได้รับความร้อน ทำให้การรวมตัวของฟองอากาศ (Bubble coalescence) เกิดได้ยากขึ้น [94, 95] ซึ่งส่งผลให้เกิดฟองอากาศแบบเซลล์ปิดที่เป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micro-porous structures) ดังที่แสดงในภาพสัณฐานวิทยา รูปที่ 4.16 a)

เนื่องจาก G-EPDM ผ่านการเชื่อมโยงมาแล้ว จึงทำหน้าที่เหมือนเป็นสารตัวเติม (Filler) ดังนั้นเมื่อมีปริมาณผงบดมากขึ้น ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงแรงฉีกขาด ค่าความแข็งและค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.13-4.15 ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณผงบดทำให้เกิดช่องว่าง (Opening channels) ระหว่างผงบดปริมาณมากขึ้น ซึ่งเกิดเป็นตำหนิ (Defect) ในชิ้นงาน จึงทำให้ชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักมากขึ้น [96-98] ดังนั้นที่อัตราส่วน 50:50 จึงแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.12



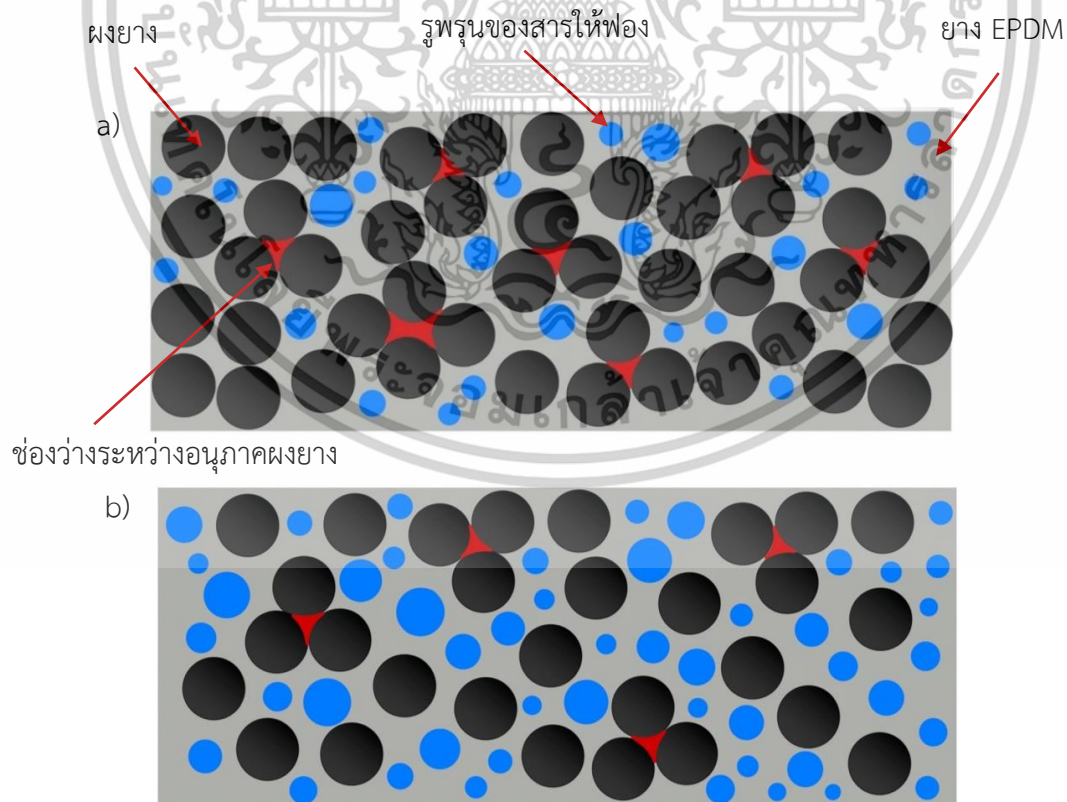
รูปที่ 4.16 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 100 เท่าของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้อัตราส่วนของ EPDM:G-EPDM ที่ต่างกัน ที่เวลาการเชื่อมโยง 55 นาที a) 50:50 b) 60:40 c) 70:30



รูปที่ 4.17 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำที่ความดันต่างกันของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM ใช้เวลาการเชื่อมโยง 55 นาที

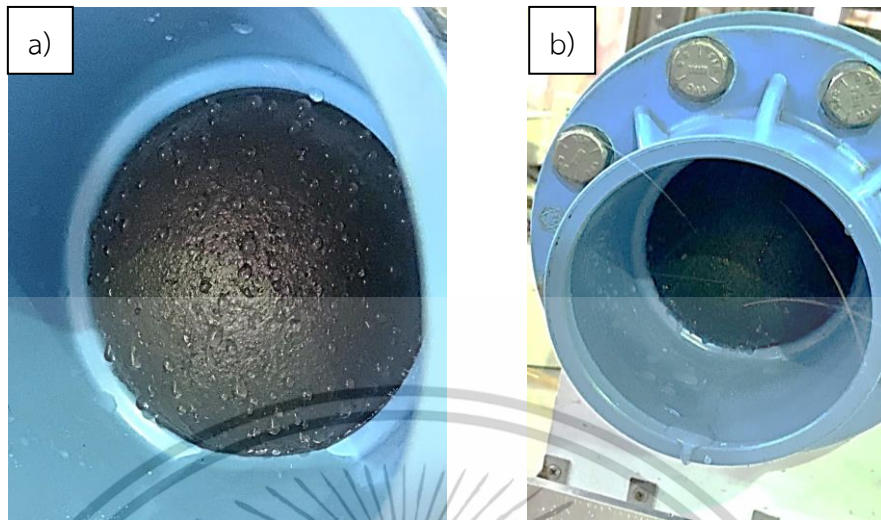
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ วัดจากปริมาณน้ำที่ไหลออกมาตามรูพรุนของชั้นงาน ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ระบบการให้ความร้อนเพื่อเชื่อมโยงเป็นแบบระบบเปิด (Open system) ซึ่งในระบบประกอบด้วยผงยาง เนื้อยาง และสารให้ฟอง แสดงแบบจำลองดังรูปที่ 4.18 โดยน้ำจะสามารถไหลซึมผ่านออกมาได้ เนื่องจากมีรูพรุน 2 ชนิดในตัวอย่างชั้นงาน ได้แก่ รูพรุนจากการสลายตัวของสารให้ฟอง และรูพรุนจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงยาง โดยเมื่ออัตราส่วนของ EPDM:G-EPDM ลดลง จะเห็นว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.17 เนื่องจากยางเป็นวัสดุภาคที่ต่อเนื่อง ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์หรือเป็นตัวเชื่อมประสาน (Binder) เมื่อยางมีปริมาณน้อยลง ทำให้เกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือช่องว่างระหว่างผงยางลดลง ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคผงยางที่มากขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำจึงมากขึ้น โดยจากการศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึมที่ความดัน 0.1-0.15 bar พบว่าอัตราส่วนระหว่าง EPDM:G-EPDM เท่ากับ 50:50 ให้ค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำที่สูงสุดที่ $2,025 \text{ L/m}^2/\text{h}$ โดยน้ำที่ซึมผ่านมีลักษณะเป็นหยดน้ำแสดงดังรูปที่ 4.19 เนื่องจากรูพรุนที่เกิดจากสารให้ฟองมีขนาดเล็ก เพราะปริมาณผงยางที่มากขึ้น ความหนืดจึงสูงขึ้น ทำให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีโอกาสที่จะเกิดเป็นรูพรุนที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นได้น้อยกว่าอัตราส่วนที่ให้ผงยางปริมาณน้อย ดังนั้นทิศทางการน้ำจึงมีลักษณะแบบซิกแซกออกมาเป็นหยดน้ำ โดยน้ำไม่ได้วิ่งเป็นเส้นตรงจนเกิดเป็นลักษณะน้ำพุ่งเหมือนกับอัตราส่วน EPDM:G-EPDM เท่ากับ 70:30 แสดงแบบจำลองทิศทางการซึมของน้ำดังรูปที่ 4.20

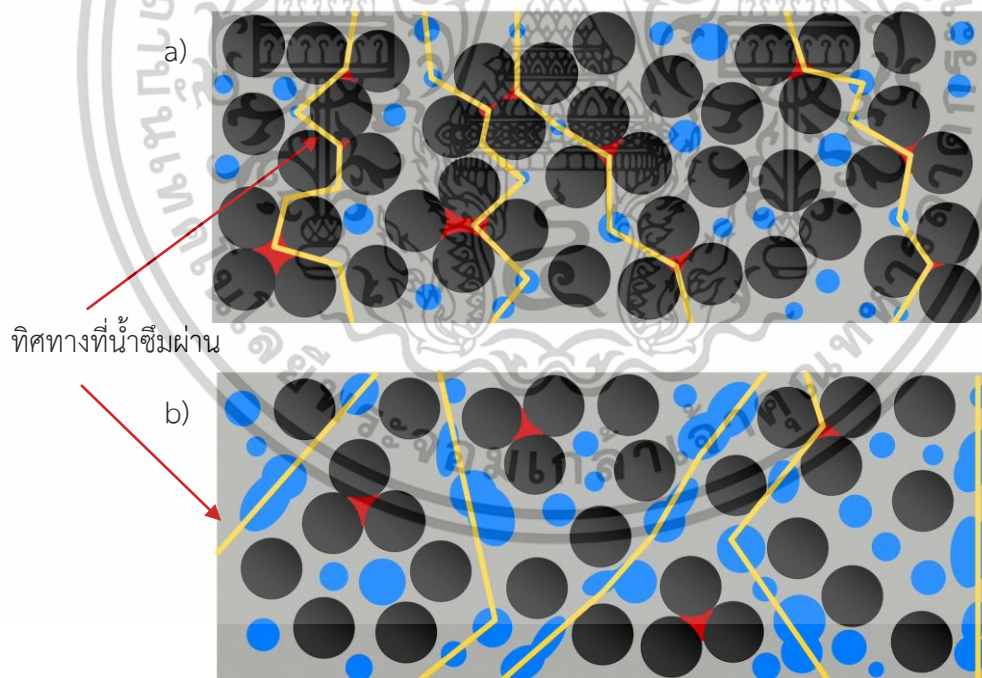


รูปที่ 4.18 แบบจำลองของแผ่นยางน้ำซึม a) ปริมาณผงยางมาก b) ปริมาณผงยางน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ลักษณะของน้ำที่ซึมผ่านแผ่นยางน้ำซึมที่อัตราส่วนยาง EPDM:G-EPDM a) 50:50
b) 70:30

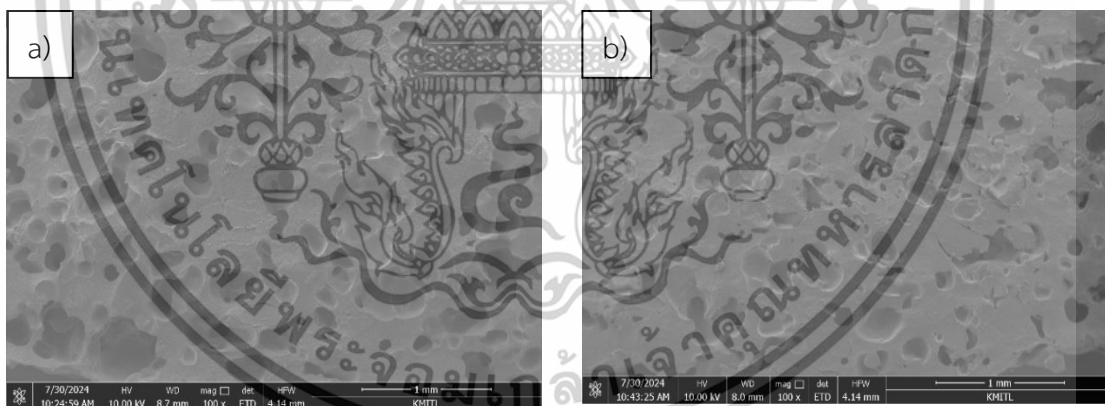


รูปที่ 4.20 แบบจำลองลักษณะของน้ำที่ซึมผ่านแผ่นยางน้ำซึมที่อัตราส่วนยาง EPDM:G-EPDM
a) 50:50 b) 70:30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

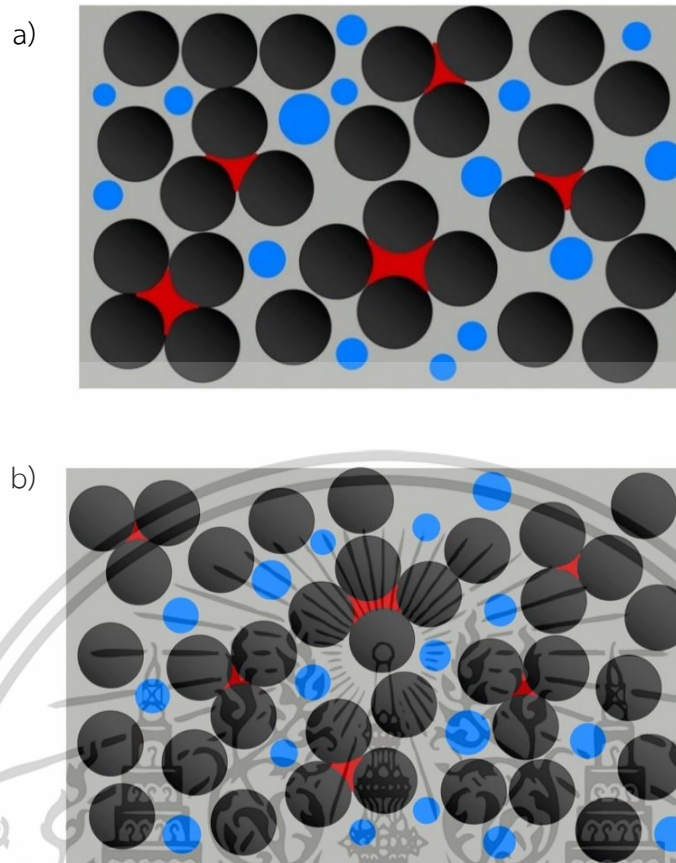
4.3 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดผงยาง G-EPDM และผงยาง GTR

จากการศึกษาอย่างผสมสูตรอัตราส่วนเนื้อยาง EPDM:ผงยาง ที่ 50:50 โดยศึกษาระหว่างผงยาง G-EPDM และ ผง GTR พบว่าเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ค่าความแข็ง และค่ามอดุลัส ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสูตรที่ใช้ผง GTR มีค่ามากกว่าเพียงเล็กน้อย แสดงตารางที่ 4.2 เนื่องจากทั้งสองตัวอย่างมีสูตรการผสมที่เหมือนกัน ต่างกันเพียงชนิดผงยาง โดยเมื่ออัตราส่วนของผงยางที่เท่ากันทำให้ความหนืดมูนนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นเมื่อสารให้ฟองได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวของฟองแก๊สทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานมีขนาดใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นในสัณฐานวิทยาภาพที่ 4.21 โดยรูพรุนนั้นเป็นเสมือนจุดบกพร่อง (Defect) ในชิ้นงาน อีกทั้งอัตราส่วนผงยางที่ใช้เท่ากันนั้นจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผงยาง (Open channels) ซึ่งก็เสมือนเป็นจุดบกพร่องในชิ้นงานเช่นกัน โดยตัวอย่างที่ใช้ผง GTR จะมีช่องว่างขนาดเล็กกว่าเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปแผนภาพที่ 4.22 เนื่องจากผงยาง GTR มีขนาดเล็กกว่าผง G-EPDM ยืนยันผลจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงยาง จึงส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเล็กน้อย [99] ซึ่งจุดบกพร่องทั้งหมดที่เกิดขึ้นในทั้งสองตัวอย่างค่อนข้างมีลักษณะคล้ายคลึงกัน จึงส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน อีกทั้งค่าความหนาแน่นและค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนักก็มีค่าที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน



รูปที่ 4.21 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 100 เท่าของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แผนภาพแสดงขนาดรูปร่างของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR

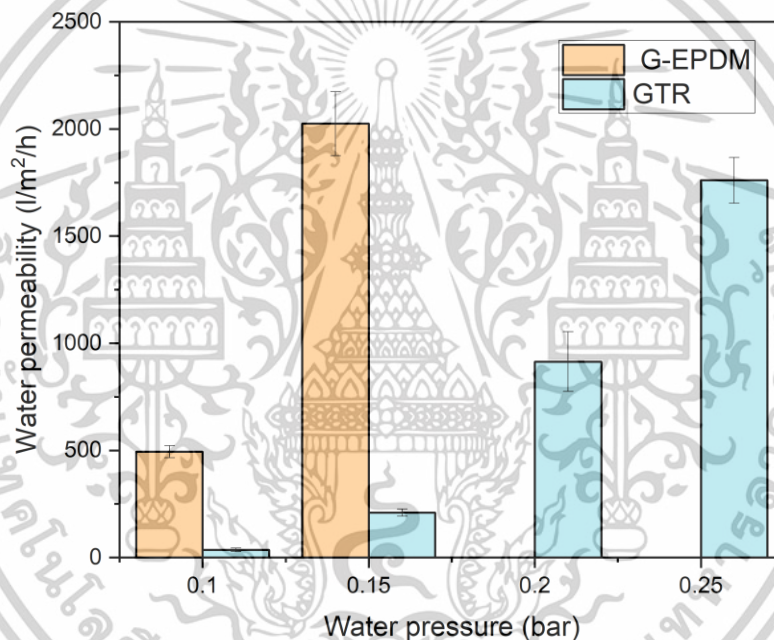
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติที่แตกต่างกันระหว่างสูตรที่อัตราส่วน 50:50 ของ EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR

สมบัติ	สูตรที่อัตราส่วน 50:50	
	EPDM:G-EPDM	EPDM:GTR
ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4(100°C))	59.02	59.61
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.8608±0.0020	0.8755±0.0131
เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความหนา (%)	15.9037	15.68895
ความแข็งแรงดึง (MPa)	1.12±0.06	1.30±0.01
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	11.55±0.92	11.63±0.38
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	319.16±7.90	339.58±2.67
ความแข็ง (Shore OO)	84.4±1.4	84.8±1.1
มอดูลัสที่ 20 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M20)	0.28±0.01	0.29±0.01
มอดูลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (M100)	0.57±0.02	0.61±0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าตัวอย่างที่ใช้ผง GTR เมื่อทดสอบการซึมผ่านน้ำ สามารถทนต่อความดันในช่วง 0.1-0.25 bar ซึ่งสามารถทนได้มากกว่าสูตรที่ใช้ผง G-EPDM เนื่องจากผง GTR มีขนาดที่เล็กกว่าทำให้ช่องว่างระหว่างผงยางมีขนาดเล็ก เมื่อน้ำซึมผ่านจึงมีลักษณะที่เป็นหยดน้ำที่เล็กกว่ามีโอกาสที่น้ำจะพุ่งได้ยากกว่า จึงทำให้มีความสามารถในการทนทานต่อความดันที่มากกว่า เมื่อเทียบปริมาณน้ำที่ซึมออกมาที่ความดัน 0.1 และ 0.15 bar จะพบว่าที่ความดันเท่ากันสูตรที่ใช้ผง G-EPDM มีปริมาณน้ำมากกว่าสูตรที่ใช้ผง GTR อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสูตรผง G-EPDM มีช่องว่างระหว่างผงยางที่ใหญ่กว่าน้ำสามารถซึมออกมาได้มากกว่าจึงทำให้รูพรุนเกิดการฉีกขาดได้ง่ายกว่า น้ำจึงมีโอกาสพุ่งได้มากกว่า



รูปที่ 4.23 ค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที

4.3.1 ศึกษาและเปรียบเทียบผลของชนิดผงยาง G-EPDM และ ผงยาง GTR โดยศึกษาการทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลก่อนและหลังทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ระหว่างสูตรที่อัตราส่วน 50:50 ของ EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR จากตารางที่ 4.3 พบว่าความแข็งแรงดึง ความแข็ง โมดูลัสที่ 20 เปอร์เซนต์การดึงยึด (M20) และโมดูลัสที่ 100 เปอร์เซนต์การดึงยึด (M100) มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังทดสอบเล็กน้อย อาจเกิดจากก่อนนำยางทั้งสองมาทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอาจมียางบางส่วนที่มีการเชื่อมโยงที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เมื่อนำยางมาให้ความร้อนอีกครั้งขณะทดสอบการเสื่อมสภาพ สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงในตำแหน่งดังกล่าวเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของโมดูลัส M20 และ M100 แสดงให้เห็นว่าความต้านทานการยึดของวัสดุในระยะแรกของการดึงเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมโยงที่ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ต้านทานต่อการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงฉีกขาด และเปอร์เซนต์การยึด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเล็กน้อยหลังทดสอบการเสื่อมสภาพ เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น จะทำให้วัสดุมีความแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่น ส่งผลให้วัสดุสามารถฉีกขาดได้ง่ายขึ้นและการยึดตัว ณ จุดขาดลดลง ซึ่งจะเห็นว่าทุกสมบัติมีค่าที่เป็นไปตามทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4.9 คือเมื่อมีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงที่มากขึ้นส่งผลค่าความแข็งแรงฉีกขาด และเปอร์เซนต์การยึด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่ค่าจะเข้าใกล้ค่าสูงสุดของค่าความแข็งแรงดึง ความแข็ง และโมดูลัส แสดงดังช่วงแถบสีเหลืองดังรูปที่ 4.9

หากเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลโดยรวมแล้วส่วนใหญ่มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยทั้งก่อนและหลังทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากเมทริกซ์ของยางทั้งสองสูตรเป็นยาง EPDM ซึ่งมีคุณสมบัติทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดีมาก เนื่องจากปัจจัยหลักต่อไปนี้เป็นโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่มีพันธะคู่ในสายหลัก ซึ่งโครงสร้างหลักของ EPDM เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนและพรอพิลีน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากอากาศ โอโซน และแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) สาเหตุเพราะในสายโซ่หลักของ EPDM ไม่มีพันธะคู่ของคาร์บอน-คาร์บอน (C=C) ที่มักเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ทำให้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพที่เกิดจากแสงและความร้อนได้ดี EPDM มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและต่ำ โดยสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ตั้งแต่ประมาณ -50°C ถึง $+150^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำให้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศได้ดีโดยไม่เกิดความเสียหายหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่รุนแรง อีกทั้งสมบัติเชิงกลยังมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [100, 101]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันระหว่างสูตรที่อัตราส่วน 50:50 ของ EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR ก่อนและหลังทดสอบสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

สมบัติเชิงกล	EPDM:G-EPDM			EPDM:GTR		
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ	% การเปลี่ยนแปลง	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ	% การเปลี่ยนแปลง
ความแข็งแรงดึง (MPa)	1.12 ±0.06	1.22 ±0.01	8.30	1.30 ±0.01	1.33 ±0.04	2.83
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	11.55 ±0.92	11.29 ±0.41	2.22	11.63 ±0.38	11.31 ±0.30	2.72
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	319.2 ±7.9	308.2 ±20.3	3.43	339.6 ±2.7	329.1 ±14.5	3.08
ความแข็ง (Shore OO)	84.4 ±1.4	84.5 ±1.0	0.59	84.8 ±1.1	85.1 ±1.1	0.35
M20	0.28 ±0.01	0.31 ±0.01	9.53	0.29 ±0.01	0.31 ±0.01	5.75
M100	0.57 ±0.02	0.69 ±0.01	19.77	0.61 ±0.01	0.68 ±0.01	10.87

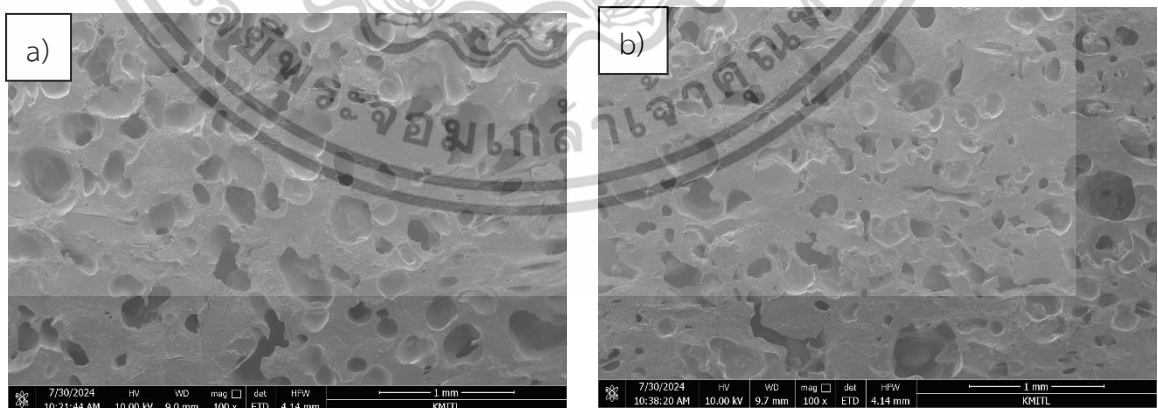
4.4 ศึกษาการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม

จากการศึกษาการขึ้นรูปเป็นท่อยางน้ำซึมสูตรที่ใช้ยาง EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR ที่อัตราส่วน 50:50 โดยขึ้นรูปผ่านกระบวนการอัดรีด (Extrusion) พบว่าท่อยางมีการเสียรูปไม่สามารถคงรูปทรงตามที่ต้องการได้ เกิดการยุบตัวของท่อทั้งสองสูตรหลังจากการเชื่อมโยง แสดงดังรูปที่ 4.24 ด้านขวา เนื่องจาก EPDM มีความเหนียวขณะขึ้นรูปต่ำ โดย EPDM ประกอบด้วยเอทิลีน (Ethylene) และ พรอพิลีน (Propylene) ที่เป็นพอลิเมอร์ออสันฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสุ่ม (Random) ในสัดส่วนที่ต่างกัน โมเลกุลเหล่านี้เป็นสายโซ่ที่มีลักษณะยืดหยุ่น โดยสายโซ่จะสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายในสภาวะที่อุณหภูมิสูง โซ่พอลิเมอร์เหล่านี้จะเลื่อนไหลออกจากกันอย่างอิสระ และแม้ว่า EPDM จะมีส่วนประกอบของไดอีน (Diene) ที่ใช้ในการเชื่อมโยงเมื่อทำการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) แต่ในสภาวะก่อนเชื่อมโยง โครงสร้างของ EPDM ไม่มีองค์ประกอบที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงหรือการยึดเกาะระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์ที่ง่าย มีความเหนียว อ่อนนุ่ม เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นรูปต่ำ ซึ่งเมื่อนำไปผ่านกระบวนการอัดรีด ทำให้วัสดุไม่สามารถรักษารูปร่างที่ต้องการได้ในระหว่างการขึ้นรูปหรือหลังจากที่ถูกรีดออกมาแล้ว [102] และเกิดจากปริมาณความหนาแน่นของพันธะที่เชื่อมโยงหลังกระบวนการวัลคาไนซേഷันอาจไม่เพียงพอเพื่อรักษารูปร่างของท่อให้คงรูป และเกิดการเชื่อมโยงที่ช้า ทำให้ไม่สามารถคงรูปได้ทัน หากใช้เวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสมจะทำให้ท่อมีความคงรูปตามรูปร่างที่ต้องการแสดงดังรูปที่ 4.24 ด้านซ้าย อีกทั้งในการผลิตเชิงพาณิชย์ที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนสภาวะได้มาก เช่น ความเร็วสายพาน ความยาวของสายพานการผลิต จึงเป็นข้อจำกัดในการเชื่อมโยง และเนื่องจากท่อขี้มน้ำซึมทั้ง 2 สูตร เกิดการยุบตัวหลังทำการเชื่อมโยง จึงทำให้ผนังท่อบริเวณด้านบนและด้านล่างติดกันในบางตำแหน่ง ทำให้มีรูภายในท่อที่เป็นบริเวณที่น้ำไหลผ่านไม่สามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง และเมื่อนำท่อขี้มน้ำซึมทั้งสองสูตรไปศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกัน รูปทรงที่เกิดจากสารให้ฟองมีขนาดใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 แสดงท่อขี้มน้ำซึม ด้านซ้ายคือ ท่อขี้มน้ำซึมยางรีเคลมผสมผงยาง GTR และด้านขวาคือท่อขี้มน้ำซึม EPDM:G-EPDM ที่อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที



รูปที่ 4.25 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 100 เท่าของท่อขี้มน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ใช้ a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที

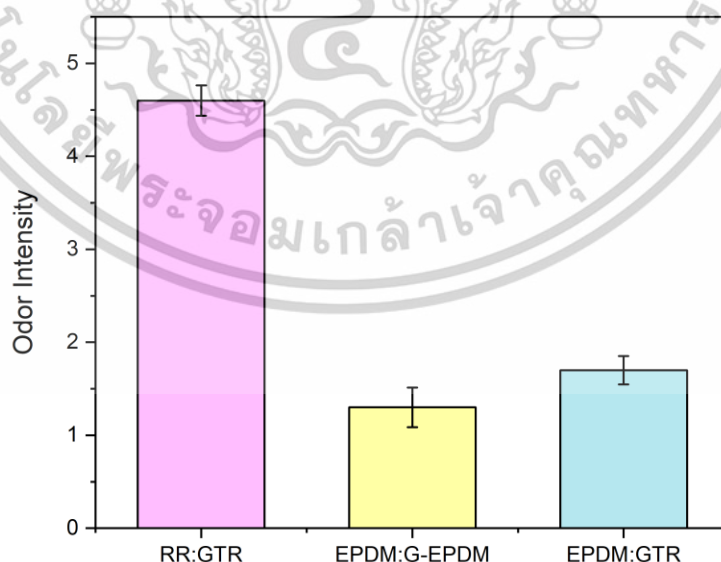
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ศึกษากลิ่นของท่อขายน้ำซึม

จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างท่อขายน้ำซึมชนิดเก่าที่ทำจากยางรีไซเคิลและใช้ผงยางรถยนต์ (RR:GTR) กับท่อขายน้ำซึมชนิดใหม่ที่ทำจากยาง EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR ว่าส่งกลิ่นแตกต่างกันอย่างไร โดยให้บุคคลที่อยู่ในบริเวณที่ขึ้นรูปจำนวน 20 คน ลงบันทึกความแรงของกลิ่นที่ได้รับโดยใช้แบบสอบถามซึ่งไม่ได้มีการระบุชื่อของตัวอย่างแต่ละชนิด ตัวอย่างแบบสอบถามแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยจากข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามทั้ง 20 คนพบว่าทุกคนมีร่างกายที่ปกติ ไม่มีอาการเป็นหวัดคัดจมูก สามารถรับกลิ่นได้ปกติ และพบว่าผู้ทำแบบสอบถามจำนวน 6 คนมีประสบการณ์เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ยางตั้งแต่ 2 ปี 10 ปี และ 30 ปี

จากแบบสอบถามได้ระบุเกณฑ์ความแรงของกลิ่นดังนี้

- 0 ไม่มีกลิ่น ไม่รู้สึกได้กลิ่น
- 1 กลิ่นอ่อนมาก คนที่มีความรู้สึกไวต่อกลิ่นเป็นพิเศษจะรู้สึกได้
- 2 กลิ่นอ่อน กลิ่นที่เกิดขึ้นจะอ่อนหรือจาง จะรู้สึกได้ต้องตั้งใจดม
- 3 กลิ่นที่รับได้ความเข้มข้นของกลิ่นอยู่ในระดับปานกลาง ทำให้รู้สึกว่าได้กลิ่นที่ไม่ชอบ
- 4 กลิ่นแรง ความเข้มข้นกลิ่นทำให้รู้สึกได้และเกิดความเดือดร้อนรำคาญเรื่องกลิ่น
- 5 กลิ่นแรงมาก กลิ่นที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมาก จนไม่สามารถอยู่ในบริเวณนั้นได้



รูปที่ 4.26 แสดงผลสรุปคะแนนจากแบบสอบถามเรื่องกลิ่นของท่อขายน้ำซึมทั้ง 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการรวบรวมแบบสอบถามทั้งหมดพบว่าตัวอย่างน้ำซีเมนต์ EPDM:G-EPDM และ EPDM:GTR มีเกณฑ์คะแนนความแรงของกลิ่นอยู่ที่ประมาณ 1.3 และ 1.7 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.26 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ความเข้มของกลิ่นค่อนข้างอ่อน โดยสูตรที่ใช้ผง GTR มีกลิ่นมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากผง GTR สามารถปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่มีกลิ่นออกมาได้มากกว่า แต่ทั้งสองสูตรใช้เมทริกซ์ตัวเดียวกันนั่นคือ EPDM ซึ่งเป็นยางที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ทนทานต่อการสลายตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีความร้อนสูง แสง UV และโอโซน โครงสร้างของยาง EPDM ทำจากมอนอเมอร์เอทิลีน โพรพิลีน และไดอีน ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีหลายชนิด ทำให้ EPDM ไม่ปล่อยกลิ่นที่รุนแรงระหว่างการใช้งานหรือเมื่อเจอความร้อนสูง [100] อีกทั้งในสูตรผสมยังเลือกใช้สารเชื่อมโยง สารตัวเติม สารให้ฟองและน้ำมันที่มีกลิ่นน้อย จึงทำให้ตัวอย่างสูตร EPDM:G-EPDM มีกลิ่นน้อย

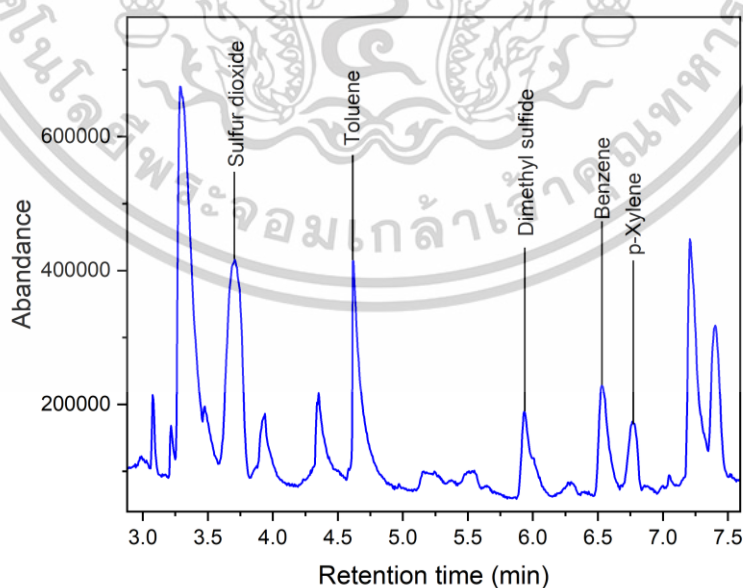
จากแบบสอบถามพบว่าตัวอย่างน้ำซีเมนต์เก่าที่ทำจากยางรีไซเคิลและผงยางรถยนต์ (RR:GTR) มีเกณฑ์คะแนนความแรงของกลิ่นอยู่ที่ประมาณ 4.6 แสดงดังรูปที่ 4.26 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความเข้มของกลิ่นที่รุนแรง เนื่องจากยางรีไซเคิลและผง GTR ซึ่งมาจากยางรถยนต์เก่าที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว โดยยางรถยนต์ทำจากยางธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของโปรตีนและสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่สามารถสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนหรือแสง UV ส่งผลให้เกิดการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์มากขึ้น อีกทั้งมักจะมีสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิตยาง เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antioxidants) สารกันโอโซน (Antiozonants) หรือแม้กระทั่งน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการผลิต เมื่อยางถูกให้ความร้อนในการขึ้นรูปใหม่ สารเหล่านี้จะระเหยออกมาซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) บางชนิดมีกลิ่นที่ค่อนข้างรุนแรง เช่น เบนซีน (Benzene) หรือโทลูอีน (Toluene) และเมื่อนำมาทำเป็นยางรีไซเคิล กลิ่นของสารเหล่านี้ยังคงหลงเหลืออยู่ [103] ดังนั้นตัวอย่างน้ำซีเมนต์ RR:GTR จึงมีกลิ่นที่รุนแรงมาก

กลิ่นของตัวอย่างน้ำซีเมนต์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถยืนยันผลได้จากผลทดสอบแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (Headspace GC-MS) ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพซึ่งใช้ในการระบุชนิดและหาปริมาณ VOCs แสดงผลดังรูปที่ 4.27 จากการทดสอบ Headspace GC-MS ของตัวอย่างน้ำซีเมนต์จากยางรีไซเคิลและผงยางรถยนต์ (RR:GTR) พบ VOCs หลายชนิดที่ส่งกลิ่นรุนแรง โดยเฉพาะ

1. **เบนซีน (Benzene):** เป็นสารระเหยที่มีจุดเดือดต่ำ มีลักษณะกลิ่นฉุนและถือเป็นสารอันตราย เนื่องจากมีความสามารถในการก่อมะเร็ง สารเบนซีนนี้มักพบในน้ำมันที่เติมในยาง และเกิดจากการเสื่อมสภาพของน้ำมันดังกล่าว

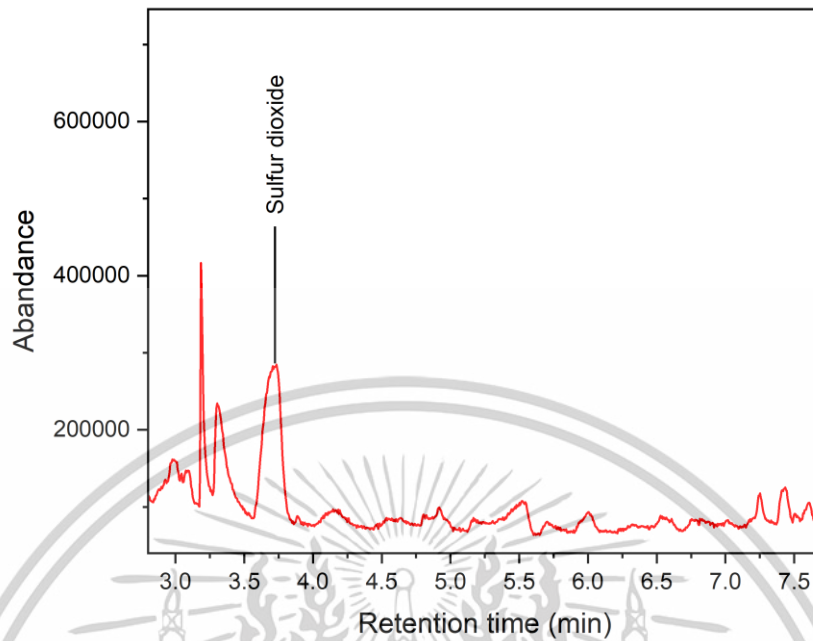
2. **โทลูอีน (Toluene):** สารโทลูอีนมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลาย มีจุดเดือดต่ำ ระเหยได้ง่าย และมีกลิ่นเฉพาะตัว โทลูอีนพบมากในยางรีไซเคิลจากกระบวนการผลิตยางและการเสื่อมสภาพที่ทำให้เกิด VOCs เพิ่มขึ้น
3. **ไซลีน (Xylene):** ไซลีนเป็นสารอะโรมาติกอีกชนิดที่พบในผลิตภัณฑ์ยาง มีกลิ่นฉุนและระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน การระเหยของไซลีนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์ในท่อยาง
4. **ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และไดเมทิลซัลไฟด์ (Dimethyl Sulfide):** เป็นสารประกอบที่เกิดจากการสลายตัวของสารกำมะถันในยาง โดยเฉพาะในกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ซึ่งใช้กำมะถันเพื่อเชื่อมโยงโมเลกุลของยางให้แข็งแรงและยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อยางเสื่อมสภาพ สารกำมะถันสามารถสลายตัวและปล่อยสารทั้งสองชนิดออกมาได้ โดยส่งกลิ่นฉุนที่รุนแรงและอาจเป็นอันตรายเมื่อสูดดมในปริมาณมาก

เนื่องจากผงยาง G-EPDM ที่ใช้ในสูตรท่อยางน้ำซึม EPDM:G-EPDM ผ่านการถูกเชื่อมโยงมาก่อนแล้ว เมื่อนำมาท่อยางมาทดสอบ Headspace GC-MS จึงพบสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของสารกำมะถัน แต่พบในปริมาณที่น้อย เมื่อเทียบกับท่อยางที่ทำจากยางรีเคลม แสดงดังรูปที่ 4.28 โดยจากแบบสอบถามที่ระบุว่าท่อยางนี้มีกลิ่นอ่อน ๆ ซึ่งยืนยันได้ว่า EPDM มีความเสถียรทางเคมีและไม่ปล่อยสารประกอบที่มีกลิ่นรุนแรงในปริมาณที่มาก ดังนั้นการใช้ EPDM ทำให้ท่อยางใหม่สามารถลด VOCs ที่อาจระเหยออกมาและมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นน้อยและปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน [104-106]



รูปที่ 4.27 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของท่อยางน้ำซึมสูตรยางรีเคลมและผงยางรถยนต์ (RR:GTR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของตัวอย่างน้ำซึ่มสูตร EPDM:G-EPDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาตัวอย่างน้ำซึมชนิดกั้นน้อยเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในเมือง ซึ่งผลิตจากยาง EPDM ผสมผงยาง ได้แก่ผงยาง G-EPDM และผงยาง GTR พบว่าสามารถขึ้นรูปตัวอย่างที่มีกั้นน้อยได้จริง และในอนาคตมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการขึ้นรูปแบบจำลอง (Model study) ของแผ่นยางน้ำซึมก่อนหน้าที่จะทำการขึ้นรูปเป็นตัวอย่างน้ำซึม เพื่อศึกษาเวลาเชื่อมโยงที่เหมาะสมในการขึ้นรูป ศึกษาอัตราส่วนระหว่างยาง EPDM และผงยาง ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติระหว่างผงยาง G-EPDM และผงยาง GTR ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการซึมผ่านน้ำ โดยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การศึกษาแบบจำลอง (Model study) ของแผ่นยางน้ำซึมที่ขึ้นรูปจากยาง EPDM และผงยาง G-EPDM ที่อัตราส่วน 50:50 60:40 และ 70:30 พบว่าระยะเวลาในการเชื่อมโยงที่เหมาะสมประมาณ 55 นาที เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของยางเกิดการสร้างโครงข่ายสามมิติที่สมบูรณ์ ทำให้มีค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในทุกอัตราส่วนที่ศึกษา

2. การศึกษาเปรียบเทียบอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างยาง EPDM ต่อผงยาง G-EPDM ที่อัตราส่วน 50:50 60:40 และ 70:30 พบว่าปริมาณผงยางที่สูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ของสารให้ฟองที่ใช้น้อยลงเมื่อเทียบกับปริมาณเนื้อยาง ทำให้ให้ความหนาแน่นสูงขึ้น และการสลายตัวของสารให้ฟองลดลงเกิดฟองอากาศเซลล์ปิดขนาดเล็ก และเมื่อปริมาณผงยางที่สูงขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งแรงชอร์ OO และมอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างผงยางมากเกิดเป็นตำหนิในโครงสร้าง ทั้งนี้อัตราการซึมผ่านน้ำสูงขึ้นตามปริมาณผงยาง

3. การศึกษาทางสูตรผสมที่มีอัตราส่วน 50:50 ของ EPDM:ผงยาง โดยเปรียบเทียบระหว่างผงยาง G-EPDM และ GTR พบว่าสมบัติเชิงกลของตัวอย่างทั้งสองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยสูตรที่ใช้ผงยาง GTR มีค่าสูงกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้เมื่อทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำ พบว่าตัวอย่างที่ใช้ผงยาง GTR สามารถทนต่อความดันน้ำได้ดีกว่า เนื่องจากผง GTR มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าทำให้ช่องว่างระหว่างผงยางมีขนาดเล็กกว่า ส่งผลให้น้ำซึมผ่านออกมาเป็นหยดที่เล็กกว่า รูพรุนฉีกขาดได้ยากกว่า มีโอกาสน้ำพุ่งได้น้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การศึกษาสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการทดสอบความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ของยางสูตรผสมที่มีอัตราส่วน 50:50 โดยเปรียบเทียบระหว่างผวยาง G-EPDM และ GTR จากผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มของสมบัติเชิงกลทั้งก่อนและหลังการทดสอบใกล้เคียงกันทั้งสองสูตร เนื่องจากโครงสร้างหลักของเนื่อยาง EPDM มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากสภาพแวดล้อมได้ดี ทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากอากาศ โอโซน และแสง UV

5. การศึกษาการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมสูตรที่มีอัตราส่วน 50:50 โดยเปรียบเทียบระหว่างผวยาง G-EPDM และ GTR พบว่าทั้งสองสูตรเกิดการยุบตัวหลังการเชื่อมโยง เกิดจากปริมาณความหนาแน่นของพันธะที่เชื่อมโยงหลังกระบวนการวัลคาไนซ์ไม่เพียงพอเพื่อรักษารูปร่างของท่อ และเวลาเชื่อมโยงที่ไม่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถคงรูปได้ ทำให้ผนังท่อบางส่วนติดกัน น้ำจึงไหลผ่านได้ไม่ต่อเนื่อง

6. การศึกษากลิ่นของท่อยางพบว่าท่อยางน้ำซึมสูตรเก่าที่ทำจากยางรีเคลมและผวยางรถยนต์ มีกลิ่นรุนแรง เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ที่หลงเหลือจากการใช้งานและการผลิตยางรถยนต์ ทำให้เมื่อนำมาขึ้นรูปใหม่สามารถส่งกลิ่นที่รุนแรง ซึ่งสามารถยืนยันผลของกลิ่นจากการทดสอบ Headspace GC-MS พบว่ามี VOCs ส่งกลิ่นที่รุนแรงและเป็นอันตรายหลายชนิด ในขณะที่ท่อยางสูตร EPDM ที่ใช้ผวยาง G-EPDM และ GTR มีกลิ่นอ่อนกว่า โดยผลทดสอบจาก Headspace GC-MS พบสาร VOCs ที่ส่งกลิ่นเพียงชนิดเดียวคือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากมีเมทริกซ์เป็นยาง EPDM ที่มีโครงสร้างที่ทนทานต่อการสลายตัวและไม่ปล่อยกลิ่นที่รุนแรงระหว่างการใช้งานหรือเมื่อเจอความร้อนหรือแสง UV ดังนั้นการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมจากยาง EPDM จึงสามารถตอบโจทย์การใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นน้อยและปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

7. จากการศึกษาสมบัติของแผ่นยางและท่อยางน้ำซึมที่ขึ้นรูปจาก EPDM:ผวยาง โดยเปรียบเทียบระหว่างผวยาง G-EPDM และ GTR พบว่ามีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกัน มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ และมีกลิ่นที่น้อยเหมือนกัน ดังนั้นในการผลิตจริงการเลือกใช้ผวยาง GTR จะตอบโจทย์การผลิตท่อยางน้ำซึมเชิงพาณิชย์มากกว่า เนื่องจากผวยาง GTR มีราคาถูก และหาได้ง่าย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึมชนิดกลิ่นน้อยสามารถสรุปข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่น่าสนใจที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยต่อไปได้ดังนี้

- 1) จากการศึกษาตอนที่ 4.4 พบว่าท่อยางเกิดการยุบตัว ไม่สามารถคงรูปได้ตามต้องการ จึงต้องมีการปรับสภาวะในการเชื่อมโยงให้เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม นอกจากนี้เพื่อป้องกันการยุบตัวของท่อยาง ควรใช้แท่งเหล็กเสียบไปที่บริเวณกลางรูของท่อก่อนนำไปเชื่อมโยง
- 2) พัฒนาท่อยางน้ำซึมชนิดกลิ่นน้อยที่ทำจากยางชนิดอื่น เช่น ยางพืยู ยางรีเคลมชนิดกลิ่นน้อย

ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณรงค์กร มโนจันทร์เพ็ญ. 2562. รายงานยูเอ็นคาด ประชากรโลกเพิ่มสูงถึง 9.7 พันล้านคน ภายในปี 2050 อินเดียเตรียมแข่งจีนครองแชมป์มีประชากรมากที่สุดในโลก. [Online]. Available : <https://thestandard.co/the-world-population-prospects-2019/>.
- [2] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์. 2563. 'เกษตรอัจฉริยะ'...จุดเปลี่ยนอนาคตอาหารโลก. [Online]. Available : https://www.opsmoac.go.th/angthong-local_wisdom-preview-422791791856.
- [3] กรมอุตุนิยมวิทยาแห่งราชอาณาจักรไทย. 2559. สภาวะโลกร้อน. [Online]. Available : <http://climate.tmd.go.th/content/file/11>.
- [4] Borowski, P.F. 2020. “Nexus between water, energy, food and climate change as challenges facing the modern global, European and Polish economy.” *AIMS Geosc.* 6 : 397-421.
- [5] BrandInside admin. 2559. Smart Farming ความหวังและโอกาสของประเทศไทย. [Online]. Available : <https://brandinside.asia/smart-farming-thailand-opportunity/>.
- [6] อินโนเวชั่นเทคโนโลยี. 2565. SDG คืออะไร?. [Online]. Available : <https://inno.co.th/sdg-%E%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD/>.
- [7] Frost & Sullivan. 2561. เกษตรอัจฉริยะนำไปสู่การผลิตพืชผลอย่างยั่งยืนเพื่ออนาคตของประเทศไทย. [Online]. Available : <https://intelligence.Businesseventsthailand.com/files/keyindustries/32015589337981.pdf>
- [8] ธนาคารไทยพาณิชย์ จำกัด (มหาชน). 2565. Smart City คืออะไร? ต้องมีองค์ประกอบอะไรบ้าง. [Online]. Available : <https://www.scb.co.th/th/personal-banking/stories/life-style/smart-city.html>.
- [9] The Reporters. 2565. ‘เมืองอัจฉริยะ’ คืออะไร ? – จะเป็น Smart City ต้องมีอะไรบ้าง ?. [Online]. Available : <https://www.thereporters.co/feature/smartcity160720222304/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] TEORRA. 2015. **What are the Sustainable Development Goals?**. [Online]. Available : <https://www.teorra.com /blog/ what-are-the-sustainable-development-goals>.
- [11] กสิพันธ์รัตน์. 2559. **สายยางน้ำซึมเรนฟอเรสต์ ความยาว 7.5 เมตร**. [Online]. Available : <https://kasipantarut.com/index.php/rainforest-soaker-hose-7-5meter.html>.
- [12] ภัทรพร ยาร์บะระ. 2561. **เศรษฐกิจหมุนเวียน – โอกาสใหม่ของธุรกิจเพื่อความยั่งยืน**. [Online]. Available : http://www.salforest.com/blog/circular_economy.
- [13] TGO. 2566. **โครงการเศรษฐกิจหมุนเวียน**. [Online]. Available : <http://carbonmarket.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y2VfaXM=>.
- [14] All Around Plastics. 2561. **CIRCULAR ECONOMY กรุงเทพมหานครกับระบบเศรษฐกิจเพื่อความยั่งยืน** [Online]. Available : <https://www.allaroundplastics.com/article/sustainability/2113>.
- [15] Pro Carton. 2023. **Circular v Linear Economy Graphic**. [Online]. Available : <https://www.procarton.com/publication/circular-v-linear-economy/>.
- [16] Qingdao Toplit Industry Co., L. 2566. **ยางรีเคลมยาง/ยางรีไซเคิลวัลดูติบ**. [Online]. Available : <https://thai.alibaba.com/product-detail/Tire-Reclaimed-Rubber-Recycled-Rubber-Raw-1600602041656.html>.
- [17] บริษัท ยูเนี่ยนพัฒนาจิก จำกัด. 2566. **ผงยาง**. [Online]. Available : <https://www.ucd-rubber.com/th/ผงยาง>.
- [18] มนติชา จันทร์ปัญญา. 2565. “การศึกษาท่อน้ำซึมเสริมแรงด้วยเส้นใยเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำในระบบเกษตรอัจฉริยะ” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] ปัฐวี พินิจกุล. 2561. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ผสมยางธรรมชาติ/ยางรีเคลมเพื่องานเกษตรกรรม.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] สุมณา แจ่มเหมือน. 2547. “การผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [21] วศิน จิรไพศาลกุล, วัฒนนา ทรัพย์สภาพ และอ้ออำไพ ใจบุญ. 2547. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากยางรีเคลมและผงยางรถยนต์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] เบญจวรรณ ชนะจรัญวิทย์, พรวิ สุมิตร และอมรวดี ยูวโกศล. 2542. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและผวยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [23] สัจจะชัย สัจจะระณะสกุล. 2554. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผวยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [24] ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลปะชำนาญ. 2543. “การศึกษาปรับปรุงสมบัติของท่อน้ำซึมจากผวยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [25] คณิตพร สวัสดิ์ชุมพล, จงจิตร ลาภนิกรชัย และฉัตรมณี ชันทอง. 2544. “การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผวยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [26] ท้าคุณุฎี พงษ์พิมาย และภัทรพร อินทเกท. 2544. “การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและผวยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] AluSplash. 2022. **Spring Home Décor Trends in 2022**. [Online]. Available : <https://alusplash.com/spring-home-decor-trends-in-2022/>.
- [28] Wescover. 2020. **Bavel: Challenging Restaurant Aesthetics**. [Online]. Available : <https://www.wescover.com/blog/2020/07/17/bavel-challenging-restaurant-aesthetics/>
- [29] Merck chemical company. 2023. **5-Ethylidene-2-norbornene**. [Online]. Available : <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/product/aldrich/151467>.
- [30] Merck chemical company. 2023. **Dicyclopentadiene**. [Online]. Available : <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/search/dicyclopentadiene?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=dicyclopentadiene&type=product>.
- [31] Merck chemical company. 2023. **cis-1,4-Hexadiene**. [Online]. Available : [https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/search/1 % 2 C4 - hexadiene?focus=products&page=1 &perpage=3 0 &sort=relevance&term=1 % 2 C4 - hexadiene&type=product](https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/search/1%20C4-hexadiene?focus=products&page=1&perpage=30&sort=relevance&term=1%20C4-hexadiene&type=product).
- [32] Phlitphanth maxflex. 2565. **มาทำความรู้จักยาง EPDM ที่นิยมทำเป็นฉนวนกันความร้อน**. [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/phlitphanthmaxflex/ma-thakhwam-rucak-yang-epdm-kan-hnxy>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [33] ชินรัตน์ ลาภพลธนะอนันต์. 2553. “ยางอีพีดีเอ็ม(EPDM)ใหม่ที่สังเคราะห์ด้วย5-vinyl-2-norbornene.” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. 4.
- [34] Wissen, E. 2561. ยาง EPDM (Ethylene-Propylene Diene). [Online]. Available : <https://ptiwissen.wordpress.com/2018/04/20/%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87-epdm-ethylene-propylene-diene/>
- [35] บริษัท โพลีเทค อินดัสทรี จำกัด (PTI). 2565. ยาง EPDM (EPDM RUBBER). [Online]. Available : <https://www.polytechindustry.co.th/%E0%B8%A2%E0%B8%B2%E0%B8%87epdm>.
- [36] อธิพิล แจ้งชัด. 2565. “เอกสารประกอบการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [37] ธนีสราวิชต์ สาลีสังข์. 2558. “การศึกษาระบบการเชื่อมโยงพันธะของยางอีพีดีเอ็มโดยใช้สารเปอร์ออกไซด์และโคเอเจนต์เพื่อประยุกต์ใช้งานผลิตผลิตภัณฑ์ยางเชิงกล.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์ดุสิต บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โพลีเมอร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [38] Vishal Rubber Technologies. 2023. Fire Retardant FR EPDM & Silicone Rubber Products. [Online]. Available : <https://www.vishalrubber.com/products/fire-retardant-fr-epdm-silicone-rubber-products/53>.
- [39] สถาบันพลาสติก. 2556. ยางผง. [Online]. Available : chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://rubber.oie.go.th/box/Article/19951/1_rubber powder.pdf.
- [40] นายภูริทัตน์ ชัยภูมิ, นายไชยวัฒน์ แต่งงาม, นายธนธรณ์ พรชัย, และนายศตวรรษ ทิพสูงเนิน. 2564. วิศวกรรมยาง. ปทุมธานี : ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [41] Malldd.com. 2561. สารตัวเร่งปฏิกิริยา, Accelerator, สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปยาง, Accelerat. [Online]. Available : <https://www.malldd.com/posts/9238/-accelerat>.
- [42] TCI Chemicals. 2023. Product of Peroxide. [Online]. Available : <https://www.tci-chemicals.com/JP/en/search/?text=peroxide>.
- [43] พลวัฒน์ เจริญธรรมชชัย. 2566. เทคโนโลยียางและผลิตภัณฑ์โพลียูรีเทน. ชลบุรี : มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [44] Hoffmann Mineral. 2023. SILLITINZ 86 (PURISS) Field of application : Elastomers. [Online]. Available : <https://www.hoffmann-mineral.com/en/docu>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ments/industry-related-documents/elastomers/technical-data-sheets/sillitin-sillikolloid-puriss/sillitin-z-86-z-86-puriss.pdf

- [45] Wikipedia. 2566. **อะโซไดคาร์โบนาไมด์**. [Online]. Available : <https://hmong.in.th/wiki/Azodicarbonamide>.
- [46] สำนักอนามัยสิ่งแวดล้อมกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2555. **คู่มือวิชาการ เรื่อง สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (Volatile Organic Compounds: VOCs)**. [Online]. Available : chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://env.anamai.moph.go.th/web-upload/migrated/files/env/n513_2a_b2878f2a72fb61feedcf51190be398_a017.pdf.
- [47] กองความปลอดภัยแรงงาน. 2566. **สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)**. [Online]. Available : www.si.mahidol.ac.th/th/research-academics/research/division_3/biosafety/doc/knowledge/4%20คู่มือความปลอดภัยในการปฏิบัติงานกับสารเคมี/10%20สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย%20Volatile%20Organic%20Compounds.pdf.
- [48] Huang, H. Wang, Z. Dai, C. Guo, J. and Zhang X. 2022. “Volatile organic compounds emission in the rubber products manufacturing processes”. *Environmental Research*. 212 : 113485.
- [49] Li, S. 2014. “Recent Developments in Human Odor Detection Technologies”. *Journal of Forensic Science & Criminology*. 1(1).
- [50] ทัพไท หน่อสุวรรณ, กุหลาบ อุตสุข, ฐากร ปัญญาใส, ฐานิต ศาสตีกุลนุกการ, รัตนาภรณ์ ใจมา, พงศกร ศุภกิจไพศาล, เอกชัย ไยพิมล, วิภาวี สุรินทร์เซ็ง, ณัฏชวัล เจริญเลิศชนกิจ และ เทวินทร์ แก้วเมืองมูล. 2564. “การเกษตรในเมืองกับ BCG Economic Model Urban Agriculture and BCG Economic Model.” *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*. 38 : 100-116.
- [51] ฝ่ายเกษตร ประจำสถานกงสุลใหญ่ ณ นครลอสแอนเจลิส. 2566. **การเกษตรในเมืองกับสหรัฐอเมริกา**. [Online]. Available : <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.moac.go.th/foreignagri-news-files-431491791262>.
- [52] Jomm, Y. 2564. **รปภ.-ธุรกิจ-นักรถตลาด ผู้เปลี่ยนดาดฟ้าอพาร์ทเมนต์ให้เป็นสวนผักออร์แกนิกกลางกรุง**. [Online]. Available : <https://www.baanlaesuan.com/184373/garden-farm/farming-101/baanrimrooftopfarm>.
- [53] Aroonwa. 2564. **วิธีที่แตกต่างกันของการทำเกษตรในเมือง**. [Online]. Available : <https://thaicityfarm.com/2021/03/01/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [54] Enrich. 2566. **พื้นที่จำกัด เราก้จัดแนวตั้ง (Vertical Garden)**. [Online]. Available : <https://www.en.co.th/vertical-garden/>.
- [55] Housedeco. 2020. **7 Beautiful Ways To Enhance Your Apartment Balcony**. [Online]. Available : <https://housetodecor.com/2020/7-beautiful-ways-to-enhance-your-apartment-balcony/>.
- [56] ชีรพล วุฒิกรวงศา. 2562. **สวนเพดานต้นไม้เทียม**. [Online]. Available : <https://www.turfart.co.th/artificial-ceiling/>.
- [57] Shira, U. 2017. **7 LUSH LIVING WALLS FROM AROUND THE WORLD**. [Online]. Available : <https://ecophiles.com/2017/02/23/7-lush-living-walls-around-world/>.
- [58] Archi Expo. 2023. **Panel suspended ceiling MOSS&PLANTS MID FINISH**. [Online]. Available : <https://www.archiexpo.com/prod/greenarea/product-158447-2254775.html>.
- [59] สมชาย ดอนเจดีย์. 2555. “เทคโนโลยีการให้น้ำด้วยสายยางน้ำซึม.” *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*. 18 : 34-42.
- [60] Cost wise limited. 2013. **Garden watering irrigation soaker hose/drip line/leaky /porous pipe, 50 m length**. [Online]. Available : <https://www.ebay.co.uk/itm/173755114925>.
- [61] Kashyap, V. 2021. **Outdoor Vertical Gardening Service**. [Online]. Available : <https://www.indiamart.com/proddetail/outdoor-vertical-gardening-service-23854203373.html>.
- [62] Gardener's Supply Company. 2023. **Snip-n-Drip Soaker Hose System**. [Online]. Available : <https://www.gardeners.com/buy/snip-n-drip-soaker-hose-watering-system/40-205.html>.
- [63] Party State. 2016. **Ceiling Decor Ideas From Chicago Top Pros**. [Online]. Available : <https://www.partyslate.com/best-of/dramatic-ceiling-decor-chicago/>.
- [64] CanadianPond.ca. 2023. **Bubble Tubing®, Fine Bubble Linear Diffuser**. [Online]. Available : <https://shop.canadianpond.ca/products/bubble-tubing-linear-diffuser>.
- [65] Wasson, T., et al. 2017. “Integration of RFID and Sensor in Agriculture Using IoT.” 1-6 in **International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon)**. IEEE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [66] Jadon, J.K.S., and Singh, R. 2021, 2022. "Challenges and opportunities of Internet of Things in smart agriculture: a review." 653-662 in **Electronic Systems and Intelligent Computing: Proceedings of ESIC**.
- [67] Kirkaya, A. 2020. "Smart Farming-Precision Agriculture Technologies and Practices." *Journal of Scientific Perspectives*. 4(2) : 123–136.
- [68] Ahmed, N., De, D., and Hussain, I. 2018. "Internet of Things (IoT) for Smart Precision Agriculture and Farming in Rural Areas." *IEEE Internet of Things Journal*. 5(6) : 4890–4899.
- [69] Ali, A., Ahmad, M., Iqbal, M., Shah, T., and Khan, A. 2023. "Application of Smart Techniques, Internet of Things, and Data Mining for Resource Use Efficiency and Sustainable Crop Production." *Agriculture*. 13(2) : 397.
- [70] กสิพันธ์รัตน์. 2566. สายยางน้ำซึมเรนฟอเรสท์ ความยาว 50 เมตร. [Online]. Available : <https://shop.canadianpond.ca/products/bubble-tubing-linear-diffuser>.
- [71] Leaky Pipe System. 2023. LEAKY PIPE POROUS SOAKER HOSES. [Online]. Available : <https://www.leakypipe.co.uk/leaky-pipe-porous-soaker-hoses-c102x2907733>.
- [72] LBS. 2023. Porous Pipe. [Online]. Available : <https://www.lbsbuyersguide.co.uk/irrigation/pipes/porous-pipe>.
- [73] ไพจิตร ตรีกาญจนานันท์. 2548. "การปรับปรุงสมบัติของน้ำซึมจากผวยางรถยนต์และยางธรรมชาติผสมยางอีพดีเอ็ม." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [74] สุธมน แจ่มเหมือน. 2557. "การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางในงานเกษตร." *วารสารยางพารา*.
- [75] Salesung, T. Reichert, D. Saalwächter, K. and Sirisinha, C. 2015. "Correlation of crosslink densities using solid state NMR and conventional techniques in peroxide-crosslinked EPDM rubber." *Polymer*. 56 : 309-317.
- [76] Salesung, T. Saeoui, P. and Sirisinha, C. 2016. "Cure and scorch in the processing of ethylene-propylene-diene terpolymer (EPDM)." *Journal of Applied Polymer Science*. 134 : 44523.
- [77] Krishna, Ch. Guriya, A. Bhattachariya, K. and Tripathy, D. 1997. "Rheological properties of ethylene propylenediene rubber (EPDM) compound- effect of blowing agent, curing agent and carbon black filler." *Polymer*. 39 : 109-115.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [78] Zanchet, A. Dotta B. and Fabiula, D. 2017. “Relationship among Vulcanization, Mechanical Properties and Morphology of Blends Containing Recycled EPDM.” *Recycle*. 2017. 2(3) : 16
- [79] Jacob, C. De, P. P. Bhowmick, A. K. and De, S. K. 2001. “Recycling of EPDM waste. I. Effect of ground EPDM vulcanizate on properties of EPDM rubber.” *Journal of Applied Polymer Science*. 82(13) : 3293–3303.
- [80] Jacob, C. Bhattacharya, A. K. Bhowmick, A. K. De, P. P. and De, S. K. 2003. “Recycling of ethylene propylene diene monomer (EPDM) waste. III. Processability of EPDM rubber compound containing ground EPDM vulcanizates.” *Journal of Applied Polymer Science*. 87(14) : 2204–2215.
- [81] Ismail, H. Ishak, S. and Hamid, Z. A. A. 2014. “Effect of blend ratio on cure characteristics, tensile properties, thermal and swelling properties of mica-filled (ethylene-propylene-diene monomer)/(recycled ethylene-propylene-diene monomer) (EPDM/r-EPDM) blends.” *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 21(1) : 1–6.
- [82] Sutanto, P. Picchioni, F. Janssen, L. P. Dijkhuis, K. A. Dierkes, W. K. and Noordermeer, J. W. 2006. “State of the Art: Recycling of EPDM Rubber Vulcanizates.” *International Polymer Processing*. 21(2) : 211–217.
- [83] Wei, S. and Zhu, Y. 2018. “Research on the Materials and Production Process of Low Odor and Environmental Automotive Sealing Strips.” 687–697 in **Proceedings of China SAE Congress 2018**. Singapore : Springer
- [84] Wang, H. Ding, Y. and Zhao, S. 2016. “Effects of Co-Agents on the Properties of Peroxide-Cured Ethylene-Propylene Diene Rubber (EPDM).” *Journal of Macromolecular Science Part B*. 55(5) : 433–444.
- [85] El-Wakil, A. A. and El-Megeed, A. A. A. 2011. “Effect of calcium carbonate, sillitin N85 and carbon black fillers on the mechanical and electrical properties of the EPDM.” *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 6(5) : 24-29
- [86] Labs, P.T. **Sieve Analysis**. [Online]. Available : <https://particletechlabs.com/analytical-testing/sieve-analysis/>.
- [87] Bartosik, D. Szadkowski, B. Kusmierek, M. and Rybinski, P. 2022. “Advanced Ethylene-Propylene-Diene (EPDM) Rubber Composites Filled with Raw Silicon Carbide or Hybrid Systems with Different Conventional Fillers.” *Polymer*. 14 : 1383.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [88] Samsuri, B. and Abdullahi, A. A. 2017. Degradation of Natural Rubber and Synthetic Elastomers : Shreir's Corrosion.
- [89] Coran, A.Y. 1978. Vulcanization in Science and Technology of Rubber. San Diego : Acedemic press.
- [90] Gent, A. N. 1992. Engineering with rubber : how to design rubber components. New York : Hanser Publishers.
- [91] Femina, G. Ruizde, O. Ballesteros, Urciuoli, G. Duin, M.V. Gögelein, C. Tammara, D. Sotta, P. and Auriemma, F. 2023. "X-ray diffraction study of strain-induced crystallization of hydrogenated nitrile-butadiene rubbers: Effect of crosslink density." *Polymer*. 271 : 125782.
- [92] Giuseppe, F. Ballesteros, O. Urciuoli, G. Duin, M.V. Gögelein, C. Emendato, A. and Auriemm, F. 2024. "Molecular chain orientation and mechanical properties of hydrogenated nitrile-butadiene rubbers with different acrylonitrile content and crosslink density." *Polymer*. 295 : 126749.
- [93] Huang, J. Fu, P. Li, W. Xiao, L Jie Chenb and Nie, X. 2022. " Influence of crosslinking density on the mechanical and thermal properties of plant oil-based epoxy resin." *RSC Advances*. 12 : 23048.
- [94] Dai, C. Zhao, G. You, Q. Zhao, M. Liu, Y and Zhao, F. 2022. Theory and Technology of Multiscale Dispersed Particle Gel for In-Depth Profile Control : Qingdao.
- [95] Chanson, H.1996. Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows : Brisbane.
- [96] Mullins, L. and Tobin, N. R. 1965. "Stress Softening in Rubber Vulcanizates. Use of a Strain Amplification Factor to Describe the Elastic Behavior of Filler-Reinforced Vulcanized Rubber." *Applied polymer science*. 9 : 2993-3009.
- [97] Klüppel, M. Meier, J and Ramspeck, M. 2006. "Micro-Structure Based Modeling of Elastomer Materials." *III European Conference on Computational Mechanics*. : 512.
- [98] Yves Le Gac, P. Albouy. P.A., and Sotta. P. 2019. "Strain-induced crystallization in a carbon-black filled polychloroprene rubber: Kinetics and mechanical cycling." *Polymer*. 173 : 158-165.
- [99] Ghareeb, A. and Elbanna, A. 2021. "Modeling Fracture in Rate-Dependent Polymer Networks: A Quasicontinuum Approach." *Journal of Applied Mechanics*. 88 : 111007.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [100] Costa, N. L. Hiranobe, C. T. Cardim, H. P. Dognani, G. Sanchez, J. C. Carvalho, J. A. J. Torres, G. B. Paim, L. L. Pinto, L. F. Cardim, G. P. Cabrera, F. C. Santos, R. J. and Silva, M. J. 2024. "A Review of EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) Rubber-Based Nanocomposites: Properties and Progress." *Polymer*. 16(12) : 1720.
- [101] Hu, Q. Chen, Q. Song, P. Gong, X. Chen, J. Zhao, Y. 2023. "Performance of Thermal-Oxidative Aging on the Structure and Properties of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) Vulcanizates." *Polymer*. 15(10) : 2329.
- [102] Jahani, Y. and Barikani, M. 2004. "Effect of Side Chain Branched PP, EPDM and HDPE as a Third Component on Melt Extensional Behaviour of Ternary Blends." *Iranian Polymer Journal*. 14 : 693-704.
- [103] Formela, K. 2022. "Analysis of volatile organic compounds emission in the rubber recycling products quality assessment." *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 5(4) : 255-269
- [104] Gagol, M., Łukasik, K., Kaczmarek, K., and Król, M. 2015. "Investigation of Volatile Low Molecular Weight Compounds Formed During Continuous Reclaiming of Ground Tire Rubber." *Polymer Degradation and Stability*. 119 : 113-120.
- [105] Borinelli, J. B., Silva, L. F., Lima, M. M., and Souza, C. A. 2024. "Emission Reduction Agents: A Solution to Inhibit the Emission of Harmful Volatile Organic Compounds from Crumb Rubber Modified Bitumen." *Construction and Building Materials*. 411 : 134455.
- [106] Adhikari, B., De, D., and Maiti, S. 2000. "Reclamation and Recycling of Waste Rubber." *Progress in Polymer Science*. 25(7) : 909-948.

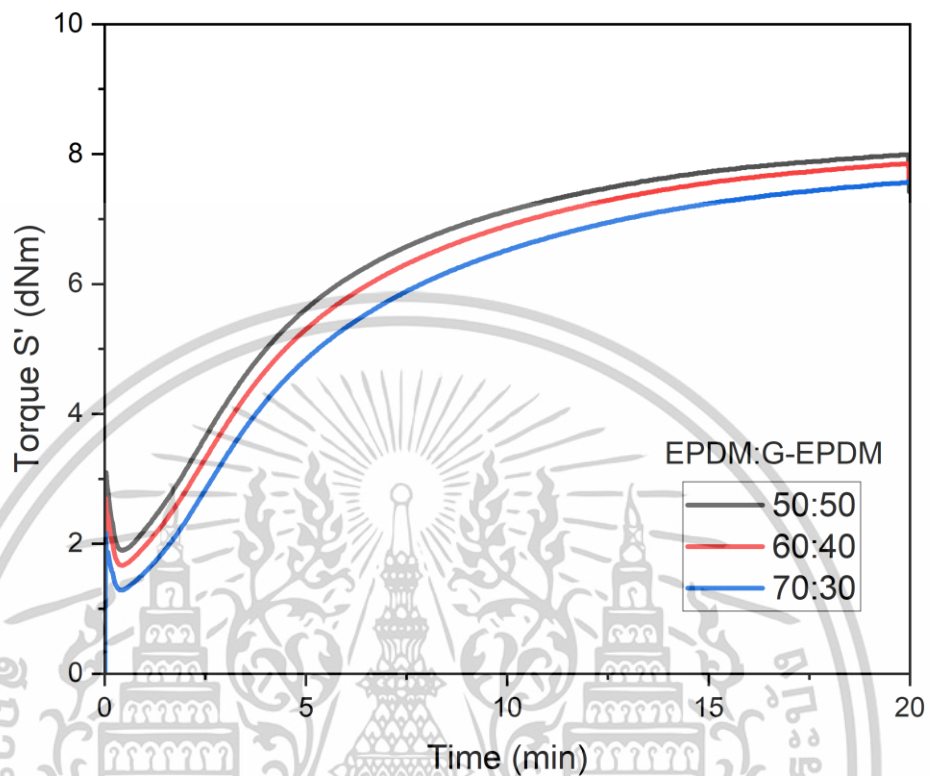
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

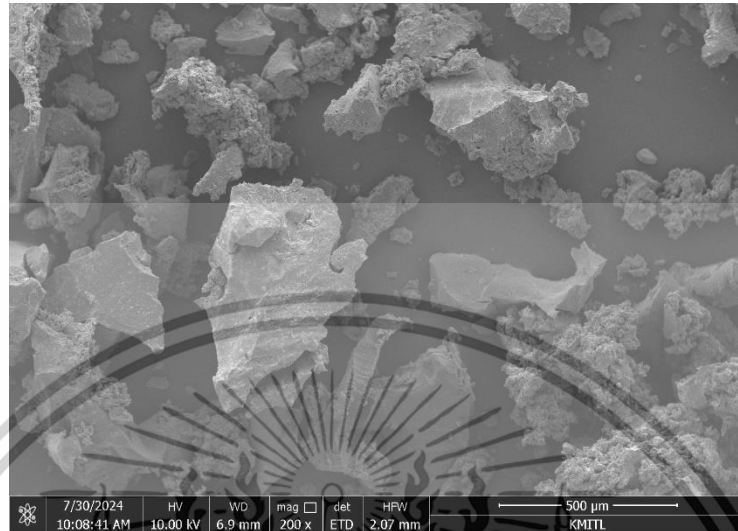


รูปที่ ก.1 Cure curve ของยางสูตรผสมระหว่างยาง EPDM:G-EPDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

a)

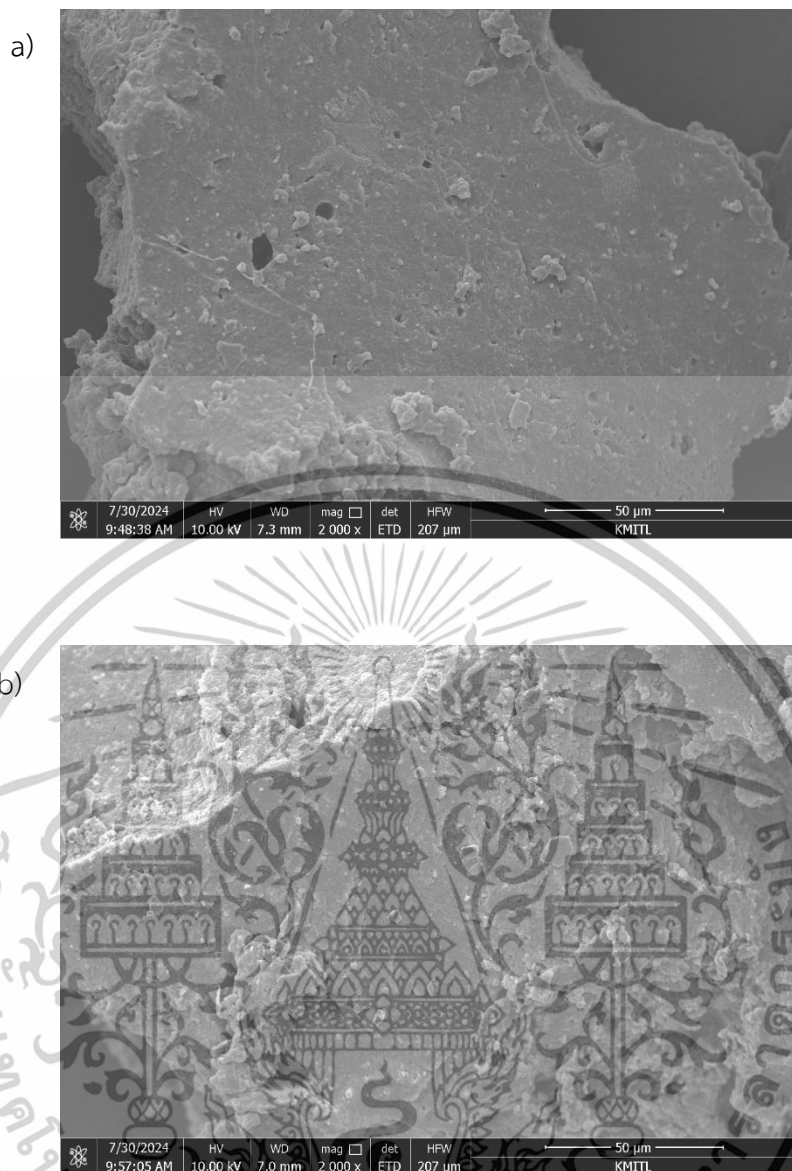


b)



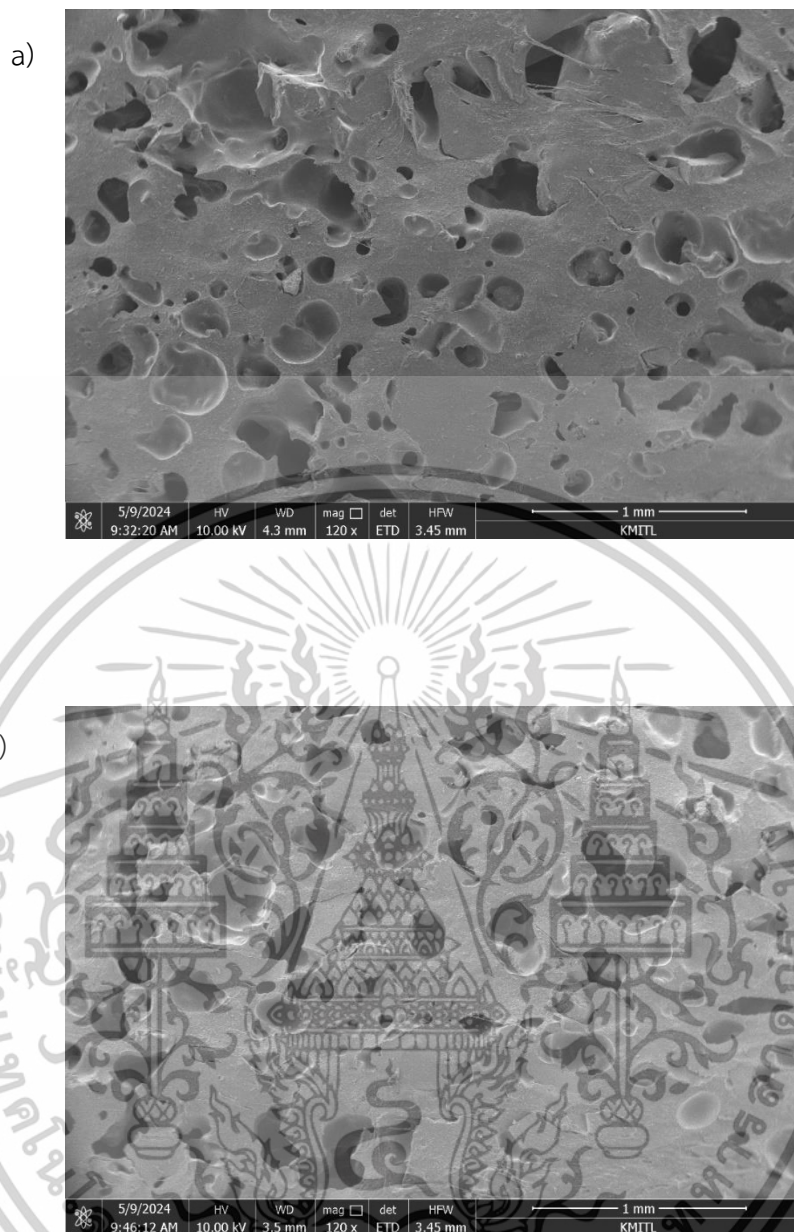
รูปที่ ข.1 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 200 เท่าของผงยาง a) G-EPDM และ b) GTR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 2,000 เท่าของผงยาง a) G-EPDM และ b) GTR

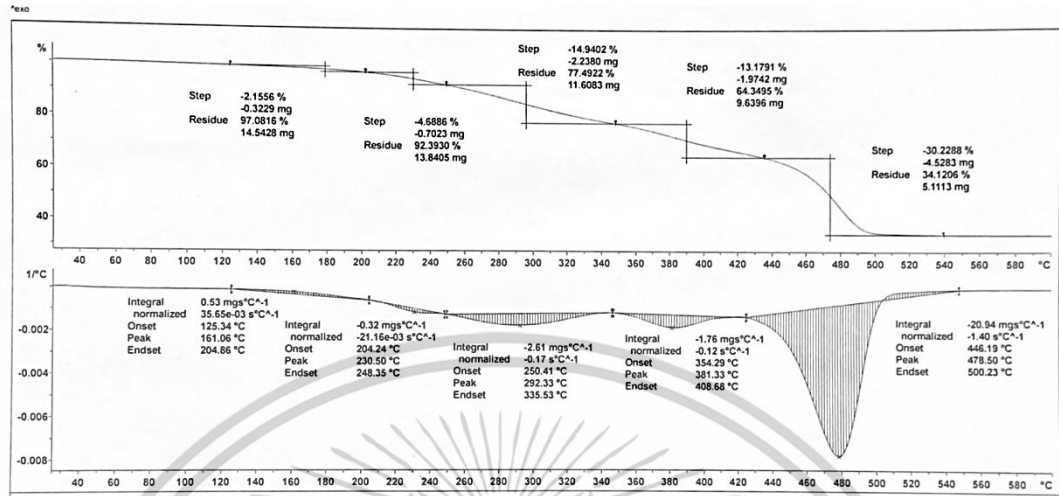
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



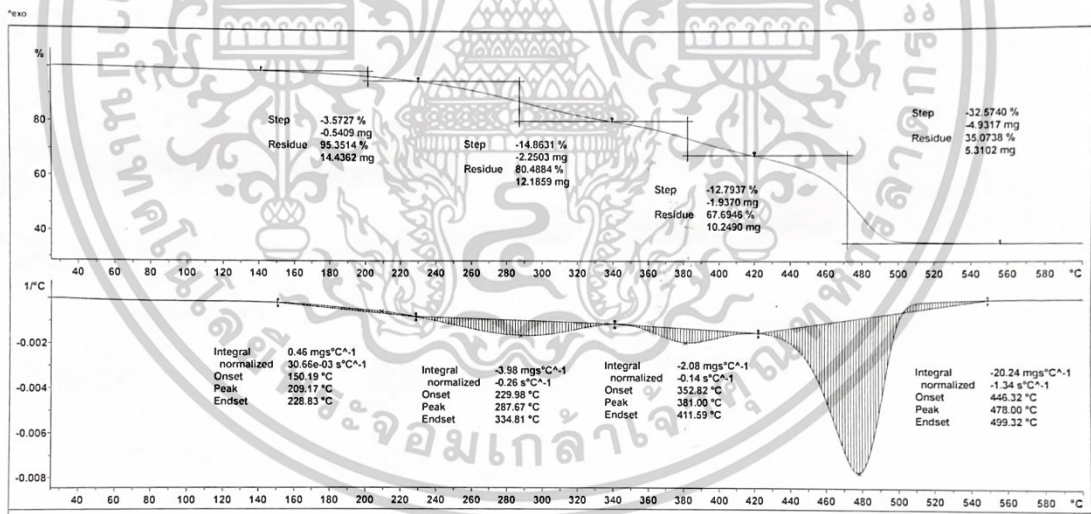
รูปที่ ข.3 แสดงสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 120 เท่าของแผ่นยางน้ำซึมของยางผสมสูตรที่ไม่ใส่สารให้ฟอง a) EPDM:G-EPDM และ b) EPDM:GTR อัตราส่วน 50:50 ที่เวลาในการเชื่อมโยง 55 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

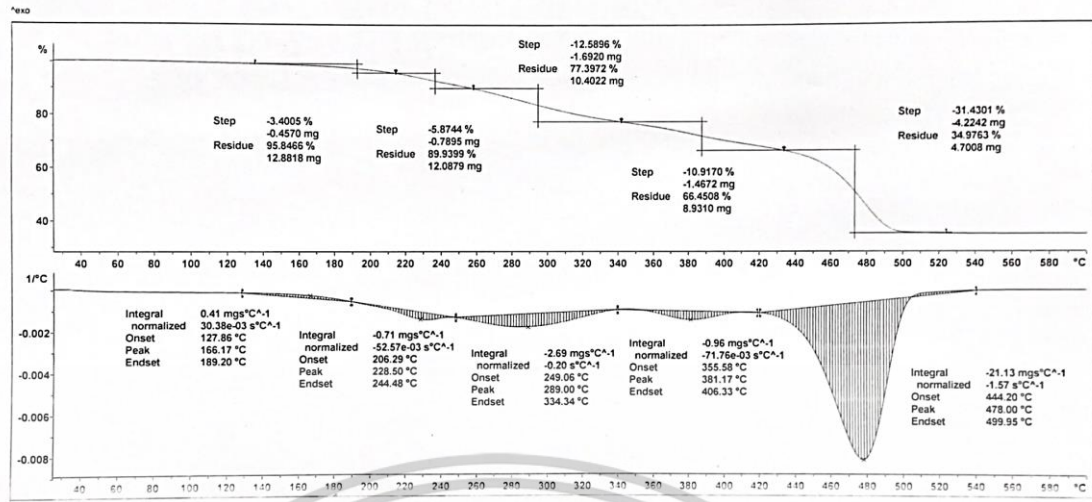


รูปที่ ค.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 50:50 โดยไม่มีการเติมสารให้ฟอง

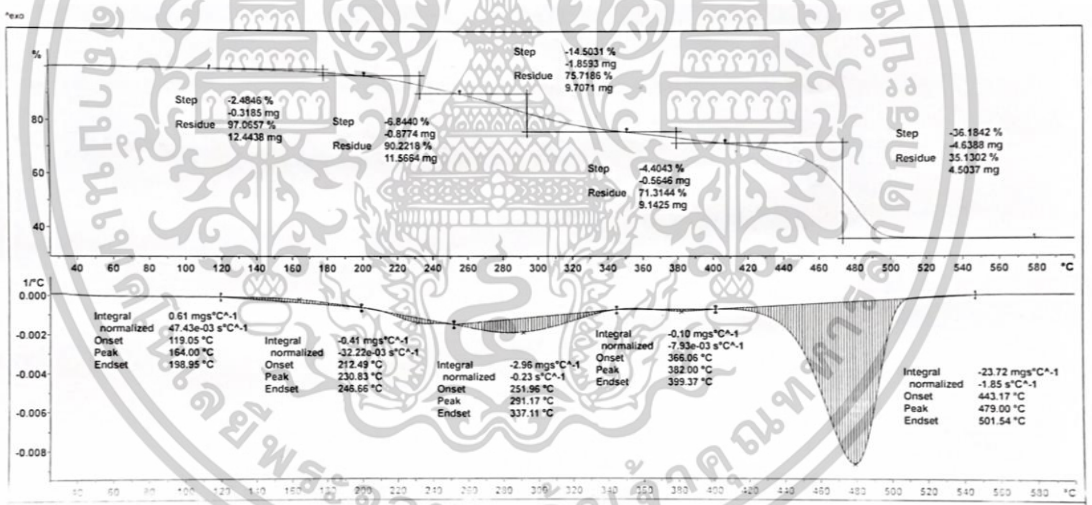


รูปที่ ค.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 50:50 เติมสารให้ฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 60:40 เต็มสารให้ฟอง



รูปที่ ค.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของยางผสมสูตรที่อัตราส่วน EPDM:G-EPDM ที่ 70:30 เต็มสารให้ฟอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง



วิทยานิพนธ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แบบสอบถามประเมินระดับความแรงของกลิ่นที่ได้รับ ณ บริเวณที่ขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม

แบบสอบถามนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการทำวิจัยเรื่อง การศึกษาท่อยางน้ำซึมชนิดกลิ่นน้อยเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในเมือง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาท่อยางน้ำซึมชนิดกลิ่นน้อยเพื่อใช้สำหรับการเกษตรในเมือง (Urban agriculture) ซึ่งผลิตจากยางเอทิลีนพรอพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM) และผงยางที่ได้จากขยะยาง ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจในครั้งนี้จะถูกเก็บเป็นความลับและไม่มีการแสดงที่มาของข้อมูล และผลการประมวลผลของข้อมูลจะถูกนำมาใช้เพื่อการศึกษา โดยแบบสอบถามจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

ส่วนที่ 2 สอบถามความคิดเห็นเพื่อประเมินระดับความแรงของกลิ่นที่ได้รับ ณ บริเวณที่ขึ้นรูปท่อยางน้ำซึม

คำชี้แจง โปรดทำเครื่องหมาย ใน หน้าข้อความตามความเป็นจริงหรือเติมข้อความในช่องว่างให้สมบูรณ์

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

- ปัจจุบันท่านอายุ 15-20 ปี 21-30 ปี 31-40 ปี 41-50 ปี 51ปีขึ้นไป
- เพศ 1. หญิง 2. ชาย
- อาชีพ 1. นักศึกษา 2. อาจารย์ 3. นักวิทยาศาสตร์ 4. อื่นๆ.....
- ประสบการณ์เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ยาง 1. มี ระยะเวลา.....ปี 2. ไม่มี
- ขณะทำแบบสอบถามท่านมีปัญหาลมหายใจหรือไม่ 1. เป็นหวัดคัดจมูก 2. ร่างกายปกติ 3. อื่นๆ.....

ส่วนที่ 2 สอบถามความคิดเห็นเพื่อประเมินระดับความแรงของกลิ่นที่ได้รับ ณ บริเวณที่ขึ้นรูปท่อยาง

รายละเอียดการประเมิน	การรับรู้กลิ่น		ระดับความแรงของกลิ่น					ลักษณะกลิ่น	
	ได้รับ	ไม่ได้รับ	0	1	2	3	4		5
ท่อยางน้ำซึมชนิดที่ 1									
ท่อยางน้ำซึมชนิดที่ 2									
ท่อยางน้ำซึมชนิดที่ 3									

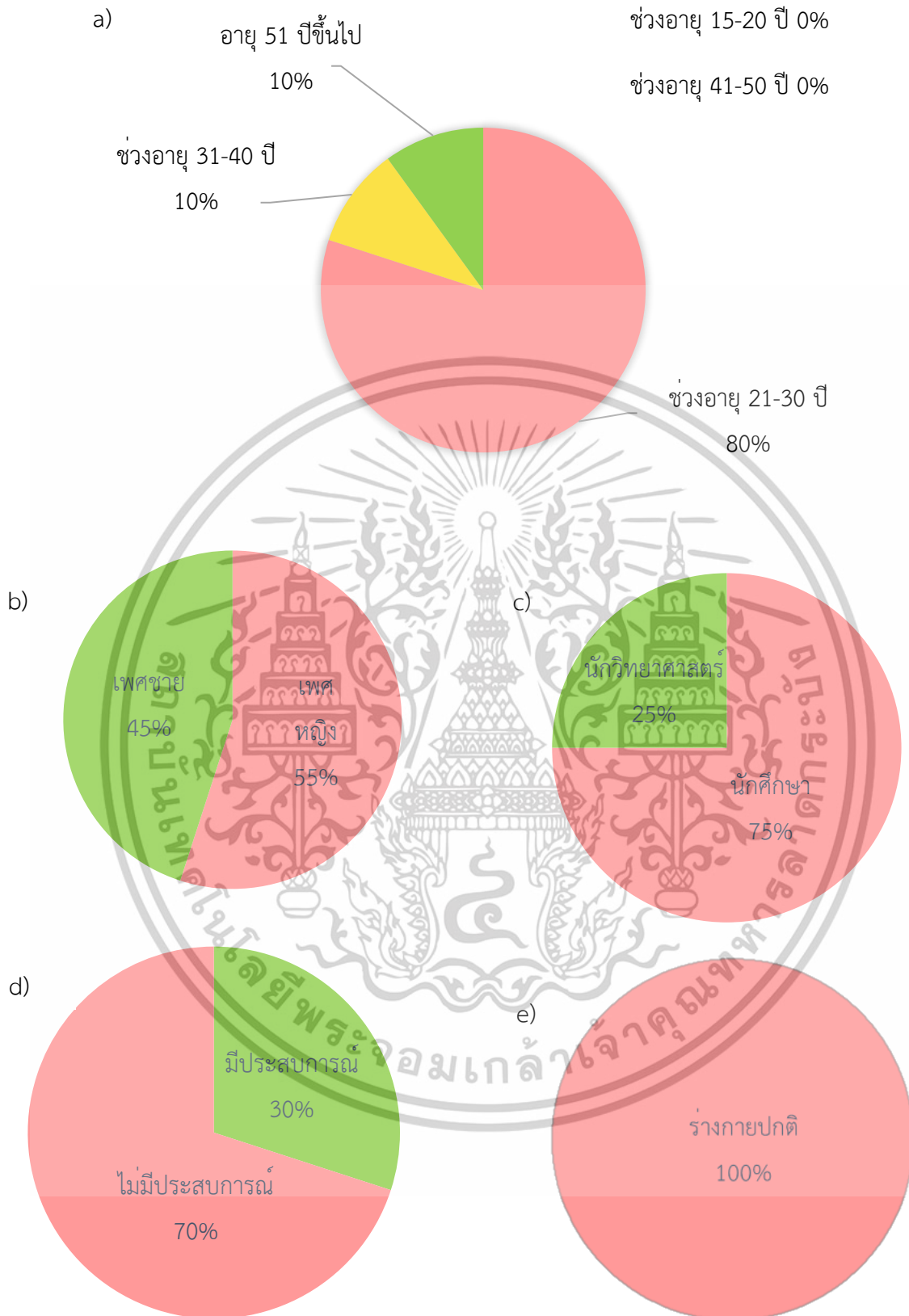
สเกลระดับกลิ่น	ความรู้สึกบริเวณเรื่องกลิ่น
0 ไม่มีกลิ่น	ไม่รู้สึกได้กลิ่น
1 กลิ่นอ่อนมาก	กลิ่นจางมาก คนที่มีความรู้สึกไวต่อกลิ่นเป็นพิเศษจะรู้สึกได้
2 กลิ่นอ่อน กลิ่นจาง	กลิ่นที่เกิดขึ้นจะอ่อนหรือจาง จะรู้สึกได้ต้องตั้งใจดม
3 มีกลิ่นที่รับได้	ความเข้มข้นของกลิ่นอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งทำให้รู้สึกว่าได้กลิ่นที่ไม่ชอบ
4 กลิ่นแรง	ความเข้มข้นทำให้รู้สึกได้และเกิดความเดือดร้อนรำคาญเรื่องกลิ่น
5 กลิ่นแรงมาก	กลิ่นที่เกิดขึ้นมีความรุนแรงมาก จนไม่สามารถอยู่ในบริเวณนั้นได้

รูปที่ ง.1 ตัวอย่างแบบสอบถามเรื่องกลิ่นของท่อยางทั้งสามชนิดได้แก่ ชนิดที่ 1 ท่อยางสูตร

RR:GTR ชนิดที่ 2 คือ ท่อยางสูตร EPDM:G-EPDM และชนิดที่ 3 คือท่อยางสูตร EPDM:GTR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



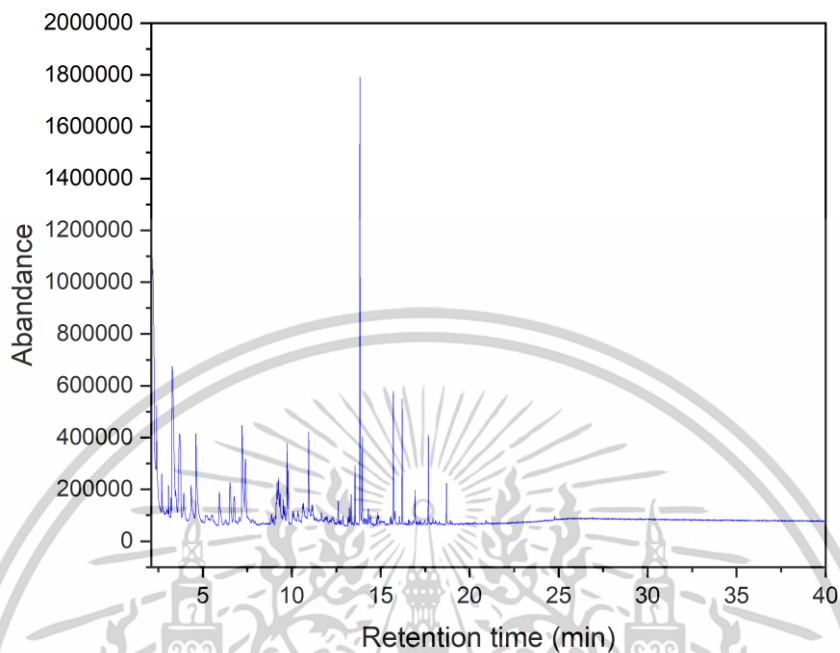
รูปที่ ๒.2 แผนภาพสรุปข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมด 20 คน a) ช่วงอายุ b) เพศ

c) อาชีพ d) ประสบการณ์เกี่ยวกับยาง e) ปัญหาสุขภาพ

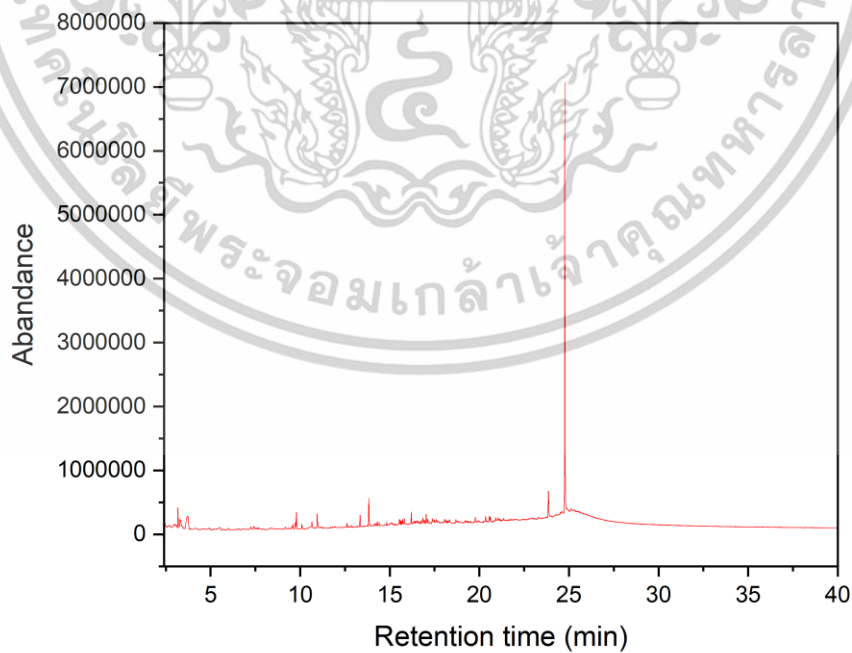
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ



รูปที่ จ.1 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของตัวอย่างน้ำซึ่มสูตรยางรีเคิลมและ
ผงยางรถยนต์ (RR:GTR)



รูปที่ จ.2 โครมาโตแกรม Headspace GC-MS ของตัวอย่างน้ำซึ่มสูตร EPDM:G-EPDM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวภาวิตา ขุนตาแก้ว
วัน เดือน ปีเกิด	10 สิงหาคม พ.ศ. 2542
ที่อยู่ปัจจุบัน	35 ถ.ราษฎร์อุทิศ ต.บางคล้า อ.บางคล้า จ.ฉะเชิงเทรา 24110
ประวัติการศึกษา	2564 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.32 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2567 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 4.00 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา
ผลงานทางวิชาการ	Khuntakaew, P. and Jangchud I. 2024. "Study of low odor porous rubber pipe for urban agriculture." <i>The 15th National Science Research Conference</i> . 485-492.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้