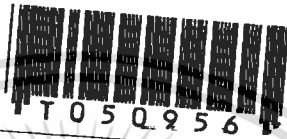


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตท่อน้ำซีมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์

PRODUCTION OF POROUS PIPES MADE FROM
NATURAL RUBBER (NR) AND GROUND RUBBER TIRE (GRT)



สุมนา แจ่มเหมือน
SUMANA JAMMUAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วพ.

ล 8417

2547

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...50956

วัน,เดือน,ปี 2 6 พ.ค. 2547

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9680-05-7

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRODUCTION OF POROUS PIPES MADE FROM
NATURAL RUBBER (NR) AND GROUND RUBBER TIRE (GRT)



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

2004

ISBN 974-9680-05-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตท่อน้ำซีมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์
นักศึกษา	นางสาวสุมนา แจ่มเหมือน
รหัสประจำตัว	43065601
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตท่อน้ำซีมที่เตรียมจากยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (Dinitroso pentamethylene tetramine, DNPT) เป็นสารให้ฟองและสารประกอบยูเรียเป็นคิกเกอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) และทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยเครื่องอบความร้อน (Hot air oven) โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซีม ได้แก่ อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง ปริมาณเคมีดำ ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์และความยาวท่อ สมบัติของท่อน้ำซีมที่ศึกษาได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซีมผ่านของน้ำ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมคือ การเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณเคมีดำพบว่าสมบัติบางประการ เช่น ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งคือที่ปริมาณเคมีดำ 50 phr จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง ส่วนความหนืดมูนนี้ มอดุลัส ความแข็งกดและความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเคมีดำ เมื่อปริมาณ GRT เพิ่มขึ้นสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง พบว่าเมื่อใช้ขนาดอนุภาค GRT เล็กลงสมบัติเชิงกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอัตราการซีมผ่านของน้ำลดลงเมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการซีมผ่านน้ำแต่ละตำแหน่งของท่อมีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษาการผลิตท่อน้ำซีมพบว่าท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black เท่ากับ 40:60:3:50 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี อัตราการซีมผ่านของน้ำเหมาะสมกับการใช้งานในด้านเกษตรกรรม และมีต้นทุนการผลิตประมาณ 79 บาท/กิโลกรัม (สามารถผลิตท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ได้ยาวประมาณ 7.3 เมตร)

Thesis Title	Production of Porous Pipes Made from Natural Rubber (NR) and Ground Rubber Tire (GRT)
Student	Miss Sumana Jammuan
Student ID.	43065601
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2004
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr.Ittipol Jangchud

ABSTRACT

In this research work, porous pipes were produced from natural rubber (NR) and ground rubber tire (GRT) using dinitrosopentamethylenetetramine (DNPT) as a blowing agent and urea as a kicker. The mixtures were compounded by a two-roll mill, extruded into porous pipe by a single-screw extruder and vulcanized by a hot air oven. Factors affecting porous pipe properties were studied such as temperature and vulcanization time, %carbon black loading and blowing agent loading, NR:GRT ratio, GRT particle size, and pipe length. The porous pipe properties were characterized such as mechanical, physical, morphological and water permeation properties. It was found that suitable vulcanization conditions were found at 160 °C for 20 min. When carbon black loading was increased, it was found that tensile strength and tear strength were increased up to an optimum point. Other properties such as mooney viscosity, modulus, hardness, and density were increased with increasing carbon black loading. As % GRT loading was increased, mechanical properties were decreased. When GRT particle size was decreased, it was found that the mechanical properties were increased, whereas the water permeation rate was decreased. When the pipe length was increased, the water permeation rate in each section was found to be insignificantly changed. Porous pipe compound of NR:GRT:DNPT:C-black ratio of 40:60:3:50 had good overall mechanical properties and water permeation rate suitable for agricultural applications. The cost of porous pipes was about 79 baht/kg (the pipe had an external diameter of 20 mm, a thickness of 3 mm and a length of 7.3 m).

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ดร.นุชนาฏ ณ ระนอง ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบตลอดจนให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร และภาควิชาเคมี สจล. ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ยูซาโก้ (ไทยแลนด์) ที่ให้ความอนุเคราะห์สารให้ฟอง และบริษัท แสงไทยผลิตยาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงยางรถยนต์

ขอขอบคุณน้องๆ นักศึกษาทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจต่อผู้วิจัยจนประสบความสำเร็จในการศึกษา

สุมนา แจ่มเหมือน

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4.1 สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant).....	12
2.2.4.2 สารป้องกันโอโซน (Antiozonant).....	13
2.2.5 สารตัวเติม (Fillers).....	13
2.2.5.1 เขม่าดำ (Carbon Black)	13
2.2.5.2 ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง.....	14
2.2.6 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing Aids).....	14
2.2.6.1 เปปไทเซอร์ (Peptizers).....	14
2.2.6.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers).....	15
2.2.7 สารให้ฟอง (Blowing Agent).....	15
2.2.7.1 Dinitrosopentamethylene Tetramine (DNPT หรือDPT).....	16
2.2.8 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator).....	17
2.3 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular Rubber).....	19
2.4 ผงยางรถยนต์ (Ground Rubber Tire, GRT).....	20
2.4.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Grinding)	20
2.4.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient Grinding)	21
2.5 เครื่องอัดรีดสำหรับยาง (Rubber Extruder)	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
2.7 ท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้า.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	33
3.3 วิธีการทดลอง.....	33
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	33
3.3.1.1 การบดผสมยาง.....	35
3.3.1.2 การขึ้นรูปเป็นท่อ.....	36
3.3.1.3 การเชื่อมโยงท่อยาง.....	36
3.3.1.4 การทดสอบการเชื่อมโยงยาง.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1.5 การทดสอบความหนืดมูนี้.....	37
3.3.1.6 การทดสอบแรงดึง.....	37
3.3.1.7 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด.....	37
3.3.1.8 การทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์.....	38
3.3.1.9 การทดสอบความหนาแน่น.....	39
3.3.1.10 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด.....	39
3.3.1.11 การทดสอบความต้านทานต่อไอโซน.....	40
3.3.1.12 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	41
3.3.1.13 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ.....	41
3.3.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม.....	41
3.3.2.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง.....	41
3.3.2.2 ผลของปริมาณเขม่าดำ.....	41
3.3.2.3 ผลของปริมาณสารให้ฟอง.....	42
3.3.2.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับผงยางรถยนต์.....	42
3.3.2.5 ผลของขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์.....	42
3.3.2.6 ผลของความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อและผลของ ความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	45
4.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง.....	45
4.2 การศึกษาปริมาณเขม่าดำ.....	56
4.3 การศึกษาปริมาณสารให้ฟอง.....	64
4.4 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์.....	72
4.5 การศึกษาขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์.....	81
4.6 ผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ.....	89
4.6.1 การศึกษาความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อ.....	89
4.6.2 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความยาวท่อต่างกัน.....	90
4.7 สรุปสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของท่อน้ำซึม.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	92
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของท่อน้ำซีเมนต์.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
เอกสารอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก ก อุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง.....	101
ภาคผนวก ข เวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีเมนต์.....	102
ภาคผนวก ค นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	105
ภาคผนวก ง การหาความยาวของท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณการนำยางล้อยี่ห้อแล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบต่างๆ.....	2
2.1 ตัวอย่างชนิดของสารให้ฟองที่เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ.....	17
2.2 รายละเอียดท่อพอกอากาศของบริษัท Leaky Pipe Systems.....	29
2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky Pipe Systems.....	30
2.4 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Micro-flo Industries.....	30
3.1 สมบัติบางประการของ RSS 2 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.2 สมบัติบางประการของ DNPT ที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.3 สมบัติบางประการของยูเรียที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.4 การรายงานผลของลักษณะรอยแตก.....	40
3.5 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ.....	44
4.1 ความต้านทานต่อโอโซนของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	87
4.2 ความดันน้ำแต่ละตำแหน่งของความยาวท่อ เมื่อใช้ความดันน้ำเริ่มต้นต่างกัน.....	89
4.3 สมบัติบางประการของท่อน้ำซึม.....	92
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซึม.....	93

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การจัดการกับยางล้อใช้แล้ว.....	3
2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ -ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน.....	6
2.2 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve)	10
2.3 กลไกปฏิกิริยาการสลายตัวของ DNPT.....	16
2.4 ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของ Unipaste [®] (ยูเรีย) ต่อสารให้ฟอง AZ, DNPT และ OBSH.....	18
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ.....	19
2.6 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางร้อน (Hot feed extruder).....	22
2.7 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางเย็น (Cold feed extruder).....	22
3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงาน.....	35
3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 412.....	37
3.3 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624.....	38
3.4 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ชนิดซอร์ A.....	38
3.5 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด.....	40
3.6 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึม.....	43
4.1 ท่อน้ำซึมเตรียมจาก NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) ที่ผลิตได้.....	47
4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	47
4.3 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	48
4.4 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	48
4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	49
4.6 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยางกับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง.....	50
4.8 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	52
4.9 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 150 °C เมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	52
4.10 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 160 °C เมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	53
4.11 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 150 °C เมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	54
4.12 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 160 °C เมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน.....	55
4.13 กราฟแสดงความหนืดมูนี่ (ML1+4(100°C)) ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเคมีดำต่างกัน.....	57
4.14 กราฟแสดงความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเคมีดำต่างกัน.....	58
4.15 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเคมีดำต่างกัน.....	58
4.16 กราฟแสดงมอดุลัสที่ 100 %ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเคมีดำต่างกัน.....	59
4.17 กราฟแสดงความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเคมีดำต่างกัน.....	59
4.18 กราฟแสดงความแข็งแรงกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเคมีดำต่างกัน.....	60
4.19 ผลของปริมาณเคมีดำต่อสมบัติของยาง.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟแสดงความหนาแน่นของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	62
4.21 กราฟแสดงอัตราการซึ่มผ่านน้ำของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	62
4.22 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึ่มแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	63
4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	65
4.24 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	65
4.25 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	66
4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	66
4.27 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	67
4.28 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	67
4.29 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	69
4.30 กราฟแสดงค่าอัตราการซึ่มผ่านน้ำของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	69
4.31 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึ่มแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	71
4.32 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100°C)) ของท่อน้ำซึ่มที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	73

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	73
4.34 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	74
4.35 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	74
4.36 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 200% ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	75
4.37 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	75
4.38 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	76
4.39 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	76
4.40 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	78
4.41 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	78
4.42 SEM Micrographs แสดงลักษณะฐานวิทยาของท่อน้ำซีเมนต์แตกหักที่อุณหภูมิต่ำประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้เมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ และผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	80
4.43 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100°C)) ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน....	82
4.44 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน....	82

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	83
4.46 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	83
4.47 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	84
4.48 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงกดก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) ก่อนและหลังการบ่มแรง เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	84
4.49 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	85
4.50 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	86
4.51 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	86
4.52 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	88
4.53 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึมที่มีความยาวท่อต่างกัน (A ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:50) และ B ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50)).....	90
ก.1 อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตรที่มี DNPT เป็นสารให้ฟอง.....	101
ก.2 อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตรที่มี DNPT เป็นสารให้ฟองและยูเรียเป็นสารกระตุ้น.....	101

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.1 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิการเชื่อมโยงต่างกัน.....	102
ข.2 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน.....	102
ข.3 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน.....	103
ข.4 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	103
ข.5 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน.....	104



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัยและแรงจูงใจในการทำวิจัย

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติและส่งออกในรูปยางดิบมากที่สุดของโลก มีปริมาณการผลิต การส่งออก และการใช้เพิ่มมากขึ้นทุกปี ในปี 2545 มีปริมาณการผลิตประมาณ 2.6 ล้านตัน [1] โดยมีปริมาณการส่งออกประมาณ 90% ซึ่งส่วนใหญ่ส่งออกไปญี่ปุ่น จีน และสหรัฐอเมริกา ส่วนที่เหลืออีกประมาณ 10% จะใช้ภายในประเทศ สำหรับชนิดของยางที่ส่งออกนั้น ส่วนใหญ่ยังเป็นการส่งออกยางแผ่นรมควัน และมีแนวโน้มส่งออกยางแท่งเพิ่มขึ้น ปัจจุบันจะเห็นว่ามี การเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมยางของโลกเป็นอย่างมาก เทคโนโลยีด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง ก้าวหน้าไปได้รวดเร็วกว่าเทคโนโลยีการผลิตวัตถุดิบ ยางสังเคราะห์นับวันเข้ามามีบทบาทกับ ผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศผู้ผลิตยางธรรมชาติรายใหญ่ที่สุดของโลก ก็คงหนีผลกระทบนี้ไปไม่ได้ เช่นเดียวกับผู้ผลิตอื่นในภูมิภาคเช่น ประเทศอินโดนีเซียและมาเลเซีย สิ่งแรกที่มีผลกระทบโดยทันทีคือราคาที่ยางที่เกษตรกรรออยู่รอด หากการผลิตเพิ่มขึ้นในอัตราสูงกว่า การใช้ ราคาที่ย่อมตกต่ำ

แนวทางแก้ไขปัญหาราคายางตกต่ำที่ใช้อยู่โดยการแทรกแซงราคายางนั้น ไม่เพียงพอที่จะ แก้ไขปัญหาความเดือดร้อนของเกษตรกรได้ เพราะปัญหาที่เกษตรกรประสบอยู่ในขณะนี้คือรายได้ที่ ลดลง สิ่งที่รัฐบาลดำเนินการคือการหามาตรการที่ช่วยให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น หากมีการ ส่งเสริมการใช้ยางภายในประเทศมากขึ้น โดยการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น โอกาสที่เพิ่ม รายได้จะสูงกว่าการส่งออกในรูปวัตถุดิบ นอกจากนี้จะช่วยแก้ปัญหารายได้ของเกษตรกรชาวสวน ยางแล้ว ยังเป็นการเพิ่มการจ้างงานในระดับล่าง และหากมีการผลิตเพิ่มขึ้นการจ้างงานก็เพิ่มขึ้น

ปัจจุบันยางล้อแสดงบทบาทสำคัญต่อชีวิตประจำวันของทุกคน ไม่ว่าจะเป็นยางล้อในรูปการ ขนส่งทั้งส่วนบุคคลและสาธารณะ ใช้ในด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเครื่องจักร ทั่วโลกมีการ ผลิตยางล้อประมาณ 1,000 ล้านเส้นทุกวัน [2] วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตยางล้อสมัยใหม่ ได้แก่ ยางผสมสูตร (Rubber compound) เหล็ก และผ้า ในอดีตยางล้อผลิตขึ้นจากยางธรรมชาติเพียง อย่างเดียว แต่ปัจจุบันได้มีการใช้ส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ทั้งนี้เพื่อให้เกิด การยึดเกาะกับผิวถนนได้ดี อายุของยางล้อเส้นหนึ่งๆ ขึ้นอยู่กับประเภทของยางล้อและการขับที่ ของผู้ขับขี่ ซึ่งยางล้อใช้แล้วจะต้องถูกกำจัดด้วยวิธีการที่ถูกต้องเพื่อป้องกันการทำลายสิ่งแวดล้อม เนื่องจากยางล้อประกอบด้วยยางที่เชื่อมโยงซึ่งเป็นพอลิเมอร์จำพวกเทอร์โมเซต (Thermosets) เกิดการย่อยสลายยาก ในปัจจุบันการจัดการกับยางล้อใช้แล้วคือการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse)

การหล่อดอก (Retreading) การนำวัสดุมาใช้ใหม่ (Material recycling) นำไปเผาเพื่อใช้เป็น

เอนกสารนี้เป็นเอนกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

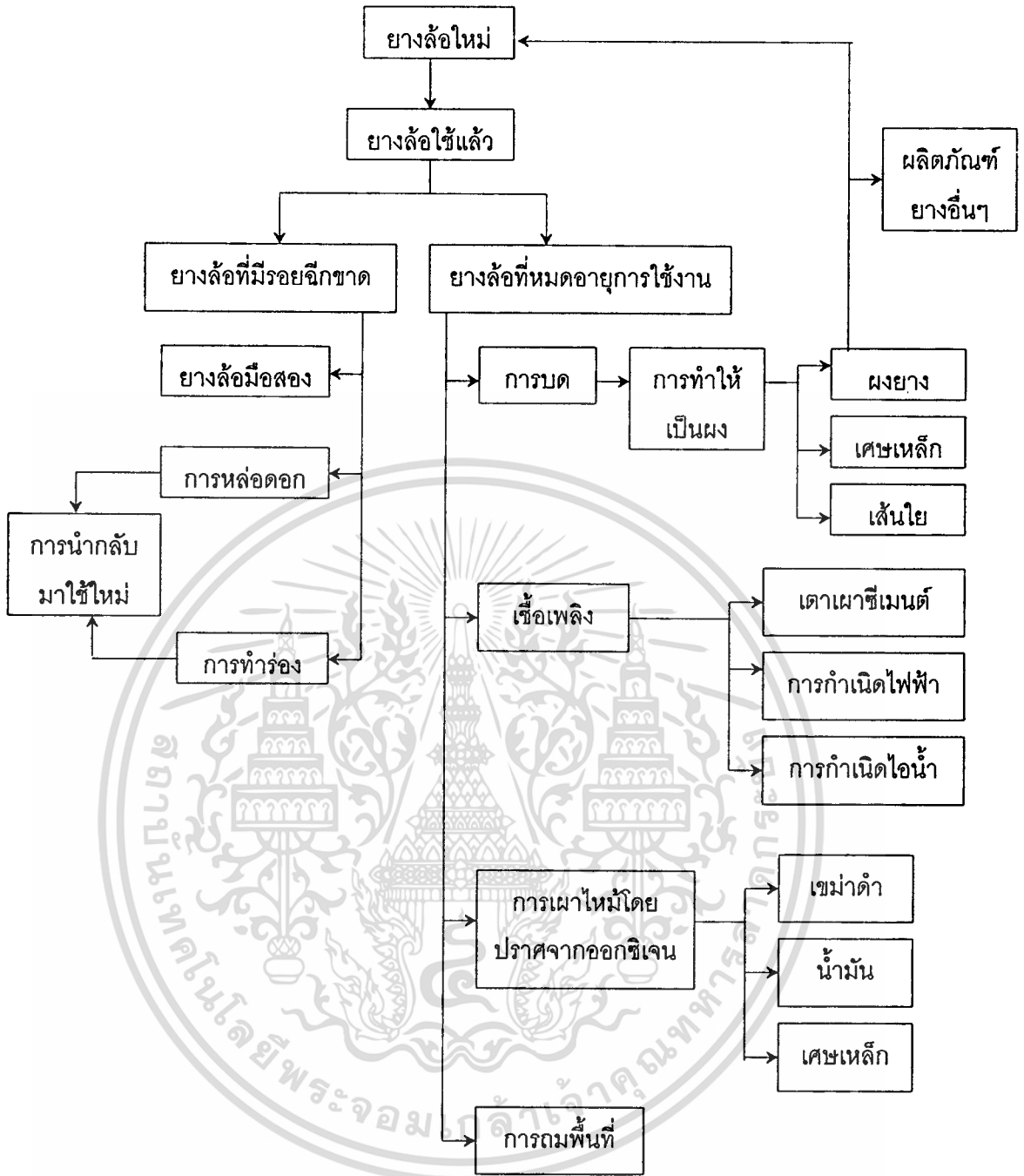
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานและที่ทำน้อยที่สุดคือการนำไปถมพื้นที่ ซึ่งจะใช้เมื่อไม่มีวัสดุอื่นแล้วเท่านั้น ในบางประเทศการถมพื้นที่ด้วยยางหมดอายุเป็นเรื่องผิดกฎหมาย เนื่องจากทำให้เกิดการแพร่ของยุงและเชื้อโรค นอกจากนี้สารเคมีต่างๆที่ผสมอยู่ในยางเช่น พลาสติไซเซอร์ สารแอนติออกซิแดนท์ สารลดการติดไฟ ฯลฯ มีโอกาสที่จะแพร่มาที่ผิวของยางไปสู่สภาวะแวดล้อมสามารถแสดงการจัดการกับยางล้อใช้แล้วดังรูปที่ 1.1 และปริมาณการนำยางล้อใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการนำยางล้อใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบต่างๆ [3]

วิธีการปรับปรุง	ฝรั่งเศส	เยอรมัน	อิตาลี	รัสเซีย	เบลเยียม	สวีเดน	สหรัฐอเมริกา
การหล่อดอก (%)	20	17.5	22	31	20	5	-
การนำกลับมาใช้ใหม่ (%)	16	11.5	12	16	10	12.5	28
เชื้อเพลิง (%)	15	46.5	23	27	30	64	72
การถมพื้นที่ (%)	45	4	40	23	5	5	-
การส่งออก (%)	4	16	2	2.5	25	7	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 การจัดการกับยางล้อยใช้แล้ว [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนน้ำเป็นปัญหาระดับชาติที่ต้องการการแก้ไขอย่างเร่งด่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชาชนส่วนใหญ่เป็นเกษตรกร มีความจำเป็นต้องใช้น้ำในการประกอบอาชีพและดำรงชีพ ปัญหาการตัดไม้ทำลายต้นน้ำ และปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น เช่น เอลนีโน ฯลฯ ยิ่งทำให้ปัญหาการขาดแคลนน้ำรุนแรงยิ่งขึ้น น้ำจึงเป็นทรัพยากรและพลังงานที่สำคัญของชาติที่ต้องให้ความสำคัญในการศึกษาวิจัยเพื่อรักษาอนุรักษ์ให้มีเพียงพอกับปริมาณการใช้ของประเทศ

งานวิจัยนี้เสนอที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางและแก้ปัญหายะพอลิเมออร์ รวมถึงส่งเสริมการอนุรักษ์น้ำ โดยการพัฒนาท่อน้ำซึม (Porous water pipe) ซึ่งเตรียมจากยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และผวยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางเกษตรกรรมทดแทนระบบน้ำหยดซึ่งให้น้ำเฉพาะบริเวณและระบบน้ำต้น (Sprinkler) ซึ่งต้องใช้ความดันสูงและน้ำปริมาณมาก เป็นผลให้เกิดการกัดเซาะของดิน ท่อน้ำซึมเป็นท่อสายยางที่ประกอบด้วยผวยางรถยนต์เป็นองค์ประกอบหลักและมียางธรรมชาติทำหน้าที่เป็นสารเชื่อม (Binder) โดยใช้สารไดไนโตรโซเพนตะเมทิลินเตตระมีน (N,N'-Dinitroso pentamethylene tetramine, DNPT) ทำหน้าที่เป็นสารให้ฟอง (Blowing agent) ท่อมีความยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ มีโครงสร้างเป็นช่องเล็กๆ เชื่อมต่อกันจำนวนมากซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านออกมาได้ในอัตราคงที่ที่ความดันต่ำและปริมาณน้ำต่ำ ทำให้สามารถให้น้ำแก่รากได้โดยตรงโดยไม่รบกวนรากและไม่เกิดการเซาะของดิน นอกจากนี้สามารถให้น้ำได้โดยไม่จำกัดขนาดพื้นที่

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบในการผลิตท่อน้ำซึมที่มีสมบัติดี และสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตท่อน้ำซึมที่มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปของผสมระหว่างยางธรรมชาติกับผวยางรถยนต์ โดยใช้วิธีการอัดรีด
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง ปริมาณเขม่าดำ ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนของยางธรรมชาติกับผวยางรถยนต์ และขนาดอนุภาคของผวยางรถยนต์ ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ สมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยาและอัตราการซึมผ่านของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ
4. วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตท่อน้ำซึมจากจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนการผลิตต่ำและมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์
2. สามารถใช้น้ำสำหรับการเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพ
3. ลดปริมาณขยะพอลิเมอร์ ได้แก่ ยางรถยนต์ที่ใส่แล้ว ซึ่งเป็นปัญหามลภาวะของประเทศ
4. ส่งเสริมการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศ โดยการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มขึ้น
5. สามารถใช้ความรู้ที่ได้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรและอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ในประเทศ



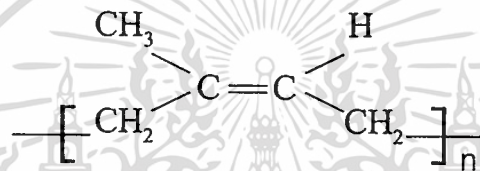
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [4]

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-Polyisoprene, PI) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง ยางมีหน่วยซ้ำๆ กันคือไอโซพรีน (C₅H₈) โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติคือ ต้นยางพารา ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ "ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส" (Hevea brasiliensis) บางครั้งเรียกยางธรรมชาติว่า "ยางพารา"



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

ยางเป็นวัสดุที่สามารถยืดตัวออกหรือเปลี่ยนขนาดได้หลายเท่า (อย่างน้อยสองเท่า) เมื่อทำการให้แรง และสามารถหดกลับคืนใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็วเมื่อปล่อยแรง ในการใช้ประโยชน์จากยางต้องนำยางมาทำการเชื่อมโยงหรือวัลคาไนเซชัน (Crosslinking หรือ Vulcanization) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติหรือเทอร์โมเซต ยางจะมีสมบัติที่ดี คือเปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด และไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง ไหลได้เมื่อทิ้งไว้นาน กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง

ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติต้องทำการแปรรูปน้ำยางดิบให้อยู่ในรูปอื่น เพื่อความสะดวกในการใช้งาน การขนย้าย และการเก็บรักษา ซึ่งมี 2 รูปแบบคือ

1. ยางแห้ง (Dry rubber) ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheets, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheets, ADS) ยางแท่ง (Block rubbers) ยางเครพ (Crepe rubbers) เป็นต้น
2. น้ำยางข้น (Concentrated latex)

2.1.1 ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

ยางแผ่นรมควันเป็นยางธรรมชาติที่แปรรูปเป็นยางแห้ง มีผลผลิตประมาณร้อยละแปดสิบของยางทั้งประเทศ การผลิตยางแผ่นรมควันจะทำโดยตากยางแผ่นในโรงรมควัน ที่มีการเผาฟืนไม้ให้ควันด้านล่าง โรงรมควันจะมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C ทำใหยางแห้งภายใน 4-7 วัน การรมแผ่นยางด้วยควันไฟ จะช่วยให้ยางแห้งและป้องกันการเกิดเชื้อรา ช่วยยืดอายุการเก็บรักษา เนื่องจากควันไฟมีสารจำพวกฟีนอล (Phenol) ซึ่งเป็นสารต่อต้านการเกิดเชื้อราตามธรรมชาติ

การจัดชั้นยางแผ่นรมควันจะดูด้วยสายตา โดยพิจารณาจากขนาด รูปร่าง ความหนา สี ฟองอากาศ เชื้อราบนแผ่นยาง ความสม่ำเสมอ ตาหนีจากการรมควัน ความชื้น สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 6 ชั้น คือ [5]

1. ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ

เป็นยางแผ่นรมควันที่มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

2. ยางแผ่นรมควันชั้น 1

ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือริ้วรอยของยางถูกรมควันมากหรือน้อยเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

3. ยางแผ่นรมควันชั้น 2

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

4. ยางแผ่นรมควันชั้น 3

ก้อนยางแต่ละก้อนมีเชื้อราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 10 % (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่างและฟองอากาศบ้าง แต่ต้องไม่มีร่องรอยของยางถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

5. ยางแผ่นรมควันชั้น 4

ก้อนยางมีราขึ้นบ้าง แต่ต้องไม่เกิน 20 % (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องปานกลาง ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

6. ยางแผ่นรมควันชั้น 5

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 30 % (ก้อนยางตัวอย่าง) แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additives for Rubbers) [4,6-8]

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจำเป็นต้องมีการ "ออกสูตรยาง" (Rubber formulation) ซึ่งเป็นการกำหนดชนิดและปริมาณสารเคมีต่างๆ ที่ผสมเข้ากับยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ส่วนประกอบของสูตรผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ สามารถแบ่งเป็นกลุ่มสารหลักได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 สารเชื่อมโยง (Vulcanizing Agent)

ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง ทำให้ยางซึ่งเป็นวัสดุที่อ่อน นิ่ม ยืดหยุ่นต่ำ ไม่แข็งแรง เหนียวติด และไม่มีเสถียรภาพของรูปร่าง กลายเป็นวัสดุที่แข็งแรง ยืดหยุ่นสูง มีเสถียรภาพของรูปร่าง และทนอุณหภูมิสูง สารเชื่อมโยงแบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

1. กำมะถัน (Sulfur)
2. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor)
3. สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide)
4. ซีลีเนียม (Selenium) และ เทลลูเรียม (Tellurium)
5. สารอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์ ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resins) เป็นต้น

2.2.1.1 การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (Sulfur Vulcanization)

การเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน เป็นวิธีที่นิยมที่สุดเนื่องจากกำมะถันมีราคาถูก ละลายได้ดีในยาง ที่สำคัญที่สุดคือยางส่วนมากที่นิยมใช้เป็นยางที่ไม่อิมัตว มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) และยางบิวตะไดอิน (BR) ฯลฯ จึงว่องไวต่อการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน โดยใช้ร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) และสารกระตุ้น (Activators) กำมะถันที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางมี 2 ชนิดคือ

1. กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปผลึก ромบิก (Rhombic) โครงสร้างเป็นวงแหวน ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม (S_8) เกิดการแตกตัวของวงแหวนที่อุณหภูมิสูงประมาณ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป เนื่องจากมีราคาถูก ใช้ในปริมาณน้อย ปกติใช้กำมะถันประมาณ 1-3 phr ถ้าใส่กำมะถันมากเกินไปจะทำให้เกิดการ "บลูม" (Bloom) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่กำมะถันเกิดการแพร่จากภายในออกมาสะสมเป็นผลึกที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เห็นเป็นรอยคราบสีเหลือง

2. กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur) เป็นกำมะถันในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ไม่ละลายในตัวทำละลายและยาง ผสมเข้ากับยางได้ยากกว่ากำมะถันชนิดละลาย แต่เมื่อผสมเข้ากันแล้วจะเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนกับยาง ทำให้ไม่เกิดการบลูม จึงนิยมใช้กำมะถันชนิดนี้เมื่อต้องการใส่กำมะถันในปริมาณมาก เช่น ยางชนิดแข็งมาก ข้อจำกัดของกำมะถันชนิดนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือมีราคาแพง นอกจากนี้อาจเปลี่ยนโครงสร้างเป็นกัมมะถันชนิดละลายได้ที่อุณหภูมิสูงเกิน 100°C จึงต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกิน ถ้าต้องการใช้ประโยชน์กัมมะถันชนิดไม่ละลาย

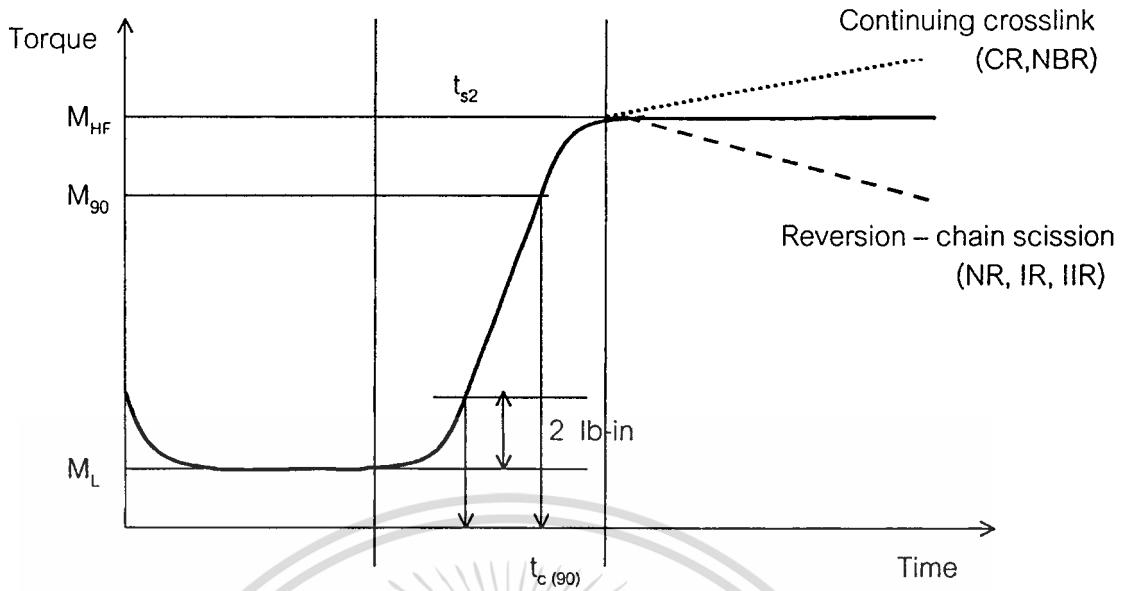
2.2.1.2 เครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (Curemeters for Rubber Compounds)

สามารถแบ่งเครื่องวัดการเชื่อมโยงยางเป็น 2 ชนิดคือ

1. เครื่องวัดการไหลแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometers, ODR) เป็นเครื่องที่สามารถวัดการเชื่อมโยงของยางได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางและห้องปฏิบัติการทดสอบยางทั่วไป เพื่อใช้ในการหาสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสม หาเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตยาง และใช้ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง หลักการทำงานคือ การตรวจวัดความแข็งของยาง โดยการวัดการเปลี่ยนแรงหมุน (Torque) ของจานรูปโคนวงกลม (Biconical disc) หมุนอยู่ในตัวอย่างยางที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

2. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) เป็นเครื่องวัดการเชื่อมโยงชนิดใหม่ที่มีการถ่ายเทอุณหภูมิรวดเร็ว เนื่องจากใช้ตัวอย่างเล็กและบางกว่า เป็นผลให้การเชื่อมโยงได้รวดเร็วกว่า ไม่มีข้อผิดพลาดของการทดสอบเนื่องจากแรงเสียดทานของจานหมุน ซึ่งให้ข้อมูลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า ให้ข้อมูลมากกว่าชนิดกว่า เช่น ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') อัตราการเชื่อมโยง (Cure rate) และ Phase angle

การวัดการเชื่อมโยงยางสามารถวัดได้จากการเพิ่มแรงบิด (Torque) ที่ใช้เพิ่มทำให้การหมุนของจานที่หมุนคงที่ เนื่องจากทดสอบที่อุณหภูมิสูง จึงไม่มีผลของการเปลี่ยนแรงบิดอันเนื่องมาจากความหนืด ดังนั้นการเพิ่มแรงบิดของตัวอย่างยางที่เกิดการเชื่อมโยงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนจุดเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของยาง ผลการทดสอบสามารถแสดงในรูปกราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งเรียกว่า กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟการเชื่อมโยง (Cure curve) [4]

ตามมาตรฐาน ASTM ได้นิยามค่าต่างๆในกราฟการเชื่อมโยงดังนี้

M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

M_{HF} = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

M_{HR} = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟที่สูงสุดแล้วลดลง (Reversion)

M_H = ค่าแรงบิดสูงสุดของเส้นกราฟในเวลาที่ทดสอบ เมื่อกราฟเพิ่มขึ้น (Marching)

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

M_{90} = ค่าแรงบิดที่ 90 % ของการเชื่อมโยง คำนวณได้จาก

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

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

CRI = ดัชนีอัตราเร็วเชื่อมโยง (Cure rate index) คำนวณได้จากสมการ

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

2.2.2 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง คือสารเคมีที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Crosslinking rate) เร็วขึ้น ทำให้เวลาการเชื่อมโยง (Cure time) เร็วขึ้น การเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้กัมมันต์ปริมาณน้อยลง

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงสามารถแบ่งตามมาตรฐาน ASTM เป็น 6 กลุ่มดังนี้

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

ในการใช้งานสารเร่งในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าจะเรียกว่าเป็นสารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerators) สารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกัน ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน

2.2.2.1 CBS (N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulfenamide)

CBS เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มซัลเฟนาไมด์ ซึ่งเป็นสารเร่งที่มีเวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time) ยาวกว่าไทเอโซล การใส่ซัลเฟนาไมด์เพิ่มขึ้น ทำให้ Scorch time สั้นลงบ้าง แต่ทำให้มีเวลาเชื่อมโยง (Cure time) สั้นลงมากและมอดุลัสสูงชันมากด้วย เนื่องจากซัลเฟนาไมด์มี Scorch time ยาว ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในแม่แบบดี เพราะมีเวลาให้ยางไหลได้เต็มแม่แบบและไม่เหมาะแก่การเชื่อมโยงแบบใช้อากาศร้อน แต่เมื่อนำซัลเฟนาไมด์ผสมกับเตตระเมทิลไทยูแรมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram monosulfide, TMTM) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

2.2.2.2 TMTD (Tetramethyl thiuram disulfide)

TMTD เป็นสารเร่งที่อยู่ในกลุ่มไทยูแรมไดซัลไฟด์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาเร็วที่สุดและนิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มนี้ ยางที่ใช้ไทยูแรมเป็นสารเร่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้หลายวิธี เช่น ใช้เครื่องอบไอน้ำและอากาศร้อน ซึ่งทำให้ยางเกิดการจับตัวก่อนที่จะเสียรูปในขณะที่เชื่อมโยง ในบางครั้งอาจใช้ไทยูแรมเป็นสารเร่งทุติยภูมิร่วมกับสารเร่งไทเอโซลและซัลเฟนาไมด์ได้

2.2.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง สารกระตุ้นที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางในปัจจุบัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก เนื่องจากมีราคาไม่แพงและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน สามารถใช้ได้กับยางทั่วไป ซิงค์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดสเตียริกเกิดเป็น ซิงค์สเตียเรต ซึ่งสามารถละลายในยางได้ และช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เนื่องจากเป็นซิงค์ไอออน ที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในยาง

2.2.3.1 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO)

ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นที่เป็นสารอนินทรีย์ที่สำคัญและนิยมใช้ เมื่อปริมาณ ซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น มอดุลัสจะเพิ่มขึ้นและปริมาณของซิงค์ออกไซด์ที่ให้มอดุลัสสูงสุดคือมากกว่า 3 phr โดยทั่วไปจะใช้ปริมาณ 3-5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถใช้ใน ปริมาณ 1 phr ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีมอดุลัสสูงและมีสีใส

2.2.3.2 กรดไขมัน (Fatty Acid)

กรดไขมันเป็นสารกระตุ้นอนินทรีย์ที่สำคัญ สำหรับสารเร่งการเชื่อมโยงบางตัว เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก กรดลอริก เป็นต้น กรดไขมันที่ใช้ส่วนมากเป็นของผสมของกรด อะลิฟาติกอิ่มตัว ที่มีคาร์บอน 12 ถึง 18 อะตอม ปริมาณการใช้กรดไขมันในยางขึ้นกับชนิดของ ยาง ถ้ายางชนิดใดมีกรดไขมันอยู่แล้วไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ปริมาณน้อย สำหรับยางธรรมชาติมี กรดไขมันอยู่ปริมาณเล็กน้อยซึ่งอยู่ในรูปกรดสเตียริก แต่กรดไขมันที่มีอยู่ในยางธรรมชาติมี ปริมาณต่างกันมาก ซึ่งทำให้เวลาในการเชื่อมโยงต่างกัน ดังนั้นโดยทั่วไปปริมาณของกรดสเตียริก ที่ใช้ในยางธรรมชาติ จะใช้ประมาณ 1 - 4 phr เพื่อลด Cure time ที่ต่างกัน

2.2.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradant)

2.2.4.1 สารป้องกันการออกซิเดชัน (Antioxidant)

สารป้องกันการออกซิเดชันเป็นสารที่ป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง เนื่องจากยางเป็น สารอินทรีย์ที่เสื่อมสลายได้ เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ซึ่งออกซิเจนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อม สลายของยาง โดยที่โลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยาง เป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อม สลายเร็วขึ้น

สารป้องกันการออกซิเดชัน สามารถแบ่งตามสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็น 3 ชนิดคือ

1. สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์
2. สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์
3. Imidazyl derivative

2.2.4.2 สารป้องกันโอโซน (Antiozonant)

สารป้องกันโอโซนเป็นสารที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง ซึ่งจะทำให้เกิดรอยแตกที่เนื้อยางในแนวตั้งฉากกับทิศทางที่ดึงยาง เมื่อนำยางไปยืดไว้ในบรรยากาศแล้ว ตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่ง ยางชนิดไม่อิ่มตัว เช่น ยางธรรมชาติ จะเกิดการแตกของยางเนื่องจากโอโซน มากกว่ายางชนิดอิ่มตัว เช่น ยางบิวทิล (IIR) หรือยางอีพียาร์ (EPR) สารป้องกันโอโซนที่ดีคือ P-Phenylene diamine (PPD) นอกจากนี้ยังพบว่าขี้ผึ้งปิโตรเลียม (Petroleum wax) ยังเป็นสารที่ใช้ป้องกันโอโซนได้ด้วย โดยปริมาณขี้ผึ้งที่ใช้ต้องมากพอที่จะซึมออกมาที่ผิว ซึ่งขี้ผึ้งที่ซึมออกมาที่ผิวจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับผิวยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน

2.2.5 สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติมเป็นสารที่มีราคาถูก เทียบกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ ซึ่งมีราคาแพง สามารถใช้ผสมในยางเพื่อเพิ่มปริมาณของยางผสมสูตรหรือผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สารตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง โดยทำให้พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติมมีความแข็งแรงสูงขึ้น

สารตัวเติมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนการผลิต และช่วยเสริมแรงทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์สูงขึ้น สารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่สำคัญได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ
2. สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (Non-reinforcing fillers) ทำหน้าที่เพิ่มปริมาณหรือลดต้นทุนเพียงอย่างเดียวไม่ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ดินขาว (Clay) ฯลฯ

2.2.5.1 เขม่าดำ (Carbon Black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูก สามารถใส่เขม่าดำในยางได้ในปริมาณมาก (มากกว่า 50 phr) และที่สำคัญที่สุดคือสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางอย่างมาก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) ของยางให้ง่ายขึ้นด้วย เช่น ลดความยืดหยุ่นของของไหล (Melt elasticity) ลดการหดตัว (Shrinkage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของผลิตภัณฑ์ยางหลังการขึ้นรูป เป็นต้น

ปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติการเสริมแรงได้แก่

1. ขนาด (Size) หรือพื้นที่ผิว (Surface area) ขนาดอนุภาคของเขม่าดำจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว สารตัวเติมยังมีขนาดเล็ก ประสิทธิภาพการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น ทำให้ยางมีความแข็งแรง

สูงขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น อย่างไรก็ตามดีเยี่ยมมีขนาดยิ่งเล็กลง การผสมเขม่าดำเข้ากับยางยิ่งทำได้ยากขึ้น

2. โครงสร้าง (Structure) ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่อยาง ส่วนใหญ่จะมีผลทางด้านการแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง จะผสมกระจายในยางได้ดี ทำให้ยางที่ผ่านการอัดรีด (Extrusion) มีผิวเรียบ แต่ผสมในยางได้ปริมาณน้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ

3. เคมีของพื้นผิว (Surface chemistry) เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณน้อยปนอยู่ด้วย สารเหล่านี้จะให้ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน ซึ่งมีผลต่ออัตราการเชื่อมโยง เขม่าดำที่มีความเป็นด่างจะเกิดการเชื่อมโยงเร็วกว่าเขม่าดำที่มีความเป็นกรด

4. ความเป็นรูปพรุน ความเป็นรูปพรุนในเขม่าดำจะมีผลต่อการอัตราการเชื่อมโยง เพราะรูปพรุนนี้จะดูดสารเร่งเข้าไปทำให้การเชื่อมโยงช้าลง

2.2.5.2 ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยาง

1. ความแข็งแรงดึง เขม่าดำเกือบทุกตัวทำให้ความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยที่เขม่าดำปริมาณ 40-50 phr จะให้ความแข็งแรงดึงสูงสุด

2. ความทนทานต่อการขีดถู ขนาดอนุภาคของเขม่าดำมีผลอย่างมากต่อความทนทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการขีดถูจะเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคของเขม่าดำเล็กลง โดยที่ปริมาณเขม่าดำ 60 phr จะให้ความทนทานต่อการขีดถูสูงสุด

3. ความแข็งกด (Hardness) ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเขม่าดำ และถ้าขนาดอนุภาคของเขม่าดำลดลง ความแข็งกดจะเพิ่มขึ้นความทนทานต่อการฉีกขาด เขม่าดำจะทำให้ความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง เมื่อใส่เขม่าดำเพิ่มขึ้นความทนทานต่อการฉีกขาดจะลดลง

2.2.6 สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing Aids)

สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) คือสารเคมีที่ผสมในยางเพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาและพลังงานในการผลิตน้อยลง นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีอัตราเร็วในการผลิตสูงขึ้น ปกติใช้ในปริมาณน้อยไม่เกิน 5 phr

2.2.6.1 เปปไทเซอร์ (Peptizers)

เปปไทเซอร์หรือสารตัดสายโซ่ ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ของยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความหนืดของยางลดลง เกิดการผสมได้ง่ายขึ้น นิยมใส่เพื่อลดเวลาการบด (Mastication) โดยเฉพาะยางดิบที่แข็งเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณเปปไทเซอร์ที่ใส่ในยางประมาณ 1-3 phr เช่น กรดซัลฟอนิก (Sulfonic acid) เพนตะคลอโรไทโอฟีนอล (Pentachlorothiophenol) เป็นต้น

2.2.6.2 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

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

2.2.7 สารให้ฟอง (Blowing Agent)

สารให้ฟองคือ สารที่ใส่เข้าไปในยาง เมื่อให้ความร้อนแก่ยางในขณะทำการเชื่อมยาง โมเลกุลของสารให้ฟองจะสลายตัวให้ก๊าซออกมา ซึ่งทำใหยางเกิดรูพรุนในรูปของฟองน้ำ (Sponge) หรือ ยางรูพรุนขนาดเล็ก (Micro cellular rubber)

สารให้ฟองที่ดีมีลักษณะดังนี้คือ

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

สารให้ฟองสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารให้ฟองชนิดอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ โซเดียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต ซึ่งสารทั้งสามชนิดนี้จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันนิยมใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตมากที่สุด เนื่องจากแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมคาร์บอเนต เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นต่างและกรดตามลำดับ ก๊าซเหล่านี้ถ้าหากเก็บอยู่ในยางจะรวมตัวกันได้ ดังนั้นโอกาสของยางที่ขยายตัวจะยุบตัวกลับเล็กลงอีกได้ นอกจากนี้ความเป็นต่างทำให้ยางเกิดการเชื่อมยางเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารให้ฟองชนิดอินทรีย์ ปัจจุบันใช้สารให้ฟองชนิดอินทรีย์เกือบทั้งหมด เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถละลายในยางได้ดี ทำให้การกระจายของสารให้ฟองเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ฟองอากาศที่อยู่ในยางก็จะกระจายทั่วถึงกันตลอด สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามโครงสร้างดังนี้

- สารประกอบเอโซ (Azo compounds) เช่น Diazoamino-compounds, Azonitrile และ Azodicarbonamide (AZ)

- อนุพันธ์ของไฮดราซีน (Hydrazine derivatives) เช่น Benzenesulfohydrazide (BSH), Benzene-1,3-disulfohydrazide, Diphenyloxide-4,4'-disulfohydrazide และ p-Toluene sulfonic acid hydrazide

- สารประกอบไนโตรโซ (N-Nitroso compounds) เช่น N,N'-Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT) และ N,N'-Dimethyl-N,N'-Dinitrosophthalamide

2.2.7.1 Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT หรือ DPT)

DNPT มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอ่อน สลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 205 °C เมื่อสลายตัวจะให้ก๊าซต่างๆ เช่น ไนโตรเจน ฟอรั่มัลดีไฮด์ และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีน แสดงดังรูปที่

2.3 อย่างไรก็ตามฟอรั่มัลดีไฮด์และเฮกซะเมทิลีนเตตระมีนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่น DNPT สามารถทำให้เจือจางได้โดยไม่เกิดอันตราย ที่ความเข้มข้น 80% จะให้ปริมาณก๊าซมากเป็นพิเศษ (ประมาณ 260 cm³/g ภายใต้สภาวะปกติ) เนื่องจาก DNPT เมื่อสลายตัวให้ก๊าซปริมาณมาก จึงนิยมใช้กันแพร่หลาย สำหรับผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ DNPT ได้แก่ พื้นรองเท้าฟองน้ำ (Porous soles) และ Micro cellular rubber แต่ไม่เหมาะกับการทำ Sponge rubber เนื่องจาก DNPT สลายตัวที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.3 กลไกปฏิกิริยาการสลายตัวของ DNPT [8]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างชนิดของสารให้ฟองที่เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ [7]

	Benzene-sulfo-hydrazide	Benzene-1,3-disulfo-hydrazide	Dinitrosopentamethylene-tetramine	Azodicarbonylamide
<u>กระบวนการเกิดฟองก๊าซก่อนการเชื่อมโยง</u>				
ยางพองน้ำ	ดีมาก	ดี	ใช้ได้	ไม่แนะนำให้ใช้
พื้นรองเท้าแตะ	ดีมาก	ดีมาก	ใช้ได้	ไม่แนะนำให้ใช้
ยางพองน้ำเซลลูลีด ¹⁾	ดีมาก	ดี	ใช้ได้	ใช้ได้
ยางพองน้ำเซลลูลีด ²⁾	ใช้ได้	ดี	ดีมาก	ดีมาก
<u>กระบวนการเกิดฟองก๊าซหลังการเชื่อมโยง</u>				
ยางรูปทรงขนาดเล็กชนิดนิม ³⁾	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดีมาก
พื้นรองเท้าที่มีรูปทรง	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดี
พื้นรองเท้าที่มีรูปทรงขนาดเล็กชนิดแข็ง ⁴⁾	ใช้ได้	ดีมาก	ดีมาก	ดี
ยางอีโบนไนต์ที่มีรูปทรงชนิดของรูปทรง	ดีมาก	ดี	ดี	ใช้ได้
	ละเอียดมากจนมองไม่เห็นรูปทรง	มองเห็นรูปทรง	ละเอียดมากจนมองไม่เห็นรูปทรง	ละเอียดมาก

¹⁾ เชื่อมโยงโดยใช้อากาศร้อน

³⁾ ความหนาแน่นประมาณ 0.3 g/cm³

²⁾ เชื่อมโยงโดยใช้เกลือเหลวหรือความถี่สูง

⁴⁾ คล้ายหนัง

2.2.8 สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator)

สารกระตุ้นปฏิกิริยา (Activator) หรือ คิกเกอร์ (Kicker) เป็นสารที่ทำหน้าที่กระตุ้นปฏิกิริยาของสารให้ฟอง โดยช่วยลดช่วงอุณหภูมิการทำงานของสารให้ฟอง และทำให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟอง คิกเกอร์มีหลายชนิด การเลือกใช้คิกเกอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นมีความสำคัญมาก ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการเลือก ได้แก่ ชนิดของสารให้ฟอง สภาพะของการใช้งาน ความสามารถในการผสมเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์หรือความเข้ากันได้

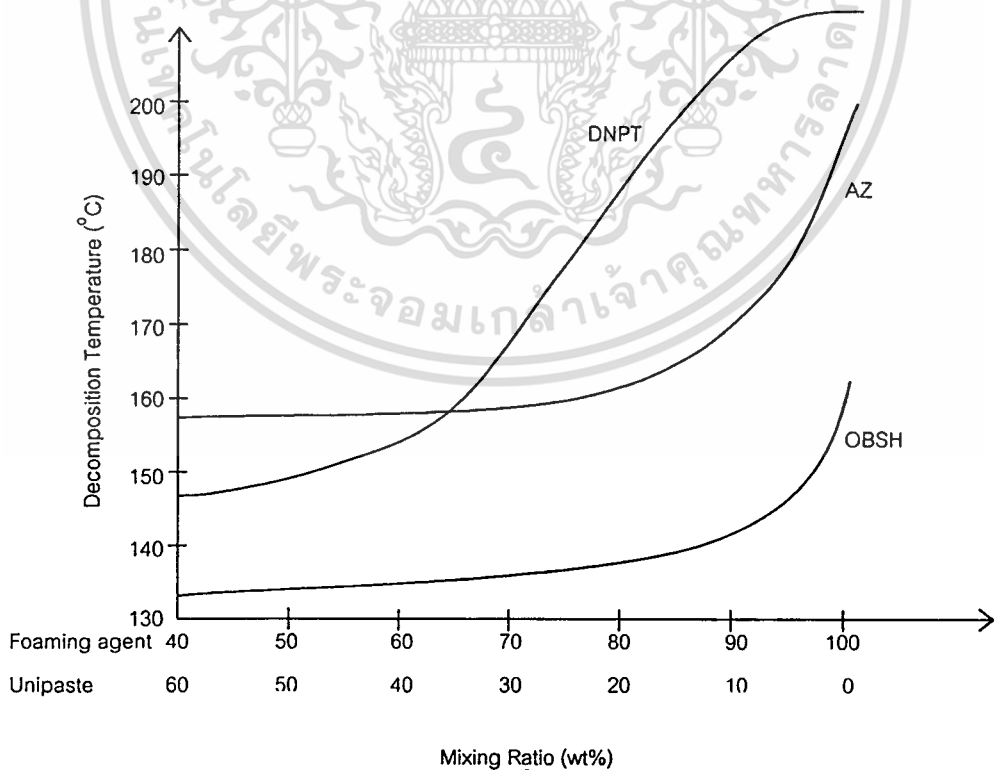
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นปฏิกิริยาที่ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองได้ง่ายขึ้น เป็นผลให้สามารถใช้งานสารให้ฟองได้ในช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้าง และสามารถใช้งานได้กับสารให้ฟองหลายชนิด

คิกเกอร์ที่ใช้งานกับสารให้ฟองชนิด DNPT มีหลายชนิด ได้แก่

- สารที่เป็นกรด เช่น กรดซาลิไซลิก และกรดพทาλικ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีกลิ่นและกรด ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลง
- สารที่เป็นด่าง เช่น ยูเรีย และสารผสมที่มียูเรีย ซึ่งทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น
- สารที่เป็นกลาง เช่น ไดเอทิลีนไกลคอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล การใช้สารที่เป็นกลาง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีกลิ่น และยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น

ยูเรียเป็นคิกเกอร์ที่นิยมใช้กับสารให้ฟอง DNPT เนื่องจากทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของ DNPT เหมาะสมกับกระบวนการผลิต ช่วยกระตุ้นอัตราการเชื่อมโยง (มีสมบัติเป็นด่าง) ทำให้ลดปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง (Accelerator) นอกจากนี้ยังทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีชาวกว่าการใช้สารให้ฟองเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณทิกทาเนียมไดออกไซด์ (สารที่ให้สีชาว) ที่ใช้ในยาง นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาเรื่องกลิ่นที่เกิดจากการใช้ DNPT ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของยูเรียต่อสารให้ฟอง AZ, DNPT และ p,p'-Oxybis(benzenesulfonyl hydrazide) (OBSh) แสดงดังรูปที่ 2.4 [8]



รูปที่ 2.4 ผลการกระตุ้นปฏิกิริยาของ Unipaste[®] (ยูเรีย) ต่อสารให้ฟอง AZ, DNPT และ OBSh [8]

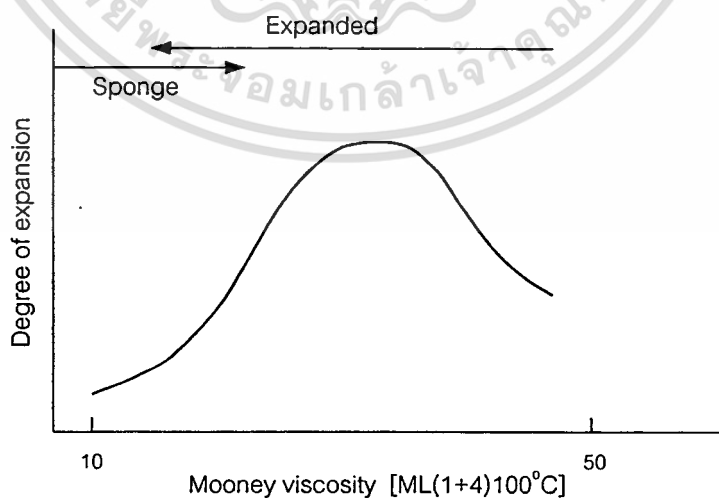
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน (Cellular Rubber) [9]

ผลิตภัณฑ์ยางที่มีโครงสร้างเซลล์เป็นรูพรุน แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ

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

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



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับระดับการขยายตัวของก๊าซ [9]

สิ่งสำคัญในการผลิต Sponge rubber และ Expanded rubber คือ ชนิดของสารให้ฟอง โดย Sponge rubber จะใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารที่ให้ไนโตรเจน ส่วน Expanded rubber จะใช้สารที่ให้ไนโตรเจนเท่านั้น อุณหภูมิการสลายตัวของสารให้ฟองและ อุณหภูมิการเชื่อมโยงจะต้องสมดุลกัน นอกจากนี้สภาวะการผสมก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ ความหนืดของพอลิเมอร์ ปริมาณสารทำให้นิ่ม ปริมาณสารตัวเติม ระบบการเชื่อมโยง และชนิดสารให้ฟอง

2.4 ผงยางรถยนต์ (Ground Rubber Tire, GRT) [3]

ผงยางเป็นวัตถุดิบส่วนหนึ่งที่ได้ระหว่างกระบวนการผลิตยางรีเคลม (Reclaimed rubber) โดยผงยางที่ทำการผลิตส่วนใหญ่จะได้จากยางรถยนต์ที่เสื่อมสภาพ และมีบางส่วนที่เป็นของเสีย ในกระบวนการผลิตนั้น สามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ

2.4.1 การบดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Grinding)

เทคนิคนี้ทำโดยทำให้ยางมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) โดยแช่ยางที่เชื่อมโยงแล้วในไนโตรเจนเหลว จากนั้นบดให้ละเอียด ด้วยเครื่องบดแบบลูกกลมโลหะ (Ball mill) จะได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 30-100 เมช (Mesh) ขนาดอนุภาคผงยางที่ได้ขึ้นกับเวลาที่แช่ในไนโตรเจนเหลวและขนาดของตะแกรกร่อน (Screen) ที่อยู่ในเครื่องบด โดยทั่วไปราคาของผงยางจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง มีรายงานว่ามีการใช้ผงยางประมาณ 5-10 phr ในยางล้อรถโดยสารและรถบรรทุก

การแปรรูปและการผสมผงยาง

ผงยางชนิดนี้เหมาะสมกับการใช้งานชนิดพิเศษ ซึ่งสามารถแปรรูปได้หลายลักษณะดังนี้

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

- การรีดแผ่น (Calendering) การใช้ผงยางขนาด 80-100 เมช จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขนาด 0.06 นิ้วหรือน้อยกว่า มีผิวเรียบสูงสุด ถ้าไม่ต้องการความเรียบของผิวสามารถใช้ขนาด 30 - 60 เมช ปริมาณสูงสุดที่ใช้ประมาณ 10 %

- การอัดขึ้นรูป (Molding) สามารถใช้ผงยางได้ทุกขนาด เนื่องจากช่วยในการไล่อากาศที่ขังในยางขณะขึ้นรูป

- การไหลขณะขึ้นรูป (Mold flow) โดยทั่วไปผงยางจะช่วยปรับปรุงการไหลขณะอัดขึ้นรูป เกิดการหดตัว (Shrinkage) น้อย การหดตัวลดลงเมื่อปริมาณผงยางเพิ่มขึ้น

เครื่องมือในการผลิตผงยางชนิดนี้มีราคาถูก ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้น และมีพฤติกรรมกาไหลดีกว่าผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) สันฐานวิทยาพื้นผิวของผงยาง ทำให้สามารถกำจัดอากาศที่ซึ่งอยู่ในยางที่ยังไม่เกิดการเชื่อมโยงออกไปได้ง่าย โดยเฉพาะยางล้อรถ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงของการพองหลังจากเกิดการเชื่อมโยง และผงยางจะถูกออกซิเดชันที่ผิวน้อยลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวน้อย ซึ่งแตกต่างจากผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้องที่มีพื้นที่ผิวสูง (10-30 เมช)

2.4.2 การบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient Grinding)

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. การบดที่อุณหภูมิห้องแบบแห้ง (Dry ambient grinding) การผลิตจะทำโดยนำยางที่เกิดการเชื่อมโยงแล้ว บดด้วยเครื่องบดฟันปลา (Serrated grinder) ได้ผงยางที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ประมาณ 10-30 เมช และเกิดกึ่ง (Pendant) ขึ้นที่ผิวจำนวนหนึ่ง ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกับยางดิบได้ดี ส่วนใหญ่ใช้ในยางล้อและผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม โดยทั่วไปจะใช้ประมาณ 5-20 phr เมื่อขนาดอนุภาคผงยางเพิ่มขึ้น ความเรียบของผิวผลิตภัณฑ์จะลดลง ถึงแม้จะมีชื่อตามวิธีการผลิตว่า "การบดที่อุณหภูมิห้อง" แต่ในทางปฏิบัติจะให้ความร้อนในระหว่างการผลิต การให้ความร้อนสูงจะทำให้สายโซ่โมเลกุลยางเกิดการสลายตัว

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

2.5 เครื่องอัดรีดสำหรับยาง (Rubber Extruder) [10-12]

เครื่องอัดรีดสำหรับยางเป็นเครื่องมือที่หลักยางหรือต้นยาง ให้ผ่านช่องแคบแม่แบบ (Die) เพื่อให้ได้ยางที่มีรูปร่างตาม Die ซึ่งเครื่องอัดรีดสำหรับยางจะเป็นแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเท่านั้น และมักจะออกแบบให้ยาวกว่าเครื่องอัดรีดประเภทอื่น

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดรีด คือ

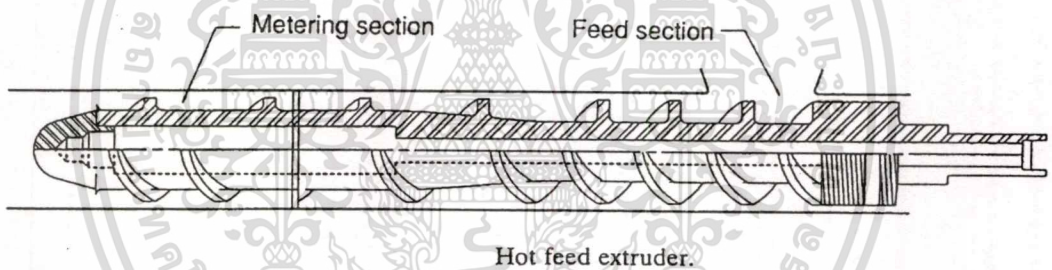
1. กระบอกใส่เกลียวหนอน (Barrel) ทำหน้าที่อุ่นยางให้มีอุณหภูมิตามต้องการโดยมีการหล่อ น้ำ ไขมัน หรือของเหลวอื่น เพื่อทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิตามต้องการได้ การป้อนยางเข้าไปในกระบอกจะต้องสม่ำเสมอ เพื่อให้ยางถูกอัดรีดออกมาได้สม่ำเสมอ ขนาดของยางหรือความกว้างของแถบยางเป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดการป้อนยาง การเพิ่มขนาดของยางเข้ามากเกินไปเมื่อถึงจุดๆหนึ่งเครื่องจะเกิดการอุดตัน (Choke) ตรงส่วนเข้าได้ ทำให้การส่งยางเข้าเกลียวหนอนขาดตอน ทำให้ได้ผลผลิตไม่สม่ำเสมอ

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

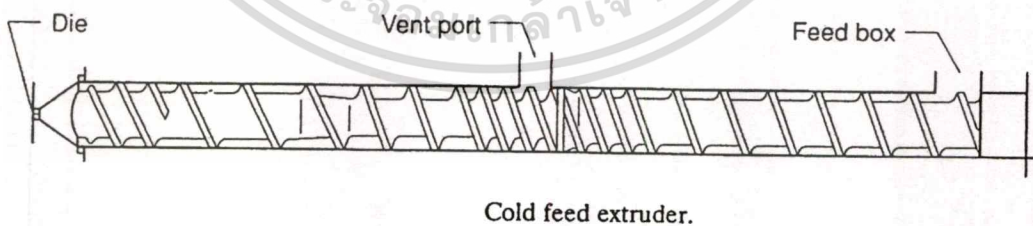
- Hot feed extruder เป็นเครื่องอัดรีดแบบป้อนยางในขณะร้อน (ใช้ยางที่ออกจากเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งในขณะร้อน) มี L:D เท่ากับ 4:1 - 6:1 แสดงดังรูปที่ 2.6

- Cold feed extruder เป็นเครื่องอัดรีดแบบป้อนยางในขณะเย็น มี L:D เท่ากับ 10:1 - 15:1 ใช้สำหรับการป้อนยางเย็น ซึ่งต้นทุนค่าใช้จ่ายของเครื่องมือถูกกว่า การควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้นดีกว่า และค่าแรงงานลดลง เมื่อเทียบกับ Hot feed extruder แสดงดังรูปที่ 2.7

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



รูปที่ 2.6 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางร้อน (Hot feed extruder) [12]



รูปที่ 2.7 เครื่องอัดรีดแบบป้อนยางเย็น (Cold feed extruder) [12]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลดอัตราความเร็วในการอัดรีด
- เพิ่มอุณหภูมิของยาง
- เพิ่มความยาวของ Die
- เพิ่มความเร็วในการดึงยางออกจากเครื่องอัดรีด

ในการผลิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอัดรีด จะต้องมีการเผื่อขนาดของ Die ให้เล็กกว่าผลิตภัณฑ์ รวมทั้งอาจต้องเปลี่ยนรูปทรงของ Die เพื่อชดเชยปรากฏการณ์ Die swell

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชลดดา เลวิทซ์ และ สาโรช ช่างชุม [13] ศึกษาชนิดและปริมาณสารให้ฟอง และคิกเกอร์ (Kicker) ในยาง พบว่าสารให้ฟอง Azodicarbonamide (AZ) มีอุณหภูมิการสลายตัวสูง คือ ประมาณ 190 - 240 °C ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงได้โดยการใช้ AZ ร่วมกับสารให้ฟองชนิดอื่นที่มีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า และการใช้คิกเกอร์ การใช้ AZ ร่วมกับสารให้ฟอง Dinitrosopentamethylenetetramine (DNPT) และ p,p'-Oxybis(benzenesulfohydrazide) (OBSH) จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงมาอยู่ที่ 150 - 180 °C และ 120 - 135 °C ตามลำดับ โดยที่ปริมาณก๊าซลดลงเล็กน้อย ส่วนการใช้คิกเกอร์ จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเหลือ ประมาณ 130 - 145 °C แต่ปริมาณก๊าซลดลงอย่างชัดเจน เมื่อศึกษาการขยายตัวของยางโดยใช้เครื่อง Dynamic mechanical analyzer พบว่าการขยายตัวของยางนอกจากจะขึ้นกับปริมาณก๊าซที่ได้จากสารให้ฟอง ยังขึ้นกับความหนืดและการเชื่อมโยงของยาง

A. Dutta และ M. Cakmak [14] ศึกษาการผลิตโฟมที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) และเอทิลีนพรอพิลีนไดอีนเทอร์พอลิเมอร์ (Ethylene - propylene - diene terpolymer, EPDM) โดยใช้สารให้ฟองและขึ้นรูปโดยวิธีการอัดรีดแบบไดนามิกส์วัลคาไนซ์ แต่ละคอมโพสิตจะมีความหนาแน่นจำกัด (Limiting density) ซึ่งควบคุมการขยายปริมาตรสูงสุด ความหนาแน่นจำกัดถูกควบคุมโดยคอมโพสิตเพียงอย่างเดียว และไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารให้ฟอง สภาวะการอัดรีดและรูปร่างแม่แบบ คอมโพสิตที่นุ่มที่สุดและแข็งที่สุด มีการขยายปริมาตรสูงสุดประมาณ 20 และ 100 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความแตกต่างของโครงสร้างเซลล์ใน แต่ละคอมโพสิต พบว่าเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นฟองจะเปลี่ยนรูปร่างจากวงกลมเป็นรูปร่างที่ยืดยาว ตามทิศทางการอัดรีด รูปร่างไม่สม่ำเสมอสูง มีขนาดเพิ่มขึ้นและพอลิเมอร์ที่ได้จากการอัดรีดหรือเอ็กสทรูเดท (Extrudate) มีลักษณะผิวขรุขระมากขึ้น เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวลดลงตามแนวแกน ซึ่งเกิดจากการคลายการจัดเรียงตัวของวัฏภาคยาง

Q. Huang และคณะ [15] ศึกษาการผลิตโฟมที่มีรูพรุนขนาดเล็กหรือไมโครเซลลูลาร์ (Micro cellular foam) ที่เตรียมจากพอลิซัลโฟน (Polysulfone, PSU) โดยใช้สารให้ฟอง 2 ชนิด คือ เอโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) และ 5-ฟีนิลเตตระโซล (5-Phenyltetrazol, 5-PT) ผ่านกระบวนการอัดรีด พบว่าการใช้ AZ และ 5-PT ปริมาณ 1% ทำให้มีความหนาแน่นเซลล์สูงสุดที่ปริมาณมากกว่า 1 % ไม่ได้ทำให้ความหนาแน่นเซลล์เพิ่มขึ้นและ AZ ให้โครงสร้างเซลล์ที่ละเอียดกว่า 5-PT เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วสกรูต่อสัดส่วนวิทยาของเซลล์ พบว่ากระบวนการอัดรีดควรใช้อุณหภูมิบาร์เรล (Barrel) สูงกว่าอุณหภูมิหัวแม่แบบ (Die) โดยความหนาแน่นเซลล์จะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิหัวแม่แบบ และการใช้ AZ เป็นสารให้ฟองใน PSU พบว่าความเร็วสกรู 10-20 รอบต่อนาที ให้โครงสร้างเซลล์ที่ละเอียดกว่าการใช้ความเร็วสกรูมากกว่า 20 รอบต่อนาที

ดาริน นิลทรงกลด [16] ศึกษาการเตรียมยางไมโครเซลลูลาร์จากยางธรรมชาติ เพื่อให้ได้ยางฟองที่มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM D 1056, Type 2 ; Class A โดยใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางสไตรีนบิวทาไดอีน สารให้ฟองที่ศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่ Unifoam AZ-H40 (Azodicarbonamide) Open cell[®]-100 และ Super cell[®]-D80 (Dinitroso pentamethylene tetramine) และ Porofor[®] TSH PLV (Benzenesulfohydrazide) สำหรับสภาวะการผลิตที่ศึกษา ได้แก่ สูตรยาง อุณหภูมิ เวลา ปริมาณยางที่ใส่ในแม่แบบ วิธีการเชื่อมโยง และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน พบว่าสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับการผลิตยางฟองคือ การเชื่อมโยงโดยใช้เครื่องอัดแบบขั้นตอนเดียว ที่อุณหภูมิ 150 °C และใช้ปริมาณยาง 3:4 ของแม่แบบ ส่วนสูตรที่เหมาะสมในการผลิตคือสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน 100:0 โดยใช้สารให้ฟอง Unifoam[®] AZ-H40 Open cell[®]-100 และ Super cell[®]-D80 และสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน 90:10 โดยใช้สารให้ฟอง Super cell[®]-D80

P. Rajalingam และคณะ [17] ศึกษาสมบัติของคอมโพสิตของผงยางกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้น (LLDPE) ใช้สารเอทิลีนไกลซิไดลเมทาอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene-glycidyl methacrylate copolymer) เป็นสารคู่ควบ (Coupling agent) โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดอนุภาค วิธีการบดและความเข้มข้นของออกซิเจนที่พื้นผิว พบว่าเมื่อผงยางมีขนาดเล็กลง ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและทำให้การแปรรูปโดยวิธีหลอมเหลวดีขึ้น ผงยางที่บดที่อุณหภูมิห้องแบบเปียก (Wet-ambient) จะทำให้คอมโพสิตถูกออกซิไดซ์ที่พื้นผิว และทนทานต่อการกระแทกได้มากกว่าผงยางที่บดที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic)

และบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient) จากการปรับปรุงพื้นผิวของยางโดยวิธีต่างๆ เพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างภูมิภาคและความทนทานต่อการกระแทก พบว่าการใช้ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron beam) ทำให้คอมพอสิตมีความทนทานต่อการกระแทกเพิ่มขึ้นสูงกว่าการใช้โคโรนา (Corona) และพลาสมา (Plasma)

G. Balogh และ G. Samay [18] ศึกษาการนำยางล้อรถที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เป็นส่วนผสมในการทำยางด้านข้าง (Sidewall) และหน้ายาง (Tread) ของล้อรถบรรทุก ชนิดของยางที่ศึกษาคือ IR:SBR และ BR:SBR ส่วนยางล้อรถที่ใช้แล้วที่นำมาศึกษามี 3 ชนิดคือ ผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ยางรีเคลมที่เตรียมโดยวิธีการคัดแยก (Classical method) และผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยง ปริมาณผงยางที่ทำการศึกษาคือ 0, 10 และ 20% พบว่ายางรีเคลมจะให้สมบัติเชิงกลที่สูงกว่าผงยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 มิลลิเมตรและผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณที่ใช้พบว่าผงยางทุกชนิดทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าการไม่ใส่ผงยาง โดยที่การใช้ยางรีเคลมปริมาณน้อยจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ ส่วนการใช้ผงยางที่ผ่านกระบวนการตัดการเชื่อมโยงในปริมาณมาก จะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ปริมาณน้อย

M. Tipanna และ D.D. Kale [19] ศึกษาสมบัติของคอมพอสิตของพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC) และผงยางไนไตรล์ (Waste ground nitrile rubber particle, GNRP) ซึ่งผสมโดยวิธีหลอมเหลว (Melt blending) โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง PVC:GNRP ต่อสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณ GNRP เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงบิดสมดุล (Equilibrium torque) ความแข็งแรงดึงและความแข็งกดลดลง แต่ทำให้สมบัติบางประการเพิ่มขึ้น ได้แก่ เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด ความทนทานต่อแรงกระแทกและความทนทานต่อการหักงอ โดยที่ปริมาณผงยางมากกว่า 40 % ความทนทานต่อการหักงอมากกว่า 150,000 รอบ เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่าง PVC และอะครีโลไนไตรล์ใน GNRP

M.H. Han [20] ศึกษาสมบัติของผงยางรถยนต์กับยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) โดยศึกษาอุณหภูมิของการผสม ลักษณะผิว ลักษณะการเชื่อมโยงและสมบัติทางกายภาพ ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยการอัดแบบ พบว่าอุณหภูมิของการผสมยางกับผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้นน้อยกว่าการผสมยางกับสารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ การใส่ผงยางรถยนต์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมโยง เนื่องจากกำมะถัน (Sulfur) และสารเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Accelerator) กระจายไม่สม่ำเสมอทั่วภูมิภาคของยางกับผงยางรถยนต์ เมื่อขนาดและปริมาณของผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดิ่งลดลง ขณะที่ผิวของคอมโพสิตจะมีความหยาบเพิ่มขึ้น ทั้งก่อนและหลังการเชื่อมโยง เมื่อพิจารณาลักษณะการขาดของชั้นทดสอบโดยวิธีการดึง พบว่าจะเริ่มต้นขาดที่ภูมิภาคของผงยางรถยนต์ ขณะที่การขยายรอยแตกของการทดสอบการหักงอจะถูกขัดขวางโดยผงยางรถยนต์

J.K. Kim และ R.P. Burford [21] ศึกษาการนำผงยางผสมกับยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางไนไตรล์ (Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) พบว่าผงยางที่ผ่านการคลอรีนขึ้นด้วยกรดไตรคลอโรไอโซไซยานูริก (Trichloroisocyanuric acid) จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางไนไตรล์ แต่ทำให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติลดลง เนื่องจากการคลอรีนขึ้นผงยางทำให้ผงยางมีความเป็นขั้วซึ่งสามารถเข้ากันได้ดีกับยางไนไตรล์ที่มีความเป็นขั้ว นอกจากนี้ยังศึกษาสารช่วยผสม (Compatibilizer) อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนเรซิน (Aliphatic-hydrocarbon resins) พบว่าการใช้สารช่วยผสมในยางไนไตรล์ที่มีผงยาง 30 phr และซิลิกา 30 phr จะทำให้มีการยืด (Extensible) และความเหนียว (Tough) สูง แต่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติ

พลชิต บัวแก้ว และคณะ [22] ศึกษาการผลิตท่อน้ำหยดจากยางธรรมชาติและยางรีเคลมจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (ยางไนไตรล์/ยางคลอโรพรีน) ทำการผสมด้วยเครื่องบดผสมแบบปิด ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว และทำให้ยางคงรูปโดยใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มเนื้อ (Filler) ต่อสมบัติของท่อยาง พบว่าการใช้ซิลิกา (Silica) เป็นสารเพิ่มเนื้อ ทำให้ท่อมีความทนทานต่อการสึกหรอ (Abrasion resistance) ดี ที่ปริมาณซิลิกา 50 phr ท่อจะทรงตัวดี จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณยางรีเคลมต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ พบว่าปริมาณยางรีเคลมน้อยกว่า 60 phr น้ำไม่สามารถซึมผ่านท่อได้ เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำจะสูงขึ้น และเมื่อใช้ขนาดอนุภาคยางรีเคลมเล็กลง ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น

E. Kowalska และ Z. Wielgosz [23] ศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนและผงยาง โดยใส่สารให้ฟองและสารช่วยผสม ผ่านกระบวนการอัดรีดที่มีหัวแม่แบบชนิดพิเศษ (Specially designed head) พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของท่อลดลง ส่วนสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณสารให้ฟองเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและส่วนสมบัติเชิงกลจะลดลง จากการศึกษาการซึมผ่านของน้ำ พบว่าความดันน้ำเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมอัตราการซึมผ่านของน้ำ และอัตราการซึมผ่านของน้ำจะแปรผกผันกับความยาวท่อ เนื่องจากความดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำจะลดลงตามความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นจาก 35 % เป็น 40% อัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนที่ปริมาณพอลิเอทิลีน 45 % อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง แต่สูงกว่าที่ปริมาณพอลิเอทิลีน 35 % เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเอทิลีนกับผงยาง

ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง และอลงกรณ์ ศิลปชำนาญ [24] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง อัตราส่วนที่ใช้คือ GRT:LDPE:AZ เท่ากับ 60:40:3 ขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยการอัดแบบขึ้นรูป พบว่าการใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 30 เมช จะทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าพลังงานที่ทำให้แตกหักสูงขึ้น เมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP และสารช่วยผสม (PE-g-MA) จะทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น ความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง แต่อัตราการซึมผ่านของน้ำ ลดลง

คนัมพร สวัสดิ์ชุมพล และคณะ [25] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของน้ำซึมที่ทำจากผงยางรถยนต์ (GRT) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โดยใช้สารให้ฟองเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) ขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเทคนิคการอัดรีด พบว่าอัตราส่วน GRT:LLDPE:AZ เท่ากับ 70:30:7 จะทำให้สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วงที่ต้องการ เมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP และสารช่วยผสม PE-g-MA จะทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่อัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง ส่วนการเติมคิกเกอร์ จะทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง สำหรับอัตราส่วน GRT:LLDPE:AZ:PE-g-MA:DCP ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมและใช้งานเป็นอุปกรณ์ให้น้ำทางการเกษตรคือ 70:30:7:4:0.5 โดยให้อัตราการซึมผ่านของน้ำอยู่ในช่วง 0.32 - 0.45 ลิตรต่อชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร ที่ความดัน 6 – 12 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล [26] ศึกษาการผลิตและสมบัติของท่อน้ำซึมที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) และผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) โดยใช้สารเอโซไดคาร์โบนาไมด์ (Azodicarbonamide, AZ) เป็นสารให้ฟอง พบว่าสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ ใช้เวลาในการอัดแบบ 5 นาทีที่อุณหภูมิ 230 °C เมื่อเพิ่มปริมาณผงยาง GRT ในวัสดุพบว่า สมบัติเชิงกลของ GRT: HDPE มีแนวโน้มลดลง อัตราส่วน GRT:HDPE ที่เหมาะสมคือ 60:40 เมื่อเพิ่มปริมาณ AZ จะทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพลดลง เช่น ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งกด และความหนาแน่น แต่จะทำให้สมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางประการเพิ่มขึ้น เช่น เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและอัตราการซึมผ่านของน้ำ เมื่อใช้ขนาดอนุภาคผงยาง GRT เล็กลง พบว่าวัสดุมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นแต่มีการซึมผ่านของน้ำลดลง จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) เป็นผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเพิ่มขึ้น แต่มีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและปริมาณการซึมผ่านของน้ำลดลง จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า GRT และ HDPE สามารถผสมเข้ากันได้ดี มีลักษณะเป็นรูพรุนเนื่องจากฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง AZ และช่องว่างระหว่างอนุภาค GRT การซึมผ่านของแผ่นน้ำซึม GRT:HDPE:AZ อัตราส่วน 60:40:8 จะให้อัตราการซึมผ่านของน้ำ 24-25 ลิตร/ชั่วโมง/ตารางเมตร ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นท่อน้ำซึม

ฟ้าดุขฎี พงษ์พิมาย และภัทรพร อินทเกษ [27] ศึกษาสมบัติการไหลและสมบัติการซึมผ่านของวัสดุผสมผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (GRT:HDPE) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟอง ทำการศึกษา HDPE 2 ชนิด คือ HDPE บริสุทธิ์ และ HDPE เกรดใช้งานกลางแจ้ง ผสม GRT:HDPE เท่ากับ 60:40 พบว่าเมื่อเติมสารให้ฟอง AZ ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสลดลง ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารช่วยผสม PE-g-MA พบว่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เมื่อเติมสารเชื่อมโยง DCP ทำให้ความแข็งแรงดึง มอดุลัสและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาผลของความยาวท่อที่มีต่อสมบัติการซึมผ่านและความดันลดสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง พบว่าเมื่อเพิ่มความยาวท่อจาก 30-150 cm น้ำที่ซึมออกมาในแต่ละช่วงความยาวท่อ (30 cm) มีปริมาณใกล้เคียงกัน และความดันแต่ละช่วงเมื่อมีการเพิ่มความยาวท่อมีค่าใกล้เคียงกันหรือความดันลด (Pressure drop) มีค่าน้อยมาก โดยสูตร HDPE:GRT:AZ:PE-g-MA มีปริมาณน้ำที่ซึมออกมาสูงสุด ซึ่งให้อัตราการซึมของน้ำในช่วง 0.22-1.27 l/hr.cm² ที่ความดัน 0.2-0.6 บาร์

กัญญาณี แสงเกียรติยุทธ [28] ศึกษาหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์ (GRT) กับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยใช้เอโซไดคาร์โบนาไมด์ (AZ) เป็นสารให้ฟองไดออกซิลพทาเลต (DOP) เป็นพลาสติกไซเซอร์ และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นคิกเกอร์ พบว่าการเติมซิงค์ออกไซด์ไม่มีผลต่อการสลายตัวของสารให้ฟอง อัตราส่วนวัตถุดิบและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปท่อน้ำซึมคือ GRT:PVC:AZ:DOP เท่ากับ 60:40:14:40 ที่อุณหภูมิการอัดรีด 210 °C เป็นเวลา 4 นาที โดยท่อน้ำซึมที่ได้มีความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งกด ความหนาแน่น และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันน้ำ 5x10⁻³ MPa เท่ากับ 1.13 MPa, 21.85 %, 10.41 MPa, 76 (Shore A), 0.78 กรัม/ลบ.ซม. และ 8.95 ลิตร/ชั่วโมง/เมตร ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ท่อน้ำซีมที่ผลิตในเชิงการค้า

บริษัท Leaky Pipe Systems [29] ได้ผลิตและจำหน่ายท่อฟอกอากาศ (Aeration hose) และท่อน้ำซีมจากยาง (Porous rubber hose) โดยไม่ระบุชนิดวัสดุ ท่อฟอกอากาศจะใช้สำหรับฟอกอากาศและเพิ่มปริมาณออกซิเจนในบ่อเลี้ยงปลาและบ่อบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งรายละเอียดของท่อ แสดงดังตารางที่ 2.2 ส่วนท่อน้ำซีมจะใช้สำหรับการให้น้ำในด้านเกษตรกรรม สวนหย่อม คอกม้า ฯลฯ การทำงานของท่อจะใช้ความดันต่ำและปริมาณน้ำน้อย เนื่องจากเป็นการให้น้ำที่ละน้อย สามารถให้น้ำได้โดยไม่จำกัดพื้นที่ แต่ขึ้นกับความแรงของแหล่งน้ำที่ใช้ ชนิดของท่อ และลักษณะการติดตั้ง ซึ่งรายละเอียดของท่อที่ผลิต แสดงดังตารางที่ 2.3

บริษัท Micro-flo Industries [30] ได้ผลิตท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วยผงยางรถยนต์ 80% และพลาสติก (พอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์) 20% (ไม่ระบุชนิด) เป็นท่อที่ยืดหยุ่นดีและมีความลึกหรือต่ำ มีความแข็งแรงถึงประมาณ 4 MPa และความแข็งแรงแตก (Burst strength) ประมาณ 0.7 MPa เป็นท่อที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้งานบริเวณใต้ดินรอบๆ ฐานอาคารและบ้านเรือน โดยน้ำในท่อจะค่อยๆ ซีมผ่านท่อออกมาทีละน้อย เพื่อให้ดินมีความชุ่มชื้นตลอดเวลาโดยไม่เกิดการอุดตันของดิน ซึ่งเป็นการแก้ไขปัญหาการทรุดตัวของฐานอาคารและบ้านเรือน เนื่องจากดินบริเวณรอบๆ ฐานอาคารและบ้านเรือนแห้งและเกิดการหดตัว รายละเอียดท่อน้ำซีมของบริษัท Micro-flo Industries แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดท่อฟอกอากาศของบริษัท Leaky Pipe Systems [29]

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, ภายนอก (มิลลิเมตร)	ลักษณะการใช้งาน
LP20VHA	19, 25	เป็นท่อที่เล็กที่สุด ให้ฟอกอากาศที่ละเอียดโดยใช้ความดันต่ำ
LP20FFA	19, 25	ใช้ความดันสูงกว่า LP20VHA เล็กน้อยและให้ฟอกอากาศที่ละเอียดกว่า
LP32VHA	32, 40	มีขนาดใหญ่และเหนียวกว่า LP20VHA มีอัตราการให้อากาศสูง
LP45VHA	45, 52	ให้ปริมาณอากาศสูงมากโดยใช้ความดันต่ำ

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Leaky Pipe Systems [29]

ชนิด	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน,ภายนอก (มิลลิเมตร)	อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดัน 1 – 1.5 บาร์ (ลิตร/เมตร/ชั่วโมง)	ลักษณะการใช้งาน
LP12L	9, 14	0.75 – 1.0	ใช้งานบริเวณใต้ดิน รัดต้นไม้เตี้ยๆที่มีการคดเคี้ยว สนามหญ้า บริเวณที่เป็นเนิน นอกจากนี้ยังใช้ได้กับการเพาะปลูกในเรือนกระจก
LP12H	9, 14	2 – 3	ใช้ได้ทั้งบนดินและใต้ดิน โดยทั่วไปใช้กับสวนหย่อม สามารถใช้ได้ทั้งโครงการใหญ่และเล็ก เป็นท่อที่กำลังเป็นที่นิยมในขณะนี้
LP12UH	9, 14	4 – 6	ใช้สำหรับการให้น้ำบนดิน ได้แก่ การให้น้ำในกระถางหรือภาชนะ สวนยาง ชา และกาแฟ เป็นท่อที่มีความต้านทานต่อการห่อหุ้มของเกลือและอุณหภูมิสูง
LP16H	13, 19	2 - 3	เหมาะกับการให้น้ำที่ต้องการความสม่ำเสมอตลอดความยาวท่อ เนื่องจากเป็นท่อที่มีความยาวมาก(แพงกว่า LP12) ไม่สามารถโค้งงอได้และไม่เป็นที่นิยม

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดท่อน้ำซึมของบริษัท Micro-flo Industries [30]

ขนาดท่อ (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน,ภายนอก (มิลลิเมตร)	อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดัน 1.4 บาร์ (ลิตร/เมตร/ชั่วโมง)
6.5	6.5, 11.0	0.4
9.5	9.5, 14.0	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (RSS 2) ศูนย์วิจัยยางชะเชิงเทรา สถาบันวิจัยยาง

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ RSS 2 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ปริมาณสิ่งสกปรก (%)	0.039
ปริมาณเถ้า (%)	0.27
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.45
ปริมาณสิ่งระเหย (%)	0.76
ความอ่อนตัวเริ่มแรก	47.4
ดัชนีความอ่อนตัว	85.1
ความหนืด [ML1+4(100 °C)]	87.1

หมายเหตุ ข้อมูลจากการทดสอบ

2. ผงยางรถยนต์ (Ground rubber tire, GRT) ขนาด 10 และ 40 เมช ชนิดบดที่อุณหภูมิห้อง (Ambient grinding) บริษัทแสงไทยผลิตราย จำกัด
3. สารเชื่อมโยง กำมะถัน (Sulfur, S) เกรดการค้า
4. สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เกรดการค้า
 - N-Cyclohexylbenzothiazole-2- sulfenamide (CBS)
 - Tetramethylthiuram disulfide (TMTD)
5. สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เกรดการค้า
 - Zinc oxide (ZnO)
 - Stearic acid
6. สารตัวเติม เขม่าดำ (Carbon black, CB) ชนิด FEF (N550) เกรดการค้า
7. สารช่วยกระบวนการผลิต น้ำมันแนพทานิก (Naphthanic oil) เกรดการค้า
8. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เกรดการค้า
 - สารป้องกันออกซิเดชัน N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

diamine (6PPD)

- สารป้องกันไอโซน Petroleum wax

9. สารให้ฟอง N,N'-Dinitroso pentamethylene tetramine (DNPT,DPT) ชื่อการค้า Unicell-G[®] บริษัท Dongjin Chemical

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ DNPT ที่ใช้ในงานวิจัย

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

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

10. สารกระตุ้นสารให้ฟอง (Kicker) ชนิดยูเรีย (Urea) ชื่อการค้า Unipaste-N3[®] บริษัท Dongjin Chemical

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของยูเรียที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ	ค่าที่ได้
ชื่อทางการค้า	Unipaste-N3 [®]
สูตรเคมี	CO(NH ₂) ₂
ลักษณะ	ผงสีขาว
อุณหภูมิที่ละลายตัว (°C)	132-138
ปริมาณก๊าซ (ml/g, ที่ 25 °C)	120-130
ปริมาณความชื้น (%)	ไม่เกิน 0.3

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท Lab Technology Engineering
2. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single-screw extruder) บริษัท Extruder Farrel
3. ตู้อบความร้อน (Hot air oven) รุ่น F 400 บริษัท Binder
4. เครื่องอัดแบบขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น G15H-15-X บริษัท Wabash MPI
5. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั่น (Oscillating disc rheometer, ODR) บริษัท Tech Pro
6. เครื่องวัดความหนืดมูนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMR-201 บริษัท Bara
7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine)
 - รุ่น 1011 บริษัท Instron (สำหรับทดสอบความแข็งแรงดึง)
 - รุ่น LS 500 บริษัท Lloyd Instruments (สำหรับทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด)
8. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) รุ่น 716 บริษัท Shore Instrument & MFG.
9. เครื่องทดสอบความหนาแน่น รุ่น EW-120SG บริษัท Mirage Trading
10. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone test chamber) รุ่น 703 บริษัท Hampden
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น JSM-5800LV บริษัท JEOL
12. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น TGA 7 บริษัท Perkin Elmer
13. เครื่องทดสอบการซึมผ่านของน้ำ
14. เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้ความดันลม รุ่น SDAP-100-N บริษัท Dumbbell

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางแผ่นรมควันชั้น 2 ผงยางรถยนต์ และสารเติมแต่งต่างๆ ตามสูตรที่กำหนดด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิการผสมประมาณ 70 °C

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติการไหล ได้แก่ การวัดความหนืดมูนี่

ขั้นตอนที่ 3 ทำการขึ้นรูปยางผสมสูตรให้มีลักษณะเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ที่อุณหภูมิประมาณ 80 - 90 °C ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที

ขั้นตอนที่ 4 ทำการเชื่อมโยงท่ออย่างด้วยเครื่องอบความร้อน อุณหภูมิตามที่จะศึกษา

ขั้นตอนที่ 5 ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

การศึกษาสสมบัติเชิงกล

- ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (ก่อนและหลังการบ่มแรง)
- ความแข็งแรงฉีกขาด (ก่อนและหลังการบ่มแรง)
- ความแข็งแรงกดแบบดูโรมิเตอร์ (ก่อนและหลังการบ่มแรง)
- การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

การศึกษาสสมบัติทางกายภาพ

- ความหนาแน่น
- ความต้านทานต่อไอโซน

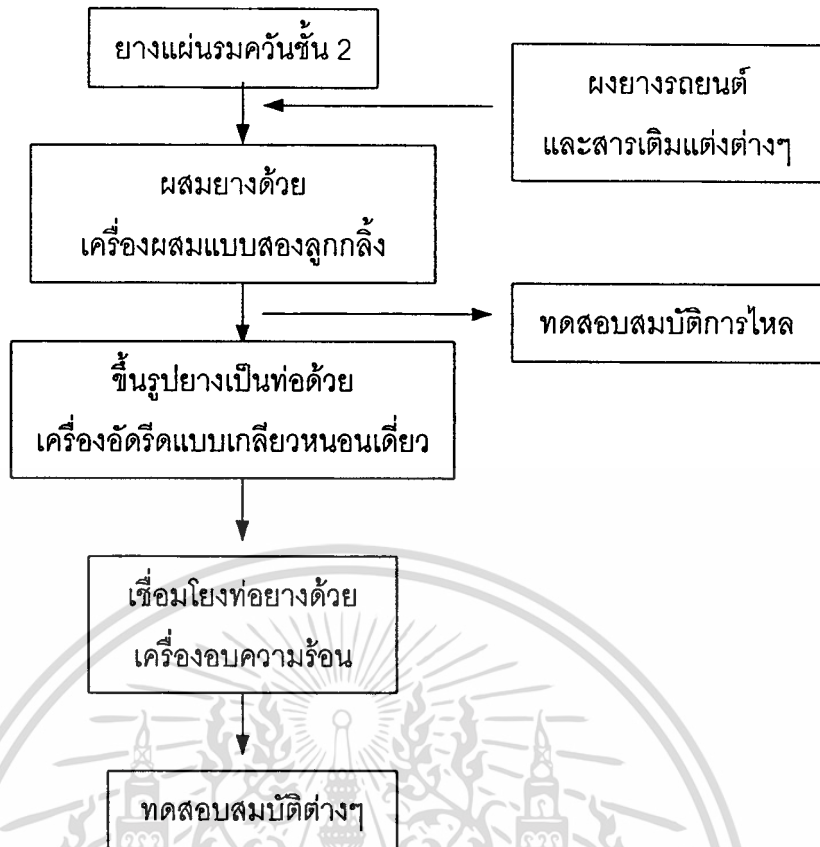
การศึกษาสสมบัติสัณฐานวิทยา

- ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของฟองอากาศ
- การรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางธรรมชาติกับผงยางรถยนต์

การศึกษาสสมบัติการซึมผ่านของน้ำ

- ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันต่างๆ คือ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 บาร์

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานสามารถสรุปเป็นแผนผังแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมชิ้นงาน

3.3.1.1 การบดผสมยาง

1. ชั่งยางและสารเคมีตามสูตรที่กำหนด
2. ทำการบดยางด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C จนยางพันลูกกลิ้งและมีผิวเรียบสม่ำเสมอ (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที)
3. เติม Stearic acid, ZnO และ Wax (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติม 6PPD, CBS และ TMTD (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที)
4. เติมเขม่าดำประมาณ 2 ใน 3 ของทั้งหมด บดผสมให้รวมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติมเขม่าดำที่เหลือพร้อมกับน้ำมันเนฟทานิก (ใช้เวลาประมาณ 5 นาที) จากนั้นเติมผงยางรถยนต์ครึ่งละประมาณ 1 ใน 4 ของทั้งหมด (ใช้เวลาประมาณ 5 นาที)
5. เติม DNPT และยูเรีย (ใช้เวลาประมาณ 2 นาที) จากนั้นเติมกำมะถัน (ใช้เวลาประมาณ 3 นาที) แล้วรีดยางให้เป็นแผ่น ทิ้งให้เย็นก่อนนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การขึ้นรูปเป็นท่อ

รายละเอียดของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอนเดี่ยวที่ใช้มีดังนี้

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

ปรับสภาวะต่างๆของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอนเดี่ยวดังนี้

- อุณหภูมิของสกรู (Screw) กระบอกใส่สกรู (Barrel) และอุณหภูมิของดาย (Die) 90 °C
- ปรับความเร็วของสกรูเท่ากับ 30 รอบต่อนาที

การขึ้นรูปเป็นท่อจะทำโดยนำยางผสมสูตรที่ตัดเป็นแถบกว้างประมาณ 2 นิ้ว ใส่เข้าไปในเครื่องอัดรีด ยางที่ออกจากดายจะมีลักษณะเป็นท่อ โดยมีแกนเหล็กยาวสำหรับสวมท่อที่ได้ เพื่อไม่ให้ท่อเสียรูปทรง

3.3.1.3 การเชื่อมโยงท่อยาง

ทำการเชื่อมโยงท่อยางด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงดังนี้

1. การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง
 - อุณหภูมิการเชื่อมโยง 150 °C และ 160 °C
 - เวลาการเชื่อมโยง 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที
2. การศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำ ปริมาณสารให้ฟอง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ และขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์
 - อุณหภูมิการเชื่อมโยง 160 °C
 - เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที

3.3.1.4 การทดสอบการเชื่อมโยงยาง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2084 [31]

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบยางผสมสูตรด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบจานสั้น (ODR) โดยจานโลหะจะหมุนแบบส่ายไปมาที่มุม 3 องศา ตามแนวระนาบ ใช้อุณหภูมิการทดสอบ 150 °C และ 160 °C หาค่าเวลาการเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.5 การทดสอบความหนืดมูนนี่

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1646 [32]

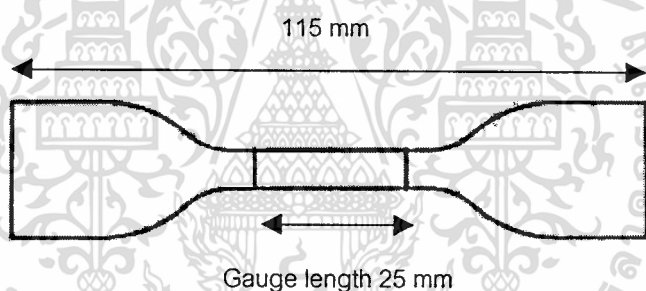
วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบอย่างผสมสูตรด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) โดยใช้จานหมุนขนาดใหญ่ (L) ที่อุณหภูมิ 100°C เวลาที่ใช้ในการทดสอบ 4 นาที [ML1+4 (100°C)]

3.3.1.6 การทดสอบแรงดึง

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 412 [33]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อนที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อน ให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็น Die C คือเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) ที่มีความยาวเกจ (Gauge length) 25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.2

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ Load cell ขนาด 500 N และอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด



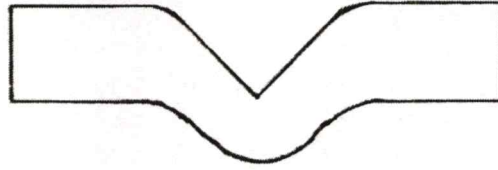
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 412

3.3.1.7 การทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 624 [34]

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อนที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อน ให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะเป็น Die C แสดงดังรูปที่ 3.3

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ Load cell ขนาด 500 N และอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที หาค่าความแข็งแรงฉีกขาด



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624

การคำนวณผล

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

เมื่อ T_s คือ ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)
 F คือ แรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงานจนขาด (kN)
 d คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

3.3.1.8 การทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240 [35]

วิธีการทดสอบ ทดสอบด้วยเครื่องคูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A (Shore A durometer) แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยนำชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงดึงจำนวน 3 ชิ้น (ความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร) วางซ้อนกันบนแท่นทดสอบ จากนั้นโยกคานข้างล่างให้ชิ้นงานทดสอบสัมผัสกับหัวกด (Indenter) เป็นเวลา 15 วินาที อ่านค่าที่ได้จากหน้าปัด



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ชนิดชอร์ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.9 การทดสอบความหนาแน่น

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อที่เชื่อมโยงแล้วตามความยาวท่อให้ได้ชิ้นงานทดสอบที่มีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความหนาแน่น (Electronic densimeter) โดยชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบในอากาศและในน้ำ เครื่องจะคำนวณค่าความหนาแน่นให้อัตโนมัติ โดยใช้หลักของการแทนที่น้ำ ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่น (Density)} = W / (W - W_1) \quad (3.2)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในอากาศ

W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ

ถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับการหาค่าโดยประมาณ จะได้ความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับความหนาแน่น

3.3.1.10 การทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 395-89 [36]

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

วิธีการทดสอบ วัดความหนาของชิ้นงานทดสอบ แล้วนำมาวางระหว่างแผ่นเหล็กทั้งสองของอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัด (Compression device) ที่มีแท่งเหล็กกั้น (Spacer bars) ในแต่ละข้างเป็นตัวกำหนดระยะในการอัดยาง แสดงดังรูปที่ 3.5 ทำการอัดชิ้นงานทดสอบให้มีความหนาเท่ากับแท่งเหล็กกั้น ซึ่งความหนาจะลดลงจากความหนาเดิม 25% จากนั้นนำอุปกรณ์สำหรับทดสอบการอัดที่มีชิ้นงานทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำชิ้นงานทดสอบมาวัดความหนา

การคำนวณผล

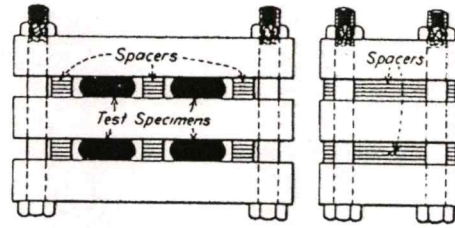
$$C_b = [(t_o - t_i) / (t_o - t_n)] \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ C_b คือ การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (%)

t_o คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

t_i คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบหลังอบ (มิลลิเมตร)

t_n คือ ความหนาของแท่งเหล็กกัน (มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

3.3.1.11 การทดสอบความต้านทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

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

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อน้ำซีเมนต์ที่เชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบ ยึดปลายทั้งสองของชิ้นงานทดสอบด้วยที่จับ จากนั้นทำการยึดชิ้นงานทดสอบ 20% แล้วนำไปไว้ในที่มีดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำเข้าตู้อบโอโซนที่มีความเข้มข้นของโอโซน 50 pphm อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นทำการตรวจวัดรอยแตกของชิ้นงานทดสอบด้วยแว่นขยายที่มีกำลังขยาย 10 เท่า การรายงานผลแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การรายงานผลของลักษณะรอยแตก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.12 การศึกษาสัณฐานวิทยา

การเตรียมชิ้นงานทดสอบ ทำการตัดท่อน้ำซึมนที่เชื่อมโยงแล้วให้มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก นำชิ้นงานทดสอบแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที จากนั้นหักชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic crack) เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานเรียบ ทำให้เห็นลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบได้ชัดเจน

วิธีการทดสอบ ทำการทดสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิว รูปร่างและขนาดของผงยางรถยนต์ และฟองอากาศ รวมทั้งการยึดเกาะกันระหว่างยางธรรมชาติกับผงยางรถยนต์

3.3.1.13 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ

วิธีการทดสอบ นำตัวอย่างที่มีความยาว 30 เซนติเมตร ทดสอบอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) ที่ความดันต่างๆ คือ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 บาร์ โดยใช้ทำการทดสอบเป็นเวลา 5 นาที รายงานผลในรูปของปริมาณการซึมผ่านของน้ำต่อเวลาต่อความยาวท่อ (l/h/m)

3.3.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของท่อน้ำซึม

3.3.2.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) และสารเติมแต่งอื่นๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงดังนี้

- อุณหภูมิการเชื่อมโยงแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ 150 °C และ 160 °C
- เวลาการเชื่อมโยงแบ่งเป็น 6 ช่วงคือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

3.3.2.2 ผลของปริมาณเคมีดำ

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) และเคมีดำที่ปริมาณต่างกัน คือ 10, 30, 50 และ 70 phr และสารเติมแต่งอื่นๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

3.3.2.3 ผลของปริมาณสารให้ฟอง

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) และสารให้ฟองที่ปริมาณต่างกันคือ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 % โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ และสารเติมแต่งอื่นๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกิ้งและขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

3.3.2.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับผงยางรถยนต์

ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) และอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกันคือ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 (อัตราส่วนโดยน้ำหนัก) และสารเติมแต่งอื่นๆ ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกิ้งและขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

3.3.2.5 ผลของขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์

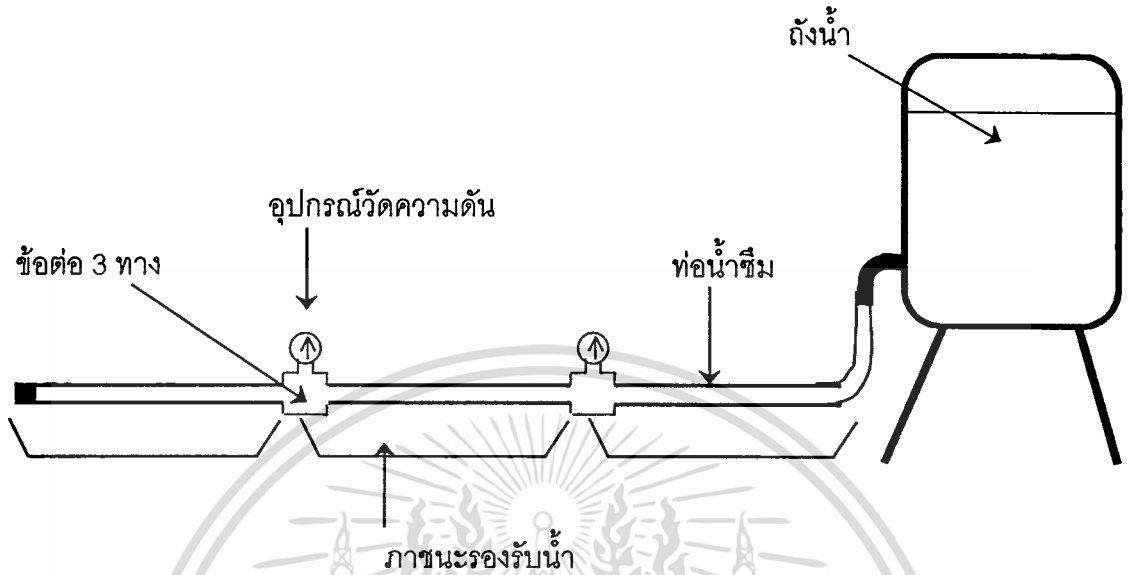
ขั้นตอนที่ 1 ทำการบดผสมยางผสมสูตรที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) และสารเติมแต่งอื่นๆ โดยใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน คือ 10 และ 40 เมช ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกิ้งและขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว จากนั้นทำการเชื่อมโยงท่อด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที

ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

3.3.2.6 ผลของความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆของท่อและผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

นำท่อยางที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:50) และNR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) ขนาดความยาวท่อ 30 เซนติเมตร สูตรละ 3 ท่อ มาต่อเข้าด้วยกันด้วยข้อต่อ 3 ทาง โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันเอาไว้ที่ข้อต่อแต่ละอัน แสดงดังรูปที่ 3.6 จากนั้นทำการวัดความดันน้ำและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อคือ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยความดันน้ำเริ่มต้นที่ใช้คือ 0.6, 0.8 และ 1.0 บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดสอบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำดื่ม

ตารางที่ 3.5 สูตรที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (phr)					
	ศึกษาอุณหภูมิ และเวลาการเชื่อมโยง	ศึกษาปริมาณเคมีดำ	ศึกษาปริมาณสารให้ฟอง	ศึกษาอัตราส่วนระหว่างยาง ธรรมชาติและผงยางรถยนต์	ศึกษาขนาดอนุภาค ของผงยางรถยนต์	
ยางแผ่นรมควันชั้น 2	100	100	100	100	100	
ผงยางรถยนต์ (ขนาด 40 เมช)	233	233	233	100, 150, 233, 400	150 (ขนาด 10, 40 เมช)	
เคมีดำ (N550)	30	10, 30, 50, 70	50	50	50	
DNPT	10.0	10.0	3.3, 6.7, 10.0, 13.3, 16.7	6.0, 7.5, 10.0, 15.0	7.5	
ยูเรีย	10.0	10.0	3.3, 6.7, 10.0, 13.3, 16.7	6.0, 7.5, 10.0, 15.0	7.5	
สูตรเคมีแต่งอื่นๆ : กรดสเตียริก 2, ซิงค์ออกไซด์ 5, ซีฟังก์โปรดิลีม 2, น้ำมันแนพททิก 3, 6PPD 1, CBS 1, TMTD 0.5, กำมะถัน 2.5						

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ (GRT) ในการศึกษาจะขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึม โดยอาศัยเทคนิคการอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (Single screw extrusion) จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของท่อน้ำซึม ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ อัตราการซึมผ่านของน้ำ และสัณฐานวิทยา ปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษาได้แก่

- อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง
- ปริมาณเขม่าดำ
- ปริมาณสารให้ฟอง
- อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์
- ขนาดของผงยางรถยนต์
- ความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อ
- ผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ
- การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

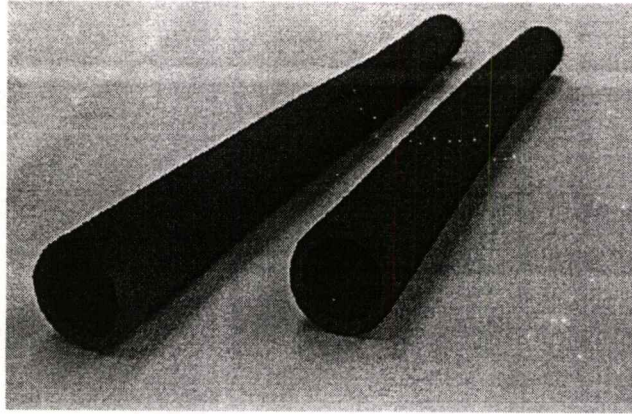
4.1 การศึกษาอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง

ในกระบวนการเชื่อมโยงยาง อุณหภูมิการเชื่อมโยงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ ซึ่งการเลือกอุณหภูมิการเชื่อมโยง จะต้องเลือกอุณหภูมิที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติทางกายภาพที่สม่ำเสมอโดยใช้เวลาในการเชื่อมโยงน้อยที่สุด [38] ในการเลือกอุณหภูมิการเชื่อมโยงสำหรับงานวิจัยนี้ จะเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมโยงยางและการสลายตัวเป็นก๊าซของสารให้ฟองไดโนโตรไซเพนเตเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) โดยทั่วไปอุณหภูมิการสลายตัว (Decomposition temperature, T_d) ของ DNPT ประมาณ $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการสลายตัวของ DNPT จากเครื่อง TGA (แสดงดังภาคผนวก ก รูปที่ ก.1) จะเห็นว่า DNPT จะเริ่มสลายตัวให้ฟองก๊าซที่อุณหภูมิประมาณ $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดอุณหภูมิสลายตัวของ DNPT ให้มีอุณหภูมิการสลายตัวใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเชื่อมโยงยางซึ่งสามารถทำได้โดยการใส่สารกระตุ้นหรือคิกเกอร์ (Kicker) ชนิดยูเรีย (Urea) ในอัตราส่วน DNPT:Urea เท่ากับ 1:1 ซึ่งผลการสลายตัวของ DNPT ที่มียูเรียเป็นคิกเกอร์ (แสดงดังภาคผนวก ก รูปที่ ก.2) จะเริ่มสลายตัวให้ฟองก๊าซที่อุณหภูมิประมาณ $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิซึ่งเหมาะสมกับการ

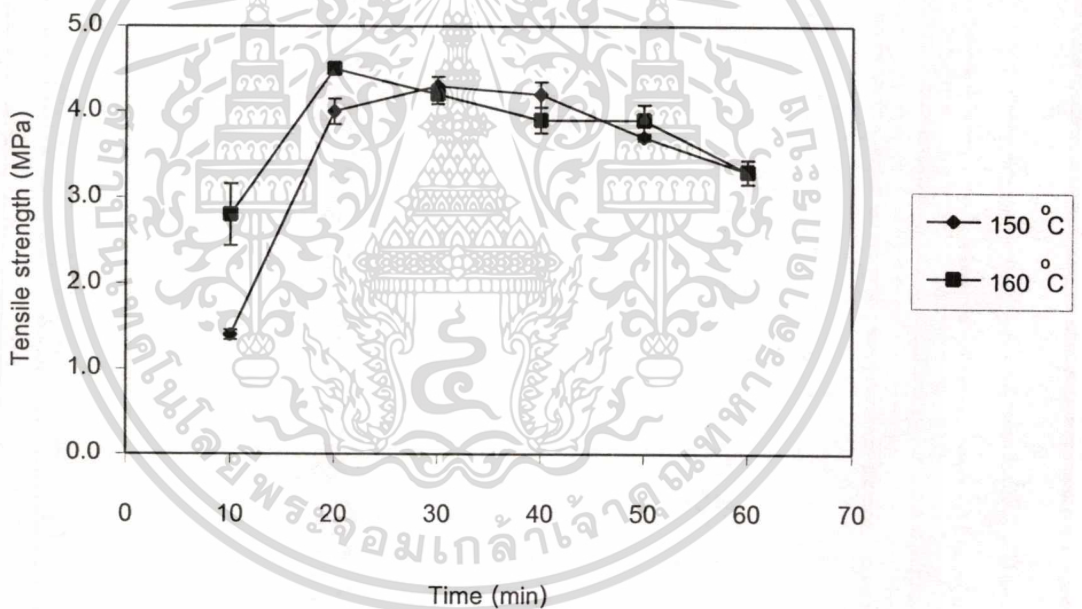
เชื่อมโยงยางและการสลายตัวให้ฟองก๊าซของ DNPT เป็น 2 อุณหภูมิคือ 150 °C และ 160 °C จากผลการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงโดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยง แสดงดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.1 พบว่าเวลาการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 150 °C ประมาณ 1.6 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับการประมาณเวลาการเชื่อมโยงของยางที่อุณหภูมิต่างๆ จากการใช้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการเชื่อมโยง (Temperature coefficient of vulcanization) [38] ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยง โดยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเกือบทั้งหมดจะมีค่าประมาณ 2 กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 °C (18 °F) เวลาการเชื่อมโยงจะลดลงเป็น 2 เท่า

การเชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นกับความเหมาะสมในการผลิตแต่ละผลิตภัณฑ์ สำหรับงานวิจัยนี้จะเชื่อมโยงท่อน้ำซึมโดยใช้ตู้อบความร้อน (Hot air oven) ซึ่งเป็นระบบการเชื่อมโยงที่มีการถ่ายเทความร้อนต่ำ จึงไม่สามารถเชื่อมโยงยางตามเวลาการเชื่อมโยงที่หาได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยงซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนสูง เวลาการเชื่อมโยงเร็วกว่า ดังนั้นจึงศึกษาเวลาการเชื่อมโยงเพื่อหาเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมเป็น 6 ช่วงคือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

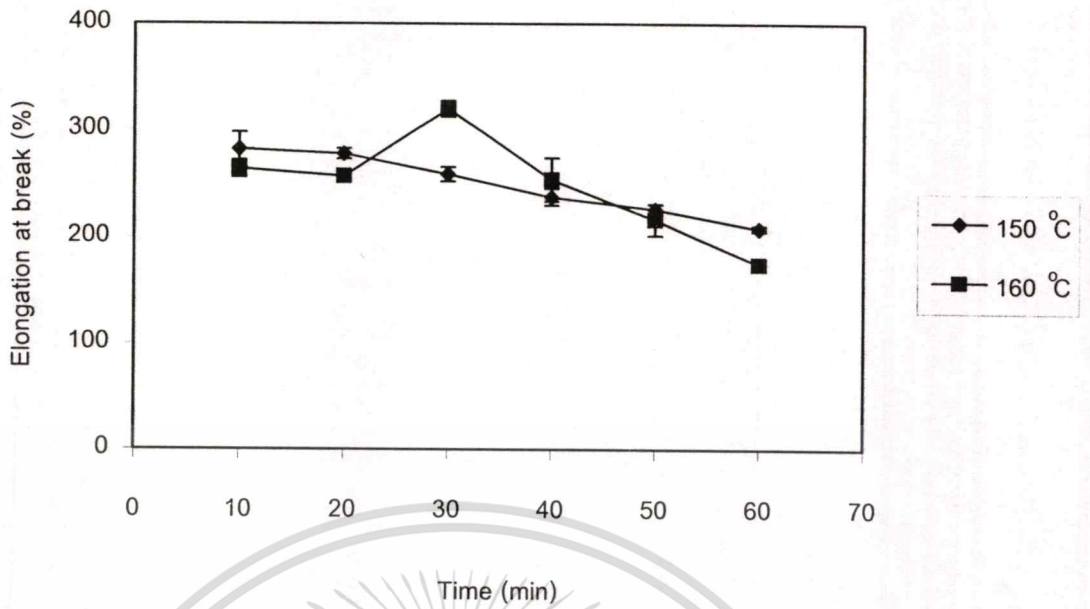
จากการศึกษาเมื่อนำยางผสมสูตรโดยมีองค์ประกอบของยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณ 30 ส่วนโดยน้ำหนัก ผสมกับผงยางรถยนต์ (GRT) ปริมาณ 70 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 3 ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ และปริมาณเขม่าดำ 30 phr ขึ้นรูปเป็นท่อน้ำซึมด้วยเทคนิคการอัดรีด เป็นท่อที่มีรูปทรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4.1 แล้วทำการเชื่อมโยงท่อที่เตรียมได้โดยการให้ความร้อนในเครื่องอบความร้อน โดยทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการเชื่อมโยงที่ 150 °C และ 160 °C และเวลาการเชื่อมโยงที่ 10 - 60 นาที ผลของอุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ อัตราการซึมผ่านของน้ำ และสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.6 และ 4.8 - 4.10



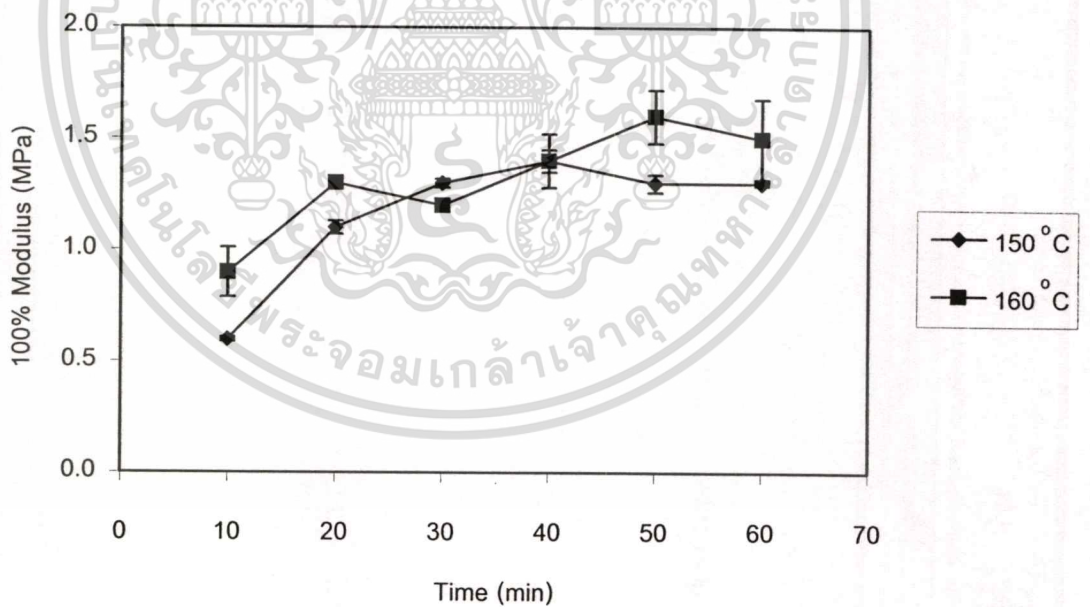
รูปที่ 4.1 ท่อน้ำซึมเตรียมจาก NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) ที่ผลิตได้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

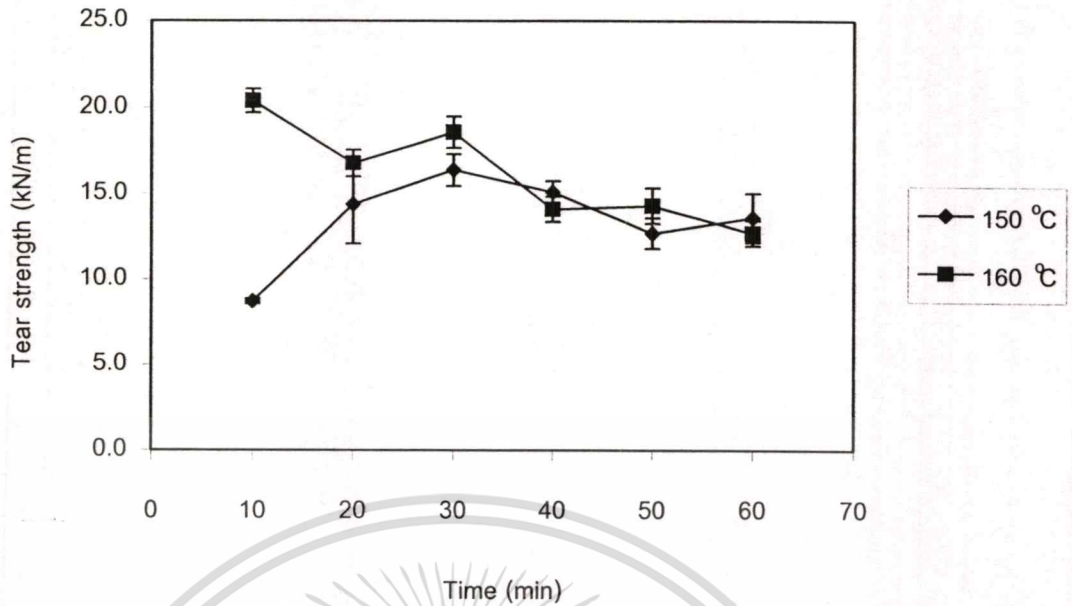


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

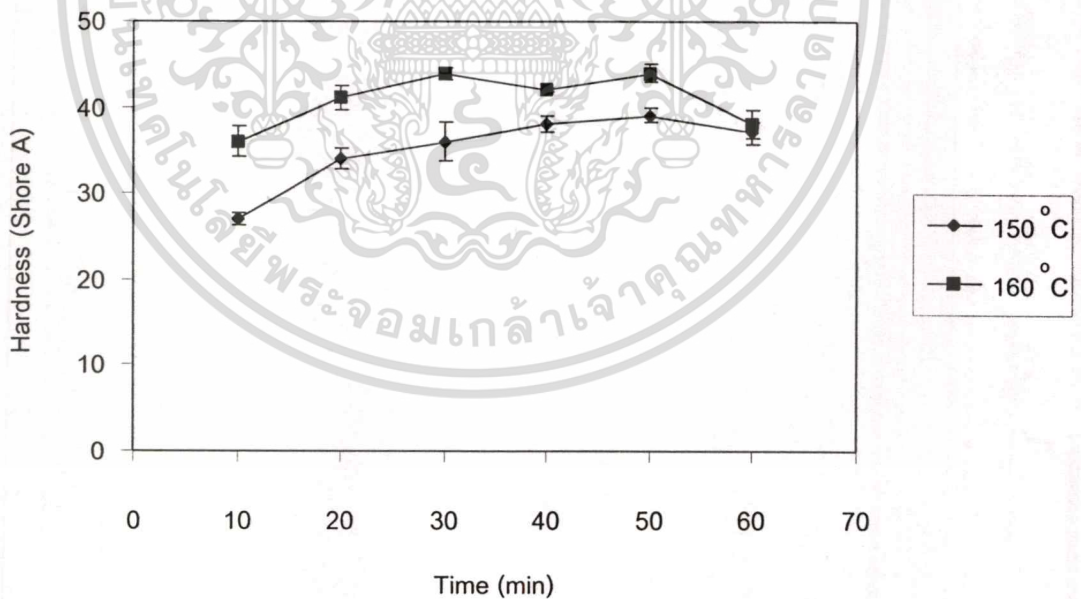


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



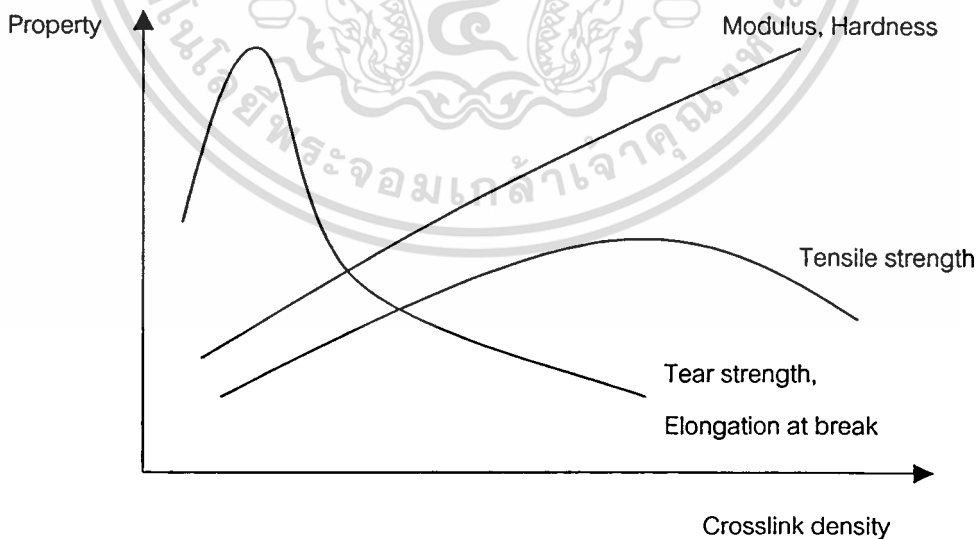
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 - 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C เป็นเวลา 10 - 60 นาที ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล จะเห็นว่าสมบัติเชิงกลของที่เชื่อมที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันคือ สมบัติเชิงกลบางประการที่เกิดการแตกหัก (Fracture properties) ได้แก่ ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ดึง จุดขาด และความแข็งแรงฉีกขาด แสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.3 และ 4.5 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง เมื่อเวลาการเชื่อมยาวนานขึ้น เนื่องจากที่ก่อนถึงจุดสูงสุด ยางยังเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างโมเลกุลยังเป็นสายโซ่ตรงยังไม่เป็นร่างแหสามมิติสมบูรณ์ เมื่อให้แรงกับชิ้นงาน สายโซ่โมเลกุลยังสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและหลุดออกจากกันได้โดยไม่เกิดการขาดกันของสายโซ่โมเลกุล แต่เมื่อใช้เวลาการเชื่อมยาวนานขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) เพิ่มขึ้น เกิดจุดเชื่อมโยงกลายเป็นสายโซ่กิ่ง (Branches) มากขึ้น ทำให้สายโซ่หลุดออกจากกันยากขึ้นเมื่อได้รับแรง เป็นผลให้ความแข็งแรงสูงขึ้น ที่จุดสูงสุดซึ่งเรียกว่า "จุดเกิดเจล" (Gel point) โครงสร้างโมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงกลายเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-D Network) สมบูรณ์ ที่หลังจุดสูงสุด สายโซ่เคลื่อนไหวย่างจำกัดเนื่องจากเกิดโครงสร้างร่างแหที่แน่น (Tight network) ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับ เป็นผลให้ความแข็งแรงต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยงของยาง (Crosslink density) กับสมบัติบางประการของยาง [4] แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเชื่อมโยง (Crosslink density) ของยาง กับสมบัติเชิงกลบางประการของยาง [4]

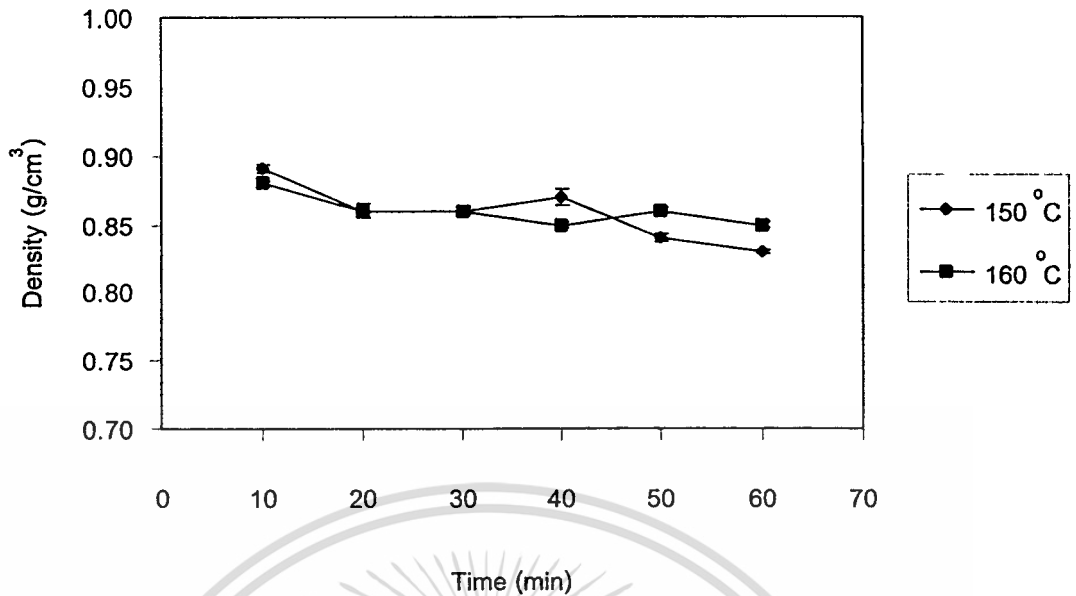
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซีเมนต์ที่เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C จะเห็นว่าการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดสูงกว่าการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C เล็กน้อย และเมื่อพิจารณาเวลาการเชื่อมโยงซึ่งวัดได้จากเวลาที่ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด พบว่าเวลาการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เร็วกว่าการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C ประมาณ 1.5 เท่า (เวลาการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เท่ากับ 20 นาที ส่วนเวลาการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C เท่ากับ 30 นาที) ซึ่งสอดคล้องกับผลของเวลาการเชื่อมโยงที่หาได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยงที่มีเวลาการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เร็วกว่าที่อุณหภูมิ 150 °C ประมาณ 1.6 เท่า เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อเวลาการเชื่อมโยงของยางผสมสูตรเช่นเดียวกับปฏิกิริยาเคมีอื่นๆ ซึ่งเป็นไปตามสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) [4] แสดงดังสมการที่ 4.1

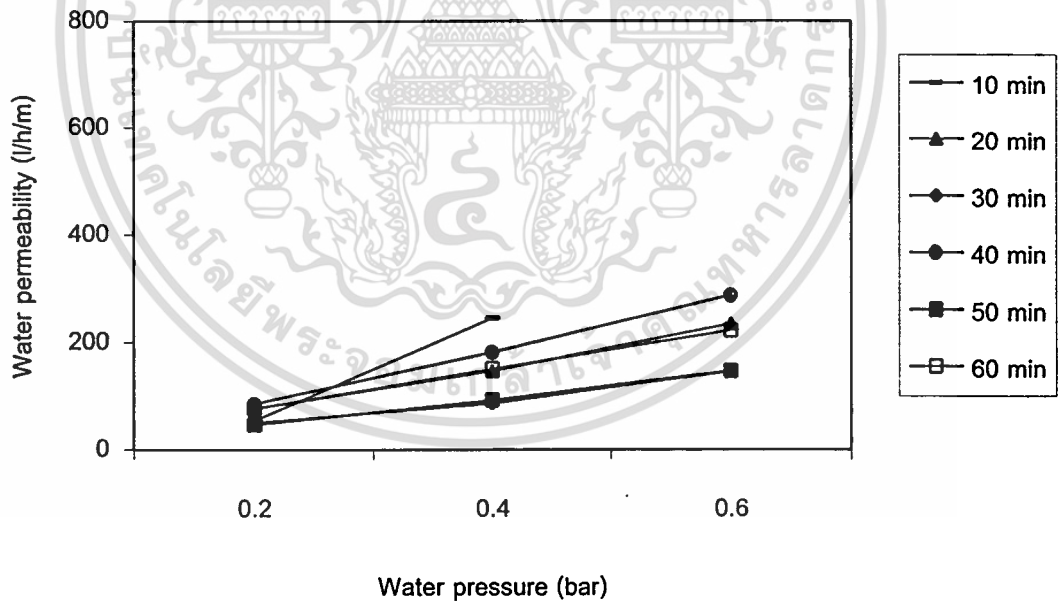
$$\log k = -E / 2.303 RT + C \quad (4.1)$$

เมื่อ	k	คือ	ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา (The reaction rate constant)
	E	คือ	พลังงานกระตุ้น (Activation energy)
	R	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซ (Gas constant)
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)
	C	คือ	ค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาหนึ่งๆ (Constant)

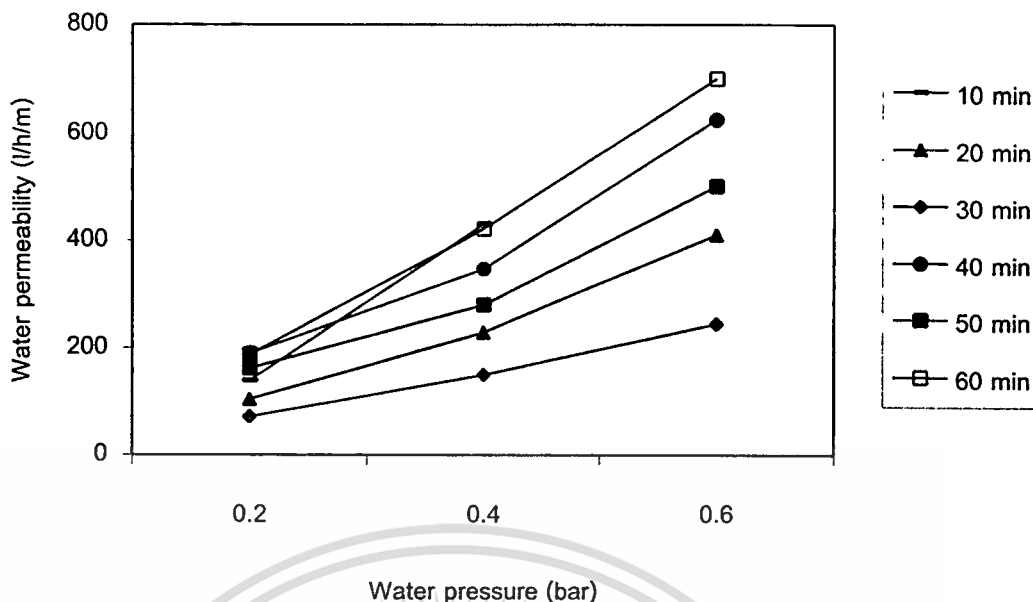
จากรูปที่ 4.4 และ 4.6 จะเห็นว่ามอดุลัสและความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการเชื่อมโยงนานขึ้น ทำให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงมากขึ้น โมเลกุลของยางเคลื่อนที่ ยากขึ้น เป็นผลให้ยางแข็งขึ้น ต้องใช้แรงมากขึ้นเพื่อทำให้ยางเปลี่ยนขนาดหรือเปลี่ยนรูป



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างกัน



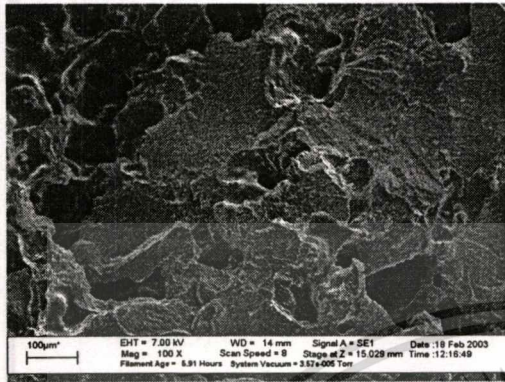
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 150 °C เมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน



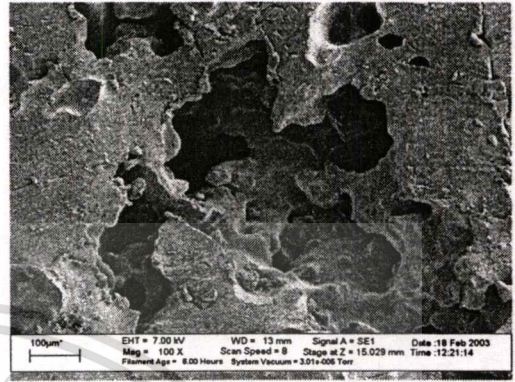
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 160 °C เมื่อใช้เวลากการเชื่อมโยงต่างกัน

ความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านของน้ำจะขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของรูพรุนภายในชิ้นงานโดยตรง กล่าวคือ ถ้าชิ้นงานมีจำนวนรูพรุนมากและมีรูพรุนขนาดใหญ่ อัตราการซึมผ่านของน้ำจะมาก แต่ถ้าชิ้นงานมีจำนวนรูพรุนน้อยและมีรูพรุนขนาดเล็ก อัตราการซึมผ่านของน้ำจะน้อย จากรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นที่อุณหภูมิการเชื่อมโยง 150 °C และ 160 °C ที่เวลากการเชื่อมโยงต่างกัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยความหนาแน่นจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลา 10 - 20 นาที จากนั้นความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากคาดว่า DNPT ที่ใช้ปริมาณ 3% โดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์จะเริ่มสลายตัวให้ฟองก๊าซจำนวนมากในช่วง 10 - 20 นาทีแรก จากนั้น DNPT ที่เหลืออยู่จำนวนเล็กน้อยจึงค่อยๆ เกิดการสลายตัวเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.9 - 4.10 เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของน้ำ พบว่าที่อุณหภูมิ 160 °C มีอัตราการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าที่อุณหภูมิ 150 °C ทั้งที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากลักษณะรูพรุนส่วนใหญ่เป็นเซลล์เปิด ซึ่งพิจารณาได้จากอัตราการซึมผ่านของน้ำ และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เวลากการเชื่อมโยงต่างกัน พบว่าทั้งสองอุณหภูมิมีอัตราการซึมผ่านของน้ำในลักษณะเดียวกันคือ ที่เวลากการเชื่อมโยง 10 นาที เมื่อความดันน้ำเพิ่มขึ้นในช่วง 0.2 - 0.4 บาร์ อัตราการซึมผ่านของน้ำจะสูงขึ้นมากกว่าที่เวลากการเชื่อมโยงอื่นๆ และเกิดการฉีกขาดที่ความดัน 0.6 บาร์ เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งแรงน้อยกว่าที่เวลากการเชื่อมโยงอื่นๆ ดังนั้นเมื่อได้รับความดันน้ำสูงขึ้น ผนังเซลล์จะเกิดการขยายตัวได้มาก ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมาก และเกิดการฉีกขาดเมื่อเพิ่มความดันน้ำสูงถึงความดันหนึ่ง

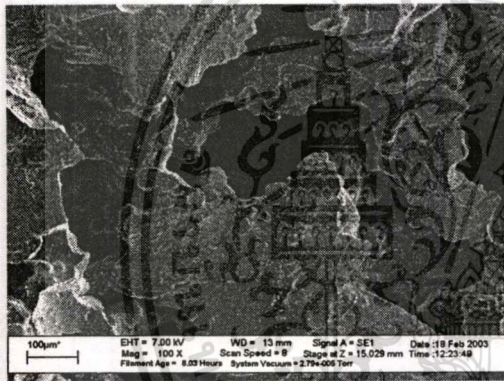
ส่วนที่เวลาการเชื่อมโยงมากกว่า 10 นาที เมื่อเวลาการเชื่อมโยงนานขึ้นจะทำให้ DNPT สลายตัวให้ฟองก๊าซมากขึ้น เป็นผลให้ชิ้นงานมีลักษณะรูพรุนส่วนใหญ่เป็นเซลล์เปิด อัตราการซึมผ่านของน้ำจึงมากขึ้น



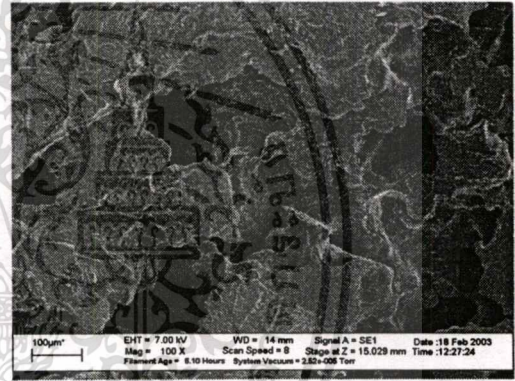
รูป ก



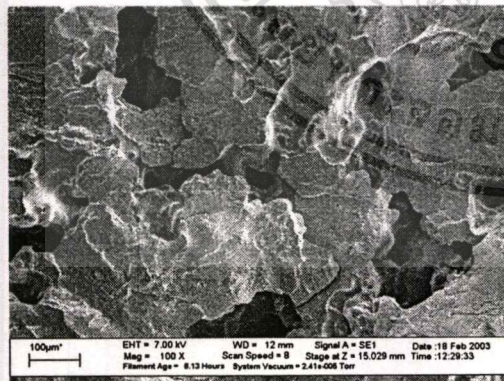
รูป ข



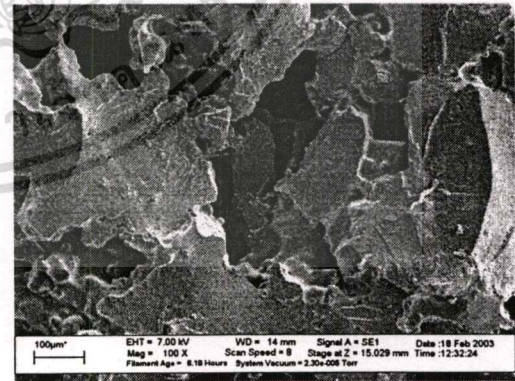
รูป ค



รูป ง



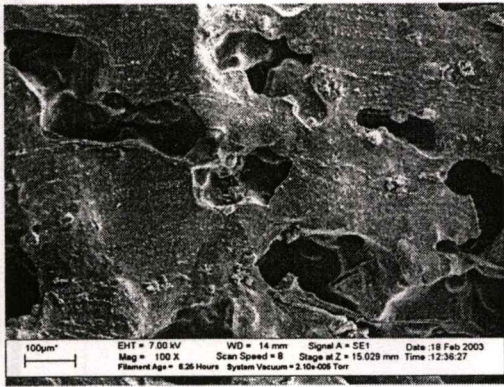
รูป จ



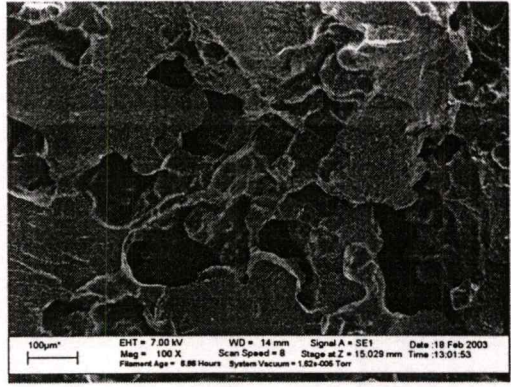
รูป ฉ

รูปที่ 4.11 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 150 °C เมื่อใช้เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน (ภาพ ก - ฉ เวลาการเชื่อมโยง 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ)

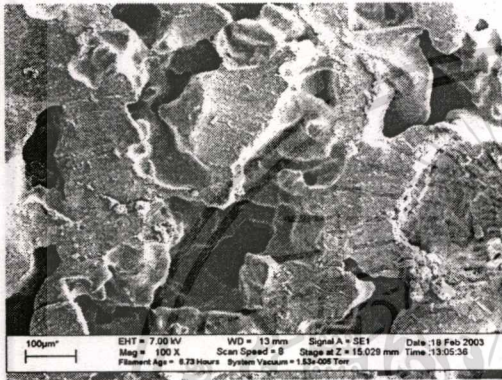
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



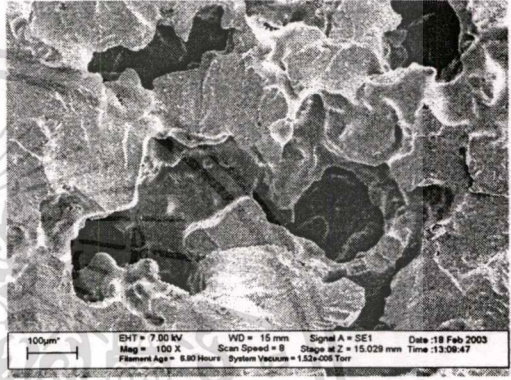
รูป ก



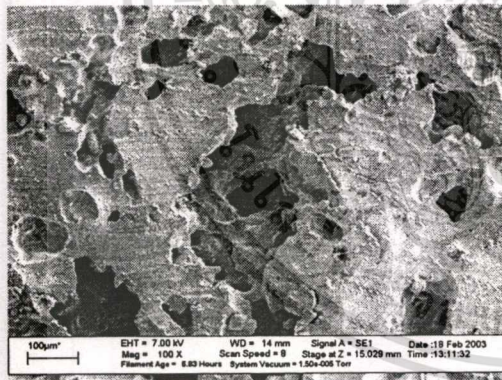
รูป ข



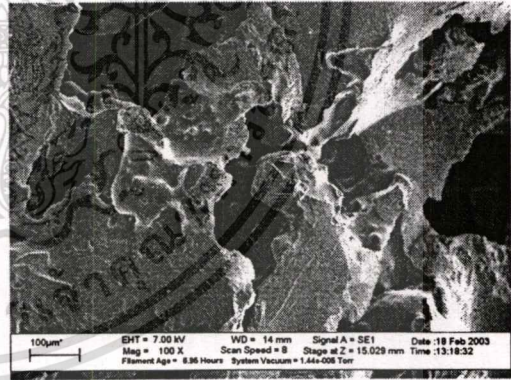
รูป ค



รูป ง



รูป จ



รูป ฉ

รูปที่ 4.12 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) อุณหภูมิการเชื่อมโยง 160 °C เมื่อใช้ เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน (ภาพ ก – ฉ เวลาการเชื่อมโยง 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 – 4.12 แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมนที่เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150 °C และ 160 °C เป็นเวลา 10 – 60 นาที พบว่าที่ทั้งสองอุณหภูมิชิ้นงานจะรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ เมื่อ DNPT ได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซแก่ชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดรูพรุนในชิ้นงาน เมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาของทั้งสองอุณหภูมิร่วมกับผลอัตราการซึมผ่านของน้ำ (รูปที่ 4.9 – 4.10) จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 160 °C มีอัตราการซึมผ่านของน้ำสูงกว่าที่อุณหภูมิ 150 °C ประมาณ 2 เท่าทั้งที่มีขนาดและจำนวนรูพรุนใกล้เคียงกัน ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าที่อุณหภูมิ 160 °C ลักษณะรูพรุนส่วนใหญ่เป็นเซลล์เปิด เมื่อเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่เวลาการเชื่อมโยงต่างกัน พบว่ามีการเกิดรูพรุนในลักษณะเดียวกันคือ ที่เวลาการเชื่อมโยง 10 นาที ชิ้นงานมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าที่เวลาการเชื่อมโยงอื่นๆ และที่เวลาการเชื่อมโยงมากกว่า 10 นาที ขนาดและรูพรุนมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเมื่อเวลาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ลักษณะรูพรุนของชิ้นงานจะเป็นเซลล์เปิดมากขึ้น

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงต่างๆ พบว่าการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่อุณหภูมิและเวลาการเชื่อมโยงอื่นๆ ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะนี้ในการเชื่อมโยงเพื่อศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

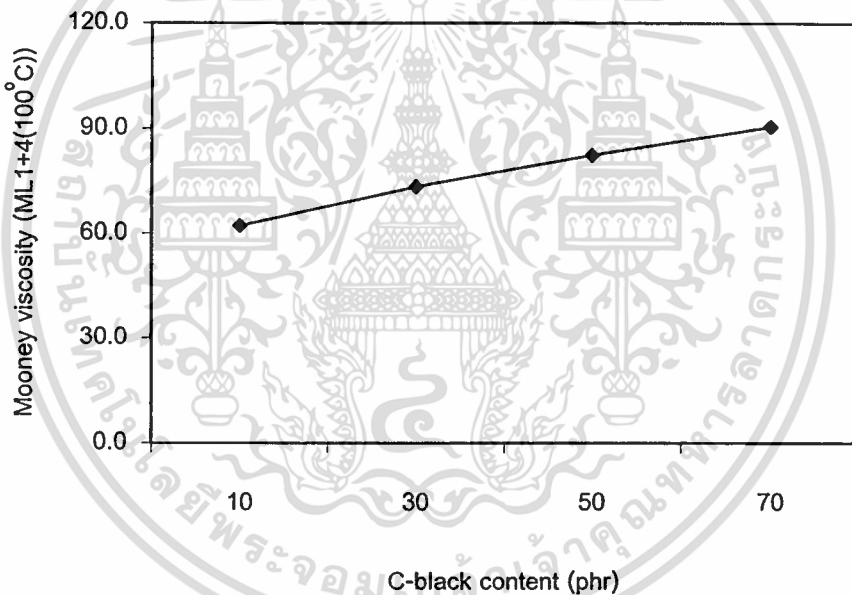
4.2 การศึกษาปริมาณเขม่าดำ

จากการผลิตท่อน้ำซึมนตามสูตรและสภาวะการเชื่อมโยงที่เหมาะสมในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าท่อน้ำซึมนมีความแข็งแรงระดับหนึ่ง เนื่องจากมีการใส่เขม่าดำเพื่อช่วยเสริมแรงทำให้ท่อน้ำซึมนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ลดการบวมพอง (Die swell) นอกจากนี้ยังมีราคาถูก อย่างไรก็ตามปริมาณเขม่าดำที่มากเกินไป อาจมีผลต่อกระบวนการผลิตและสมบัติต่างๆ ของท่อน้ำซึมน ส่วนอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมนที่ผลิตได้มีปริมาณสูงกว่าท่อน้ำซึมนที่ผลิตในเชิงการค้ามาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของปริมาณเขม่าดำ เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของท่อน้ำซึมนให้สูงขึ้นและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกับท่อน้ำซึมนที่ผลิตในเชิงการค้า

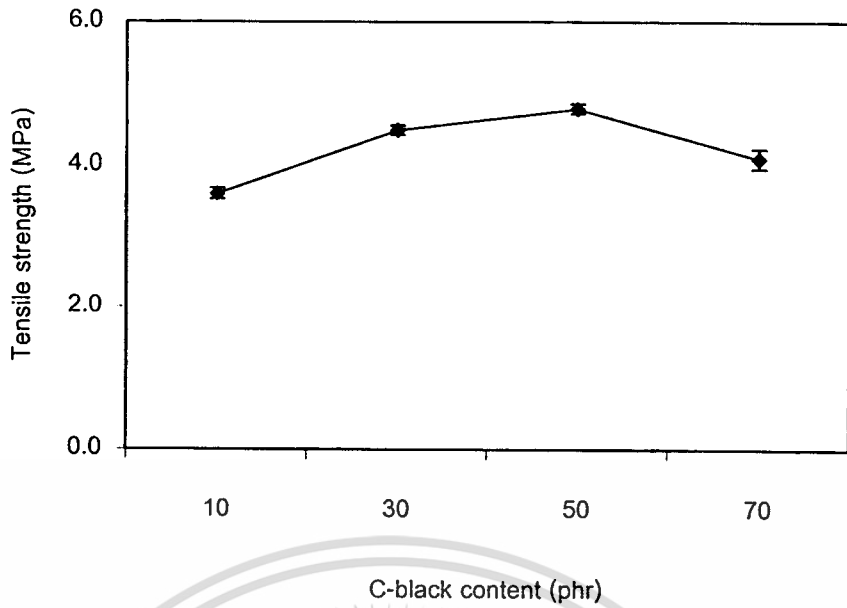
โดยทั่วไปปัจจัยของเขม่าดำที่มีผลอย่างมากต่อสมบัติของยางคือขนาดอนุภาค รองลงมาคือโครงสร้างและความเป็นรูพรุน ส่วนเคมีของพื้นผิว เช่น ความเป็นกรด-ด่าง จะมีผลน้อยต่อสมบัติของยาง แต่มีผลอย่างมากกับปฏิกิริยาการเชื่อมโยงยาง [37] โดยเขม่าดำที่มีความเป็นกรดจะเกิดการเชื่อมโยงช้ากว่าเขม่าดำที่มีความเป็นด่าง เช่น เขม่าดำชนิดชันแนล (Channel black) มีความเป็นกรด (pH ประมาณ 4 - 4.5) จะเชื่อมโยงช้ากว่าเขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace black) ซึ่งมีความเป็นด่าง (pH ประมาณ 7 - 9) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส เกรด N 550 (ตาม

มาตรฐาน ASTM D 1765) ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 39 - 55 นาโนเมตร ซึ่งเขม่าดำชนิดเฟอร์เนสมีความเป็นต่าง ดังนั้นเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น อัตราการเชื่อมโยงจึงเร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซึมโดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยง (ODR) แสดงดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.2 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น เวลาการเชื่อมโยงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

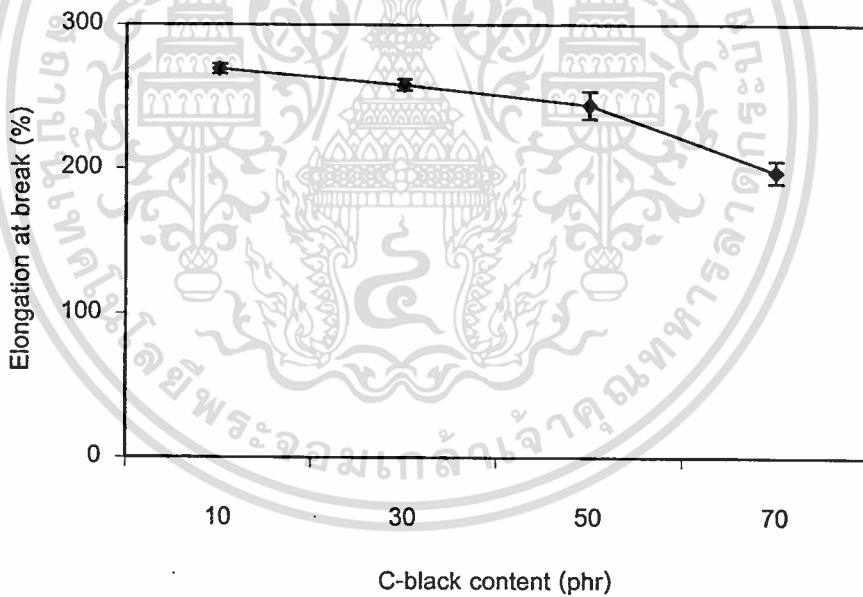
จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง ปริมาณ 10, 30, 50 และ 70 phr (ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ) โดยมีองค์ประกอบของยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณ 30 ส่วนโดยน้ำหนัก ผสมกับผงยางรถยนต์ (GRT) ปริมาณ 70 ส่วนโดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณ DNPT 3 ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที ผลของปริมาณเขม่าดำต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำ แสดงดังรูปที่ 4.13 – 4.18 และ 4.20 – 4.22



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100°C)) ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน

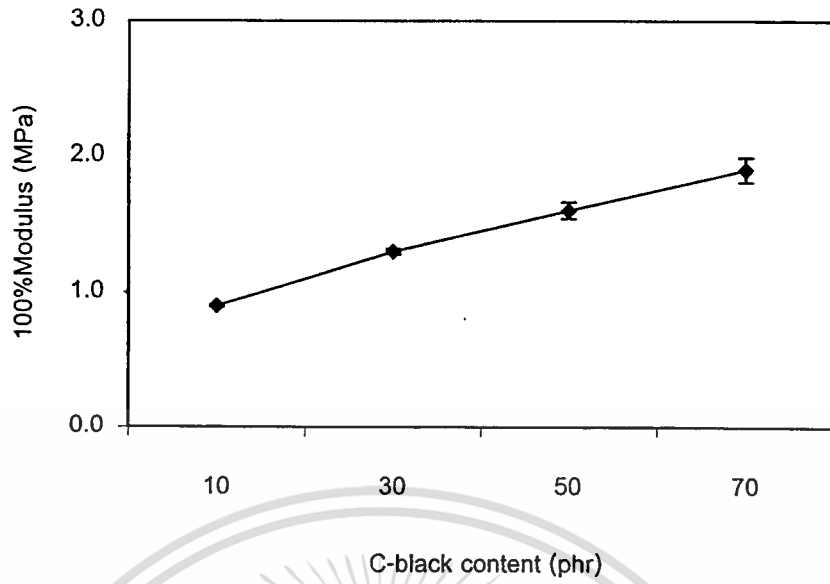


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน

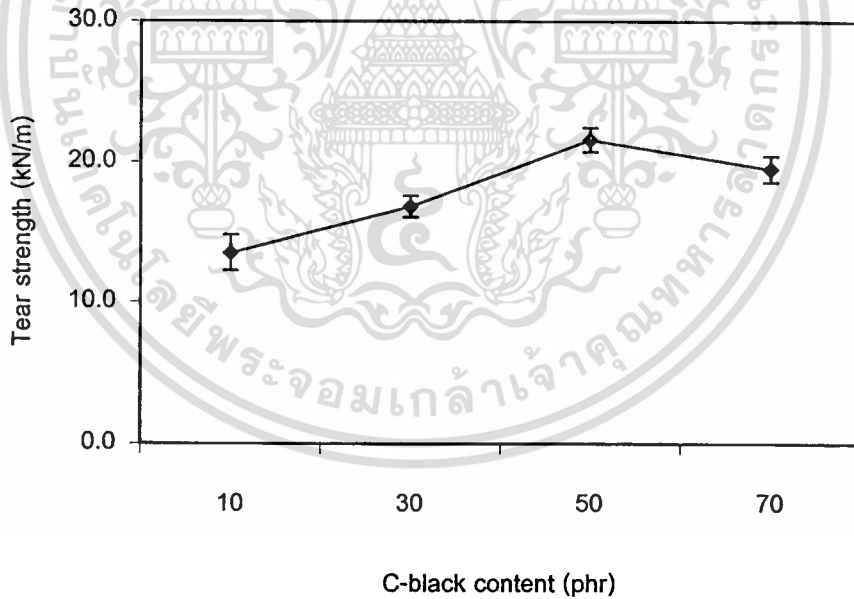


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

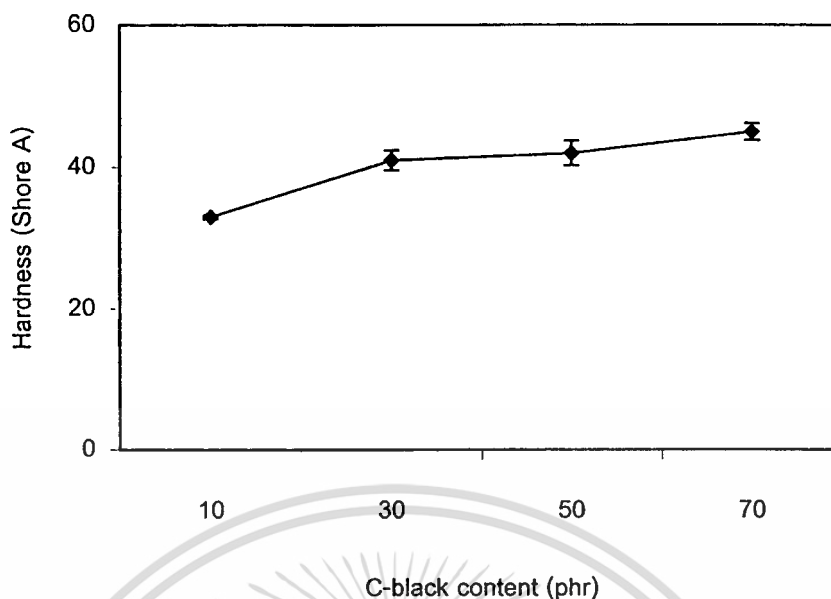


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงมอดุลัสที่ 100 % ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความแข็งกดของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน

จากรูปที่ 4.13 – 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณเขม่าดำ 10, 30, 50 และ 70 phr ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซีม ได้แก่ ความหนืด ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ความแข็งแรงฉีกขาดและความแข็งกด พบว่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างเขม่าดำกับสายโซ่โมเลกุลยางมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการไหลหรือการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยาง ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ตามสมการของ กัท-โกลด์ (Guth-Gold equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมที่ใส่ในยาง ดังสมการที่ 4.2 [38] อย่างไรก็ตามสมการของ กัท-โกลด์ จะประมาณค่าความหนืดได้ถูกต้องแม่นยำเมื่อใช้กับยางที่ผสมสารตัวเติมก่อนกลมที่มีโครงสร้าง (Structure) น้อย และผสมสารตัวเติมปริมาณไม่สูงมาก (น้อยกว่า 30 phr)

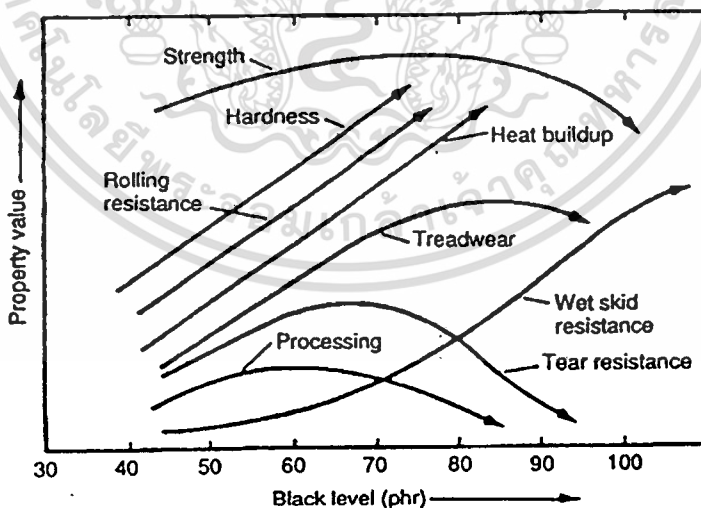
$$\eta_r = \eta_u (1 + 2.5 C + 14.1 C^2) \quad (4.2)$$

- เมื่อ η_r คือ ความหนืดของยางผสมสารตัวเติม (Filled compound)
 η_u คือ ความหนืดของยางไม่ผสมสารตัวเติม (Unfilled compound)
 C คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของสารตัวเติมในยาง (Volume fraction of filler)

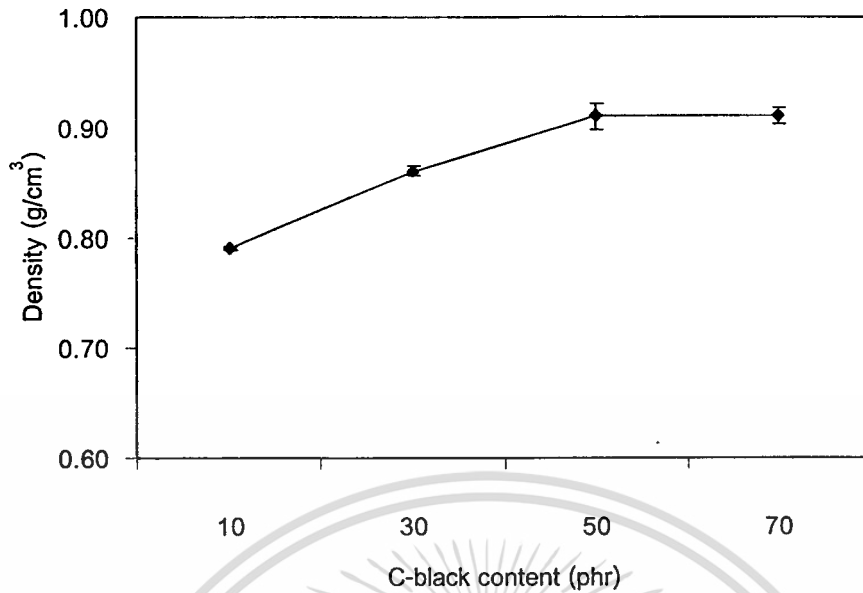
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 และ 4.17 เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นในช่วง 10 – 50 phr ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเขม่าดำมากกว่า 50 phr ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Reinforcing fillers) เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น จะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเขม่าดำและยางมากขึ้น โดยเกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างเขม่าดำมากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณเขม่าดำมากเกินไป อาจเกิดการผสมไม่เพียงพอ ทำให้การกระจายตัวของเขม่าดำไม่สม่ำเสมอ เกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือแอกไกลเมอเรต (Agglomerates) อาจทำให้เกิดช่องว่าง (Voids) ภายในกลุ่มก้อนเขม่าดำและภายในยาง เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดจึงลดลง

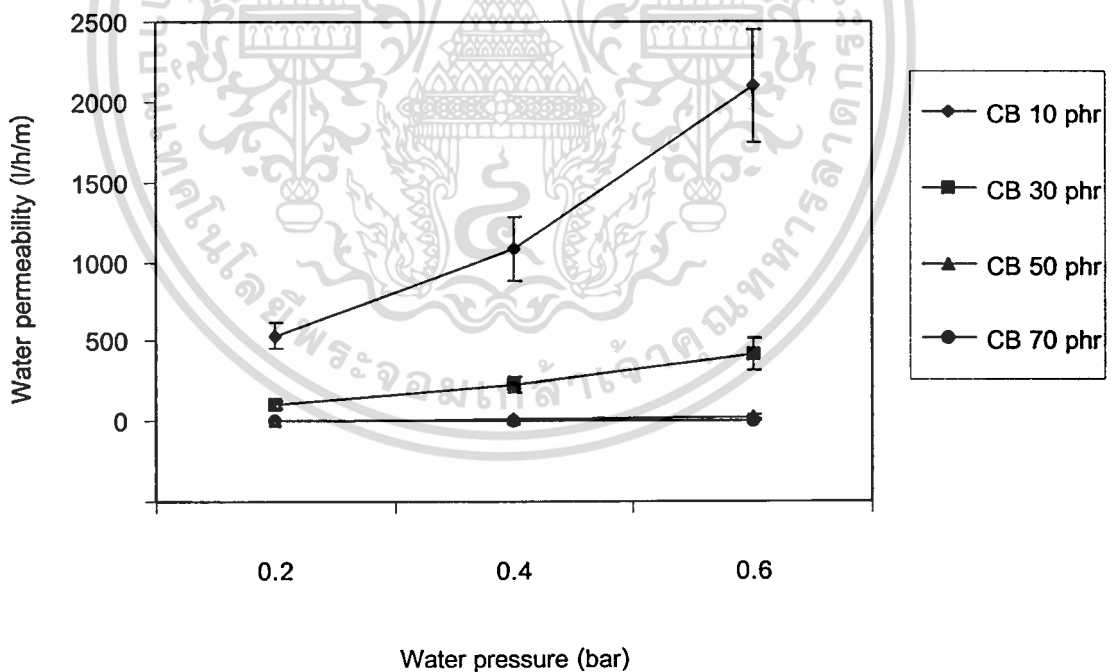
จากรูปที่ 4.15 – 4.16 และ 4.18 เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ส่วนมอดุลัสและความแข็งแรงกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเขม่าดำเป็นวัสดุที่มีความแข็งมาก มีมอดุลัสสูงมากเมื่อเทียบกับยาง (มากกว่าประมาณ 1,000 เท่า) เขม่าดำจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรง ส่วนยางเป็นวัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนรูปได้มาก ดังนั้นเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้นและมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนรูปได้น้อยลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของปริมาณเขม่าดำต่อสมบัติต่างๆ ของยาง [12] ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลของปริมาณเขม่าดำต่อสมบัติของยาง [12]



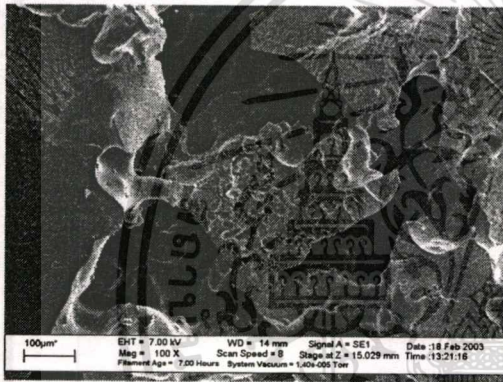
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความหนาแน่นของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน



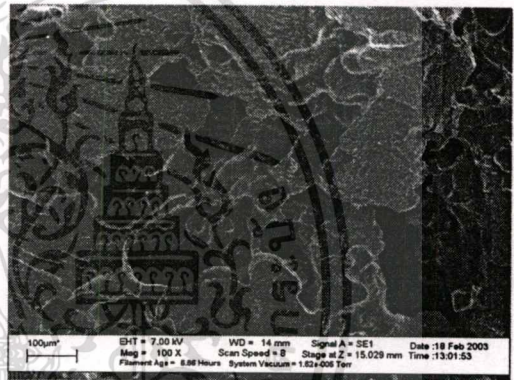
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

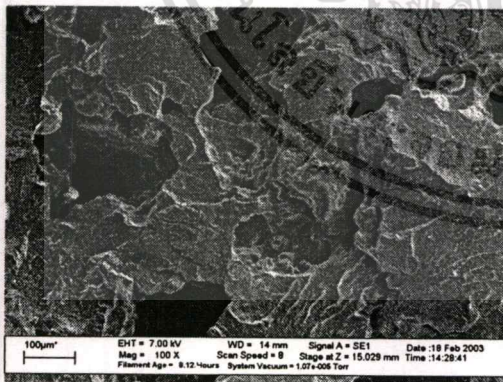
จากรูปที่ 4.20 – 4.21 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อผสมเขม่าดำปริมาณน้อย ยางจะมีความหนืดต่ำ ฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถขยายตัวได้มาก ทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนขนาดใหญ่และมีความต่อเนื่องกันมาก เป็นผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำ และอัตราการซึมผ่านของน้ำสูง ส่วนที่ปริมาณการเติมเขม่าดำมาก ยางจะมีความหนืดสูง ฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถขยายตัวได้น้อย ทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนขนาดเล็กและมีความต่อเนื่องกันน้อย เป็นผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูงและอัตราการซึมผ่านของน้ำต่ำ นอกจากนี้เขม่าดำมีความหนาแน่นสูง ($\rho_{CB} = 1.80 \text{ g/cm}^3$) เมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่นๆ ในยาง ($\rho_{NR} = 0.92 \text{ g/cm}^3$) ดังนั้นเมื่อมีปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น



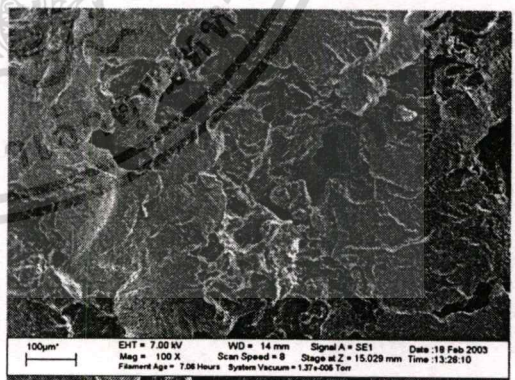
รูป ก



รูป ข



รูป ค



รูป ง

รูปที่ 4.22 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน (รูป ก – ง ปริมาณเขม่าดำ 10, 30, 50 และ 70 phr ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 แสดงสัดส่วนวิทยาของท่อน้ำซึมที่เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อปริมาณเขม่าดำต่างกัน จะเห็นว่าทุกชิ้นงานจะมีรูพรุนเกิดขึ้น เนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งแต่ละชิ้นงานจะต่างกันที่ขนาดและจำนวนของฟองก๊าซ โดยที่ชิ้นงานที่มีปริมาณเขม่าดำน้อยคือ 10 phr ดังรูปที่ 4.22 ก จะเห็นว่าชิ้นงานมีรูพรุนขนาดใหญ่และมีความต่อเนื่องกัน เนื่องจากที่ปริมาณเขม่าดำน้อย ยางจะมีความหนืดต่ำ ฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT มีการขยายตัวมากเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.22 ข - 4.22 ง ยางมีความหนืดสูงขึ้น ฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เมื่อได้รับความร้อน มีการขยายตัวน้อย เป็นผลให้ชิ้นงานมีรูพรุนขนาดเล็กลง และมีความต่อเนื่องน้อยลงตามลำดับ

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ปริมาณเขม่าดำต่างกัน พบว่าที่ปริมาณเขม่าดำ 50 phr มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่ปริมาณเขม่าดำอื่นๆ และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำประมาณ 6 – 25 l/h/m ที่ความดัน 0.2 – 0.6 บาร์ ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ที่มีอัตราการซึมผ่านของน้ำ 0.75 – 6.0 l/h/m (อ้างอิงจากท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้าของบริษัท Leaky Pipe Systems [29]) ดังนั้นจึงใช้ปริมาณเขม่าดำ 50 phr ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

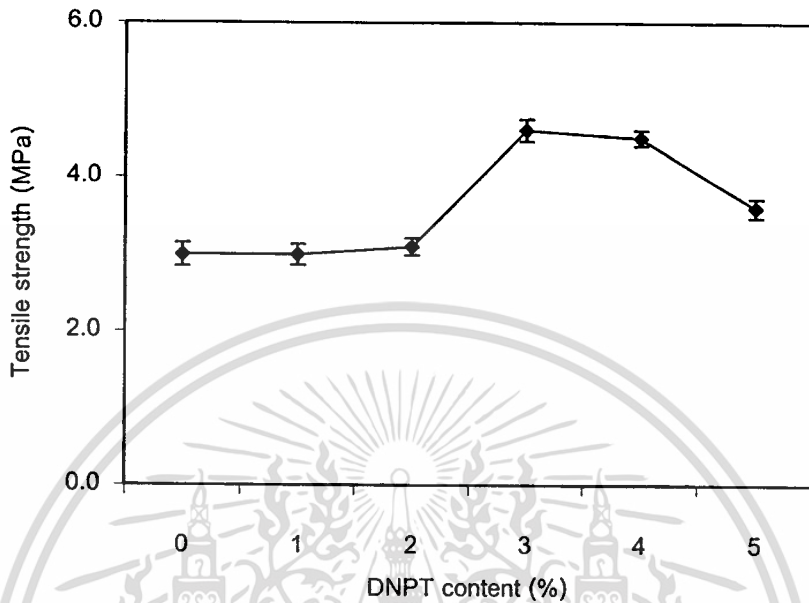
เมื่อพิจารณาเวลาการเชื่อมโยงในขั้นตอนนี้จะเห็นว่าใช้เวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับท่อน้ำซึมที่มีปริมาณเขม่าดำ 30 phr คือ 20 นาที และเมื่อพิจารณาเวลาการเชื่อมโยงที่วัดได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (ODR) แสดงดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.2 จะเห็นว่าที่ปริมาณเขม่าดำ 50 phr มีเวลาการเชื่อมโยงเท่ากับที่ปริมาณเขม่าดำ 30 phr ดังนั้นจึงสามารถใช้เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

4.3 การศึกษาปริมาณสารให้ฟอง

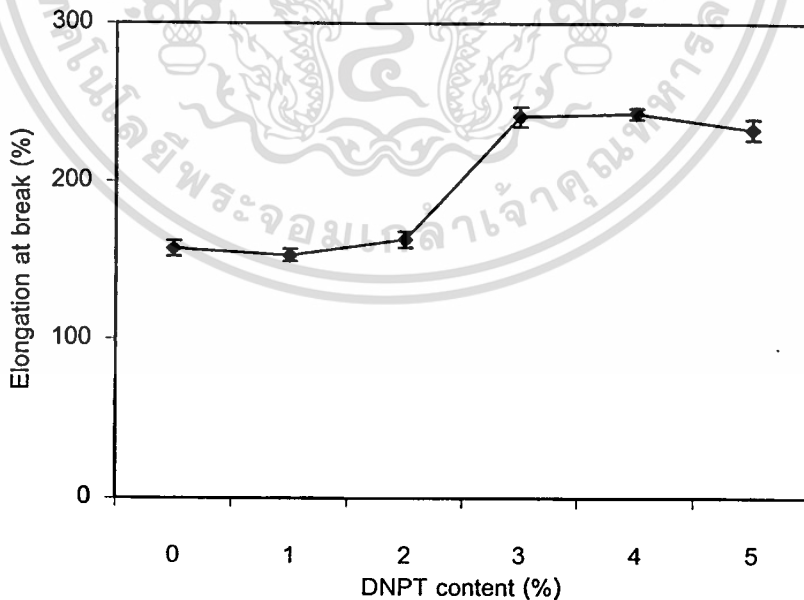
จากการศึกษาการผลิตท่อน้ำซึมที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าการใส่สารให้ฟอง DNPT เพื่อให้เกิดรูพรุนภายในชิ้นงาน ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านออกมาที่ผนังท่อได้ จะมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดและจำนวนของรูพรุน รวมทั้งลักษณะความต่อเนื่องของรูพรุนภายในชิ้นงาน ปริมาณสารให้ฟองที่น้อยเกินไป จะทำให้ชิ้นงานมีจำนวนรูพรุนน้อย แต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไป ไม่ได้ทำให้จำนวนของรูพรุนมากขึ้น เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นมากเกินไปจะรวมตัวกันหลุดออกจากชิ้นงาน ดังนั้นจึงทำการศึกษาปริมาณสารให้ฟอง เพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ท่อน้ำซึมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำเหมาะสมกับการใช้งาน

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของปริมาณสารให้ฟองที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 % โดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ โดยมีองค์ประกอบของยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณ 30 ส่วนโดยน้ำหนัก ผสมกับผงยางรถยนต์ (GRT) ปริมาณ 70 ส่วนโดยน้ำหนัก และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณเขม่าดำ 50 phr (ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที ผลของปริมาณสารให้ฟองต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ อัตราการซึมผ่านของน้ำและสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.23 - 4.31

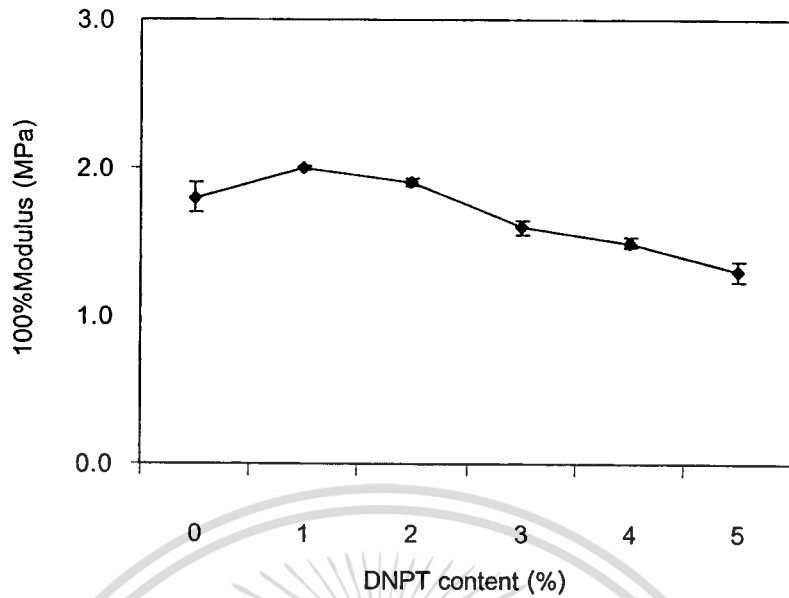


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน

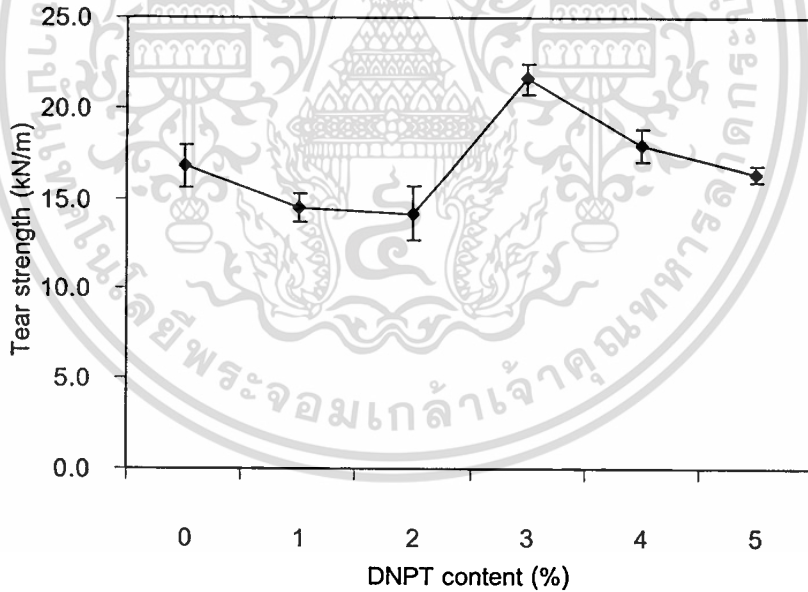


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

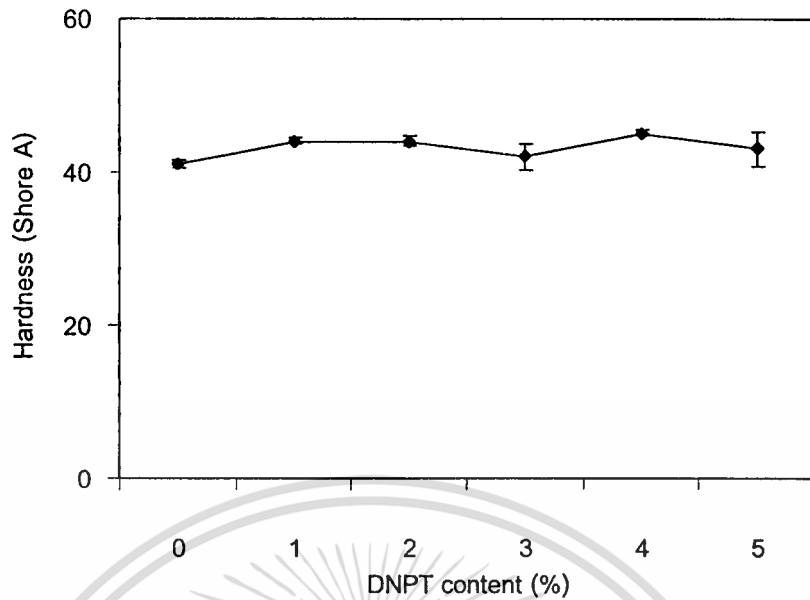


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน

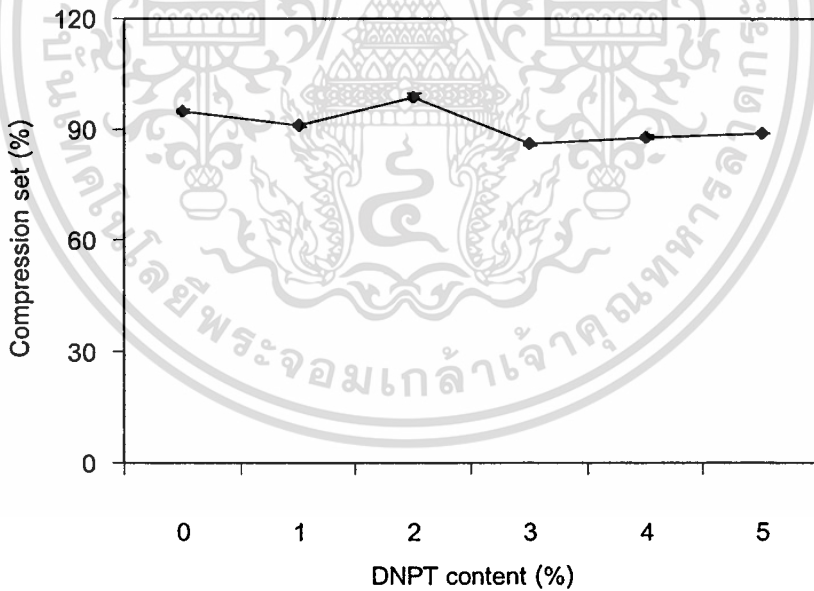


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน

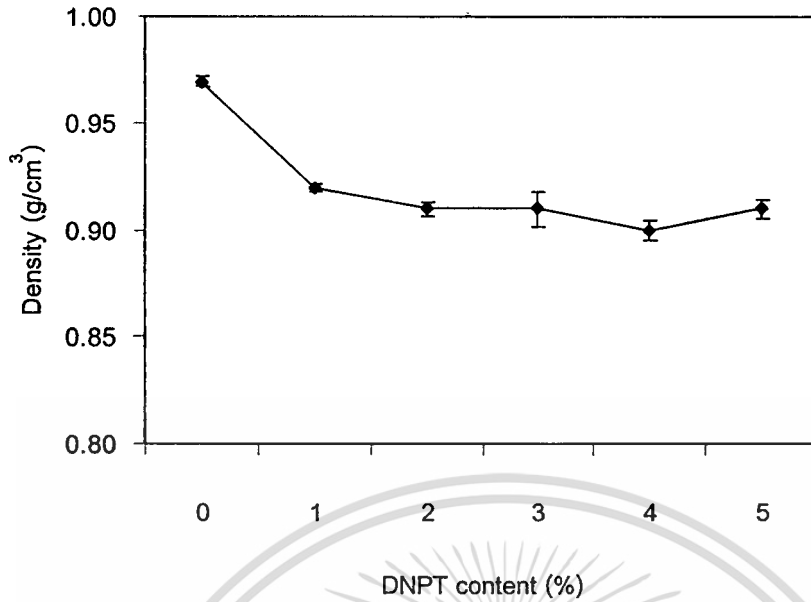


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน

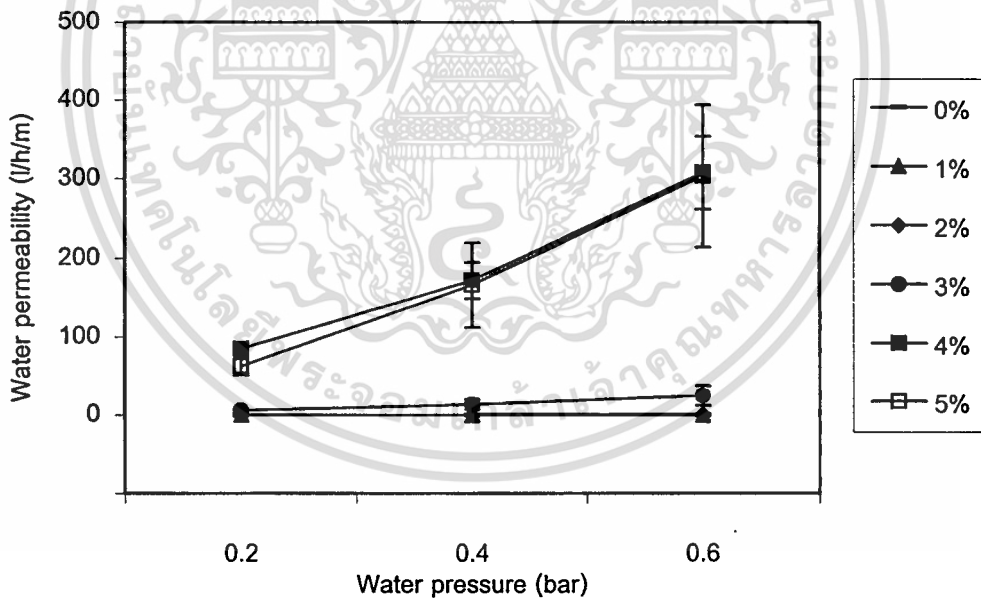
จากรูปที่ 4.23 และ 4.26 – 4.28 จะเห็นว่าที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 3 % มีสมบัติเชิงกลบางประการมีค่าสูงสุด ได้แก่ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งกดและการยุบตัว เนื่องจากแรงอัด ที่ปริมาณ DNPT น้อยกว่า 3% สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าที่ปริมาณ 3% มาก ส่วนที่ปริมาณ DNPT มากกว่า 3% มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าที่ปริมาณ 3% เล็กน้อย เนื่องจากในการทดลองจะใช้เวลาการเชื่อมโยงเท่ากันทุกสูตรคือ 20 นาที ซึ่งเป็นเวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับการใช้ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 3% โดยพิจารณาจากการให้ค่าสมบัติเชิงกลสูงสุดและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสม ดังนั้นที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT น้อยกว่า 3% ปริมาณยูเรียที่ใช้เป็นสารกระตุ้นให้ DNPT สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ก็จะมีปริมาณน้อย (อัตราส่วนของสารให้ฟอง DNPT : ยูเรีย คือ 1:1) อย่างไรก็ตามยูเรียมีสมบัติเป็นด่าง ทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณยูเรียน้อยลงจึงทำให้การเชื่อมโยงช้าลง ส่งผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงไม่สมบูรณ์ โครงสร้างยางเป็นสายโซ่ตรง ยังไม่เป็นร่างแหสามมิติ เป็นผลให้ยางมีความแข็งแรงน้อย ที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT มากกว่า 3% ปริมาณยูเรียจะมากขึ้นจึงทำให้อัตราการเชื่อมโยงเร็วขึ้น เป็นผลให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเกิน “จุดเกิดเจล” ทำให้ยางไม่สามารถเคลื่อนไหวเพื่อกระจายพลังงานที่ได้รับ เป็นผลให้ความแข็งแรงลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซึมโดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยง (ODR) แสดงดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.3 พบว่าเมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น เวลาการเชื่อมโยงมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด

เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากเมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น ชิ้นงานจะมีพื้นที่ในการยืดตัวตามแนวแรงมากขึ้น เป็นผลให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.25 มอดุลัสมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดฟองก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น และมีความต่อเนื่องมากขึ้น เป็นผลให้สามารถรับแรงจากแรงภายนอกได้น้อยลง



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน



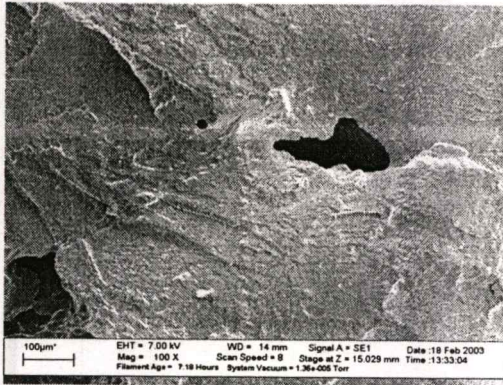
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน

ความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านของน้ำขึ้นกับจำนวนและขนาดของรูพรุนภายในชั้นงาน จากรูปที่ 4.29 – 4.30 จะเห็นว่าผลของความหนาแน่นสอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านของน้ำ กล่าวคือ ชั้นงานที่ไม่ใส่สารให้ฟอง DNPT จะมีความหนาแน่นสูงกว่าชั้นงานที่มีการใส่สารให้ฟอง DNPT อย่างเห็นได้ชัด และน้ำไม่สามารถซึมผ่านชั้นงานได้ เนื่องจากไม่มีรูพรุนซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ภายในชั้นงาน เมื่อพิจารณาความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่มีการใส่ DNPT พบว่าเมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนอัตราการซึมผ่านของน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น จะเกิดการสลายตัวให้ปริมาณฟองก๊าซมากขึ้นและมีความต่อเนื่องมากขึ้น

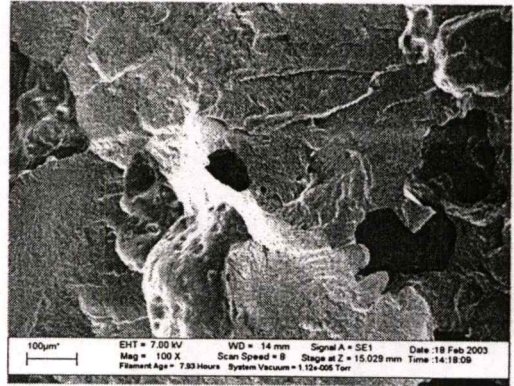
จากรูปที่ 4.31 แสดงหลักฐานวิทยาของท่อน้ำซึมที่มีปริมาณสารให้ฟอง DNPT 0, 1, 2, 3, 4 และ 5% พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับผลของความหนาแน่นและอัตราการซึมผ่านของน้ำ โดยชั้นงานที่ไม่ใส่สารให้ฟอง DNPT จะมีการรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ มีฟองอากาศเกิดขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นอากาศที่มีอยู่ในยาง หรือเกิดขึ้นในระหว่างการบดผสมหรือเป็นช่องว่างระหว่างอนุภาคผงยางรถยนต์ เป็นผลให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านชั้นงานได้ ดังรูปที่ 4.31 ก เมื่อใส่สารให้ฟอง DNPT 1% จะเกิดการสลายตัวให้ก๊าซแก่ชั้นงาน ทำให้เกิดรูพรุนเห็นเป็นช่องสีดำภายในชั้นงาน โดยรูพรุนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นจะมีจำนวนรูพรุนน้อยมากและไม่ต่อเนื่องกัน เป็นผลให้ชั้นงานมีความหนาแน่นสูงและน้ำซึมผ่านได้น้อยมาก ดังรูปที่ 4.31 ข เมื่อปริมาณสารให้ฟอง DNPT เพิ่มขึ้น จะเกิดการสลายตัวให้ฟองก๊าซเกิดเป็นรูพรุนมากขึ้น เป็นผลให้ชั้นงานมีจำนวนรูพรุนมากขึ้นและมีความต่อเนื่องมากขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำจึงมากขึ้น ดังรูปที่ 4.31 ค – จ

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT ต่างกัน พบว่าที่ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 3% มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่ปริมาณสารให้ฟองอื่นๆ และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำประมาณ 6 – 25 l/h/m ที่ความดัน 0.2 – 0.6 บาร์ ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้งานจริง (อ้างอิงจากท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้าของบริษัท Leaky Pipe Systems [29]) ดังนั้นจึงใช้ปริมาณสารให้ฟอง DNPT 3% ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป

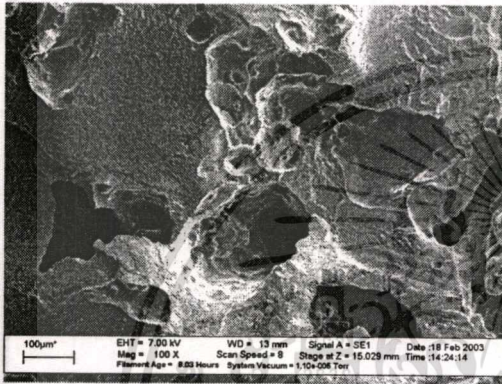
เมื่อพิจารณาเวลาการเชื่อมโยงในชั้นตอนนี้จะเห็นว่าใช้เวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับท่อน้ำซึมที่มีปริมาณสารให้ฟอง DNPT 3% คือ 20 นาที ดังนั้นจึงใช้เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



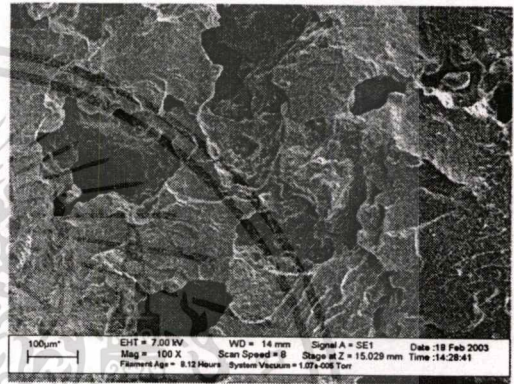
รูป ก



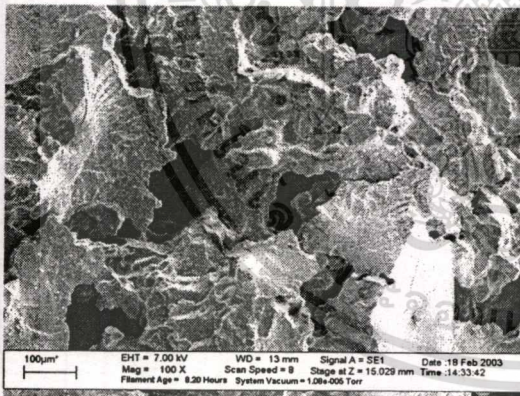
รูป ข



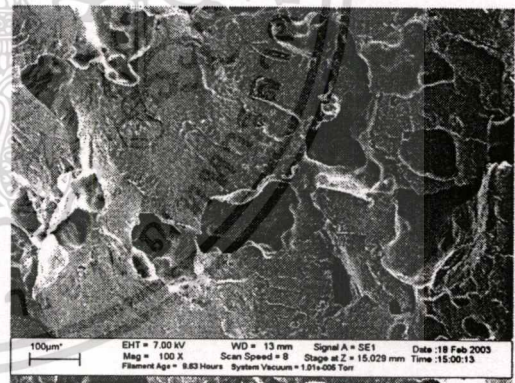
รูป ค



รูป ง



รูป จ



รูป ฉ

รูปที่ 4.31 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน (ภาพ ก - ฉ ปริมาณสารให้ฟอง 0, 1, 2, 3, 4 และ 5% ตามลำดับ)

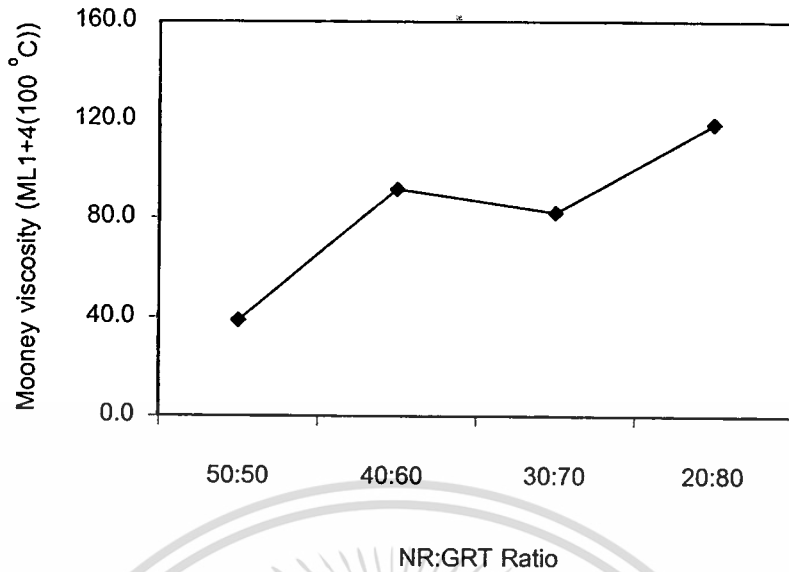
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์

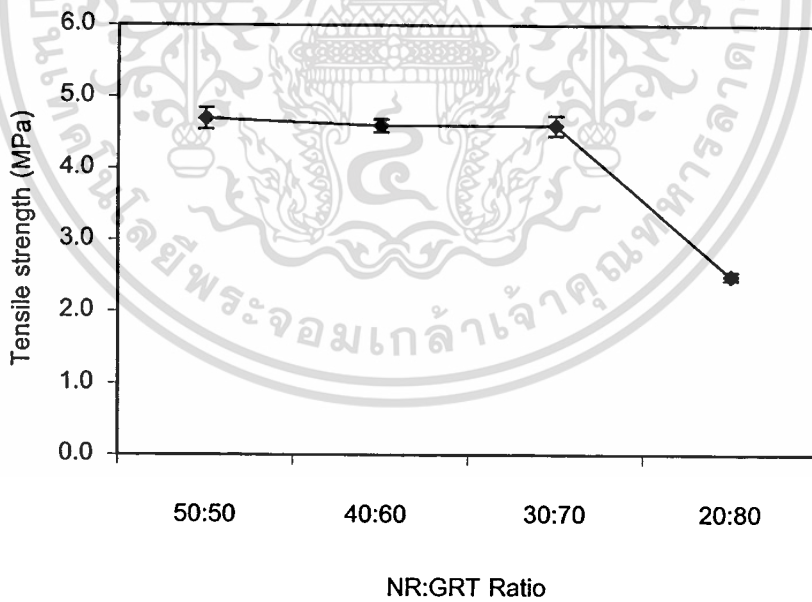
ในงานวิจัยนี้จะใช้ผงยางรถยนต์เป็นองค์ประกอบหลักและมียางธรรมชาติเป็นตัวเชื่อม (Binder) และใช้สารให้ฟอง DNPT โดยอัตราส่วนระหว่างและยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการผลิต สมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านของน้ำ ปริมาณผงยางรถยนต์ที่มากเกินไป จะทำให้แปรรูปยากและสมบัติเชิงกลลดลง แต่ถ้าปริมาณผงยางรถยนต์น้อยเกินไป จะทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านท่อได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์เพื่อให้ได้ท่อน้ำซึมที่มีสมบัติที่ดีและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งาน

จากผลการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซึมโดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยง (ODR) แสดงดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.4 พบว่าเมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น เวลาการเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในการทดลองใช้สารเติมแต่งสำหรับยาง ได้แก่ สารเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง ฯลฯ ปริมาณเทียบกับยางธรรมชาติ เมื่อผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสารเชื่อมโยงและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ซึ่งมีผลอย่างมากต่อเวลาการเชื่อมโยงยาง กระจายอยู่ในอนุภาคยางน้อยลง เป็นผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลง

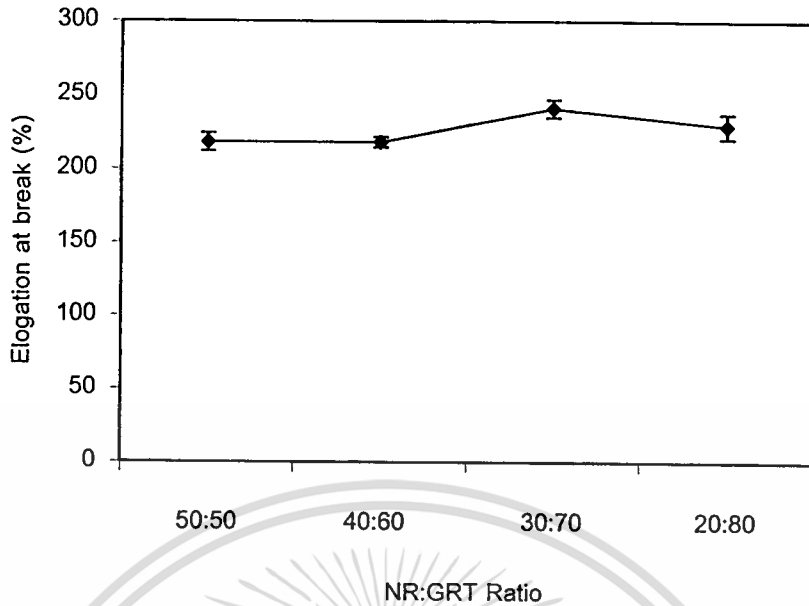
จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ (NR:GRT) ที่ปริมาณ 50:50, 40:60, 30:70 และ 20:80 โดยมีปริมาณสารให้ฟอง DNPT 3 ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ และปริมาณเขม่าดำ 50 phr (ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที ผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ อัตราการซึมผ่านของน้ำและสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.32 - 4.42



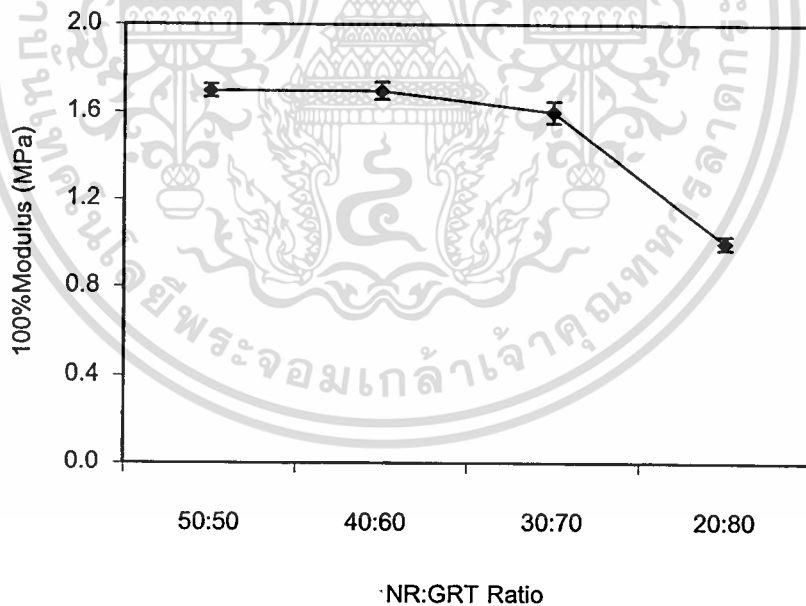
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100 °C)) ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



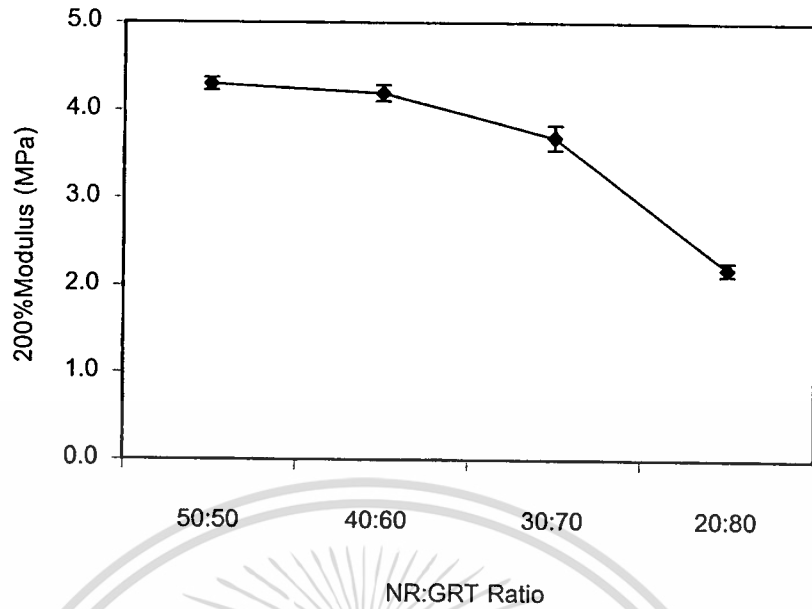
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



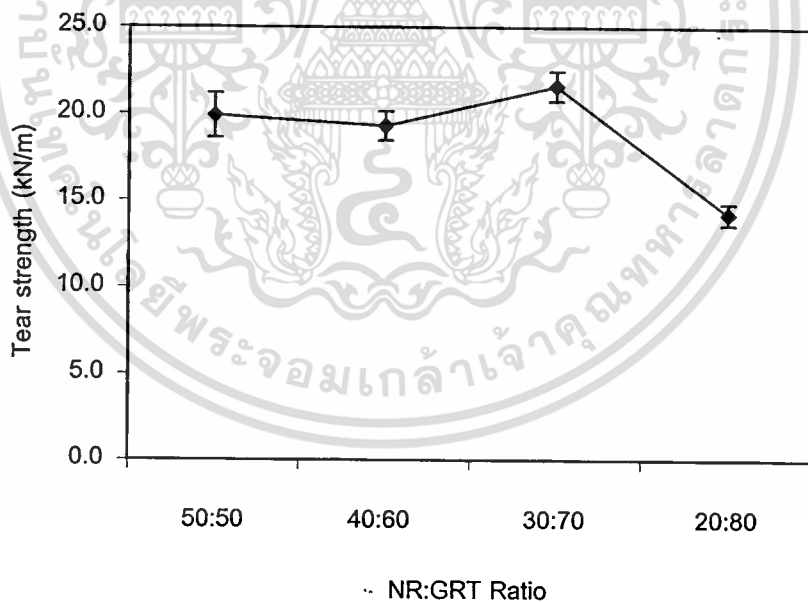
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย DNPT: C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



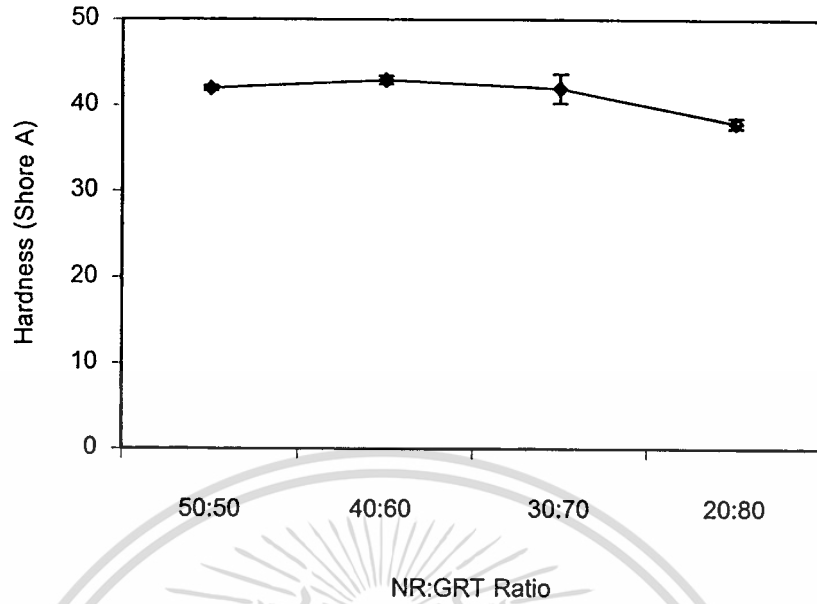
รูปที่ 4.35 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 100% ของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



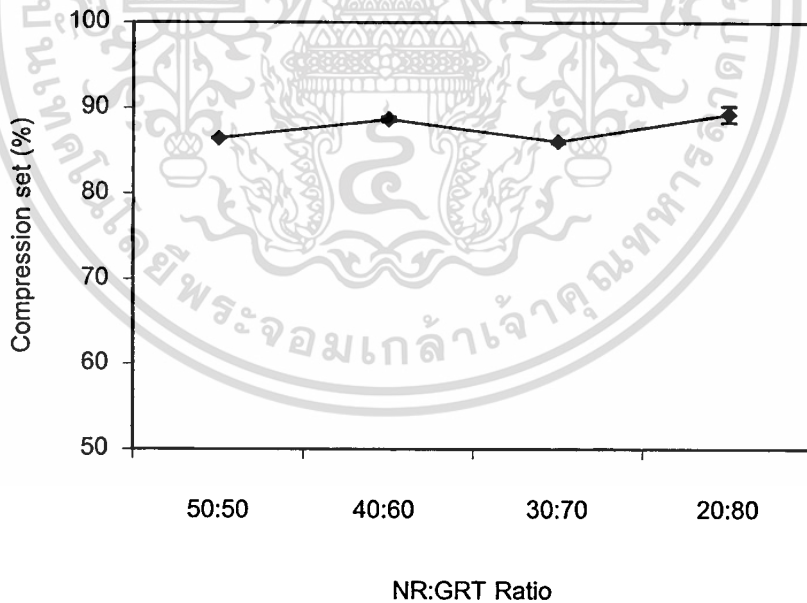
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงค่ามอดุลัสที่ 200%ของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



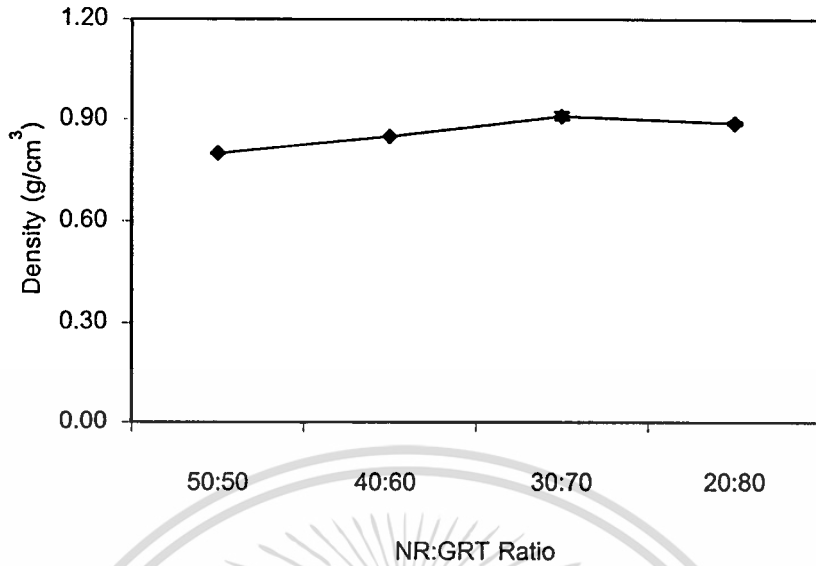
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าความแข็งกดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



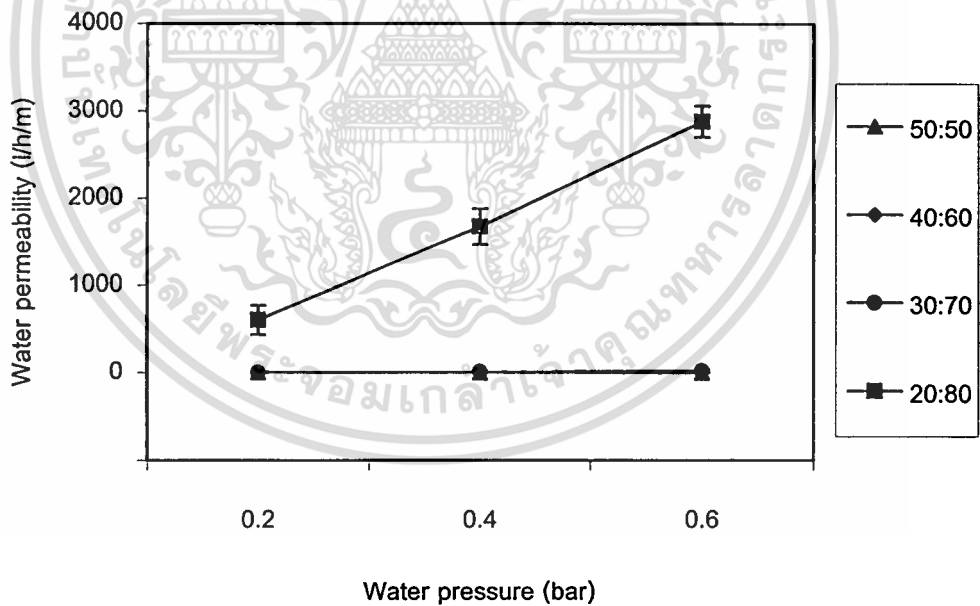
รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.32 จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ (NR:GRT ratio) ลดลง สมบัติของยางที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมโยง ซึ่งได้แก่ ความหนืดมูนี้ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากผงยางรถยนต์เป็นยางผสมสารเคมี (Compound rubber) ที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว ทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นสารตัวเติม (Fillers) ชนิดหนึ่ง ดังนั้นเมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ลดลง สมบัติเชิงกลบางประการ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งแรงฉีกขาดและความแข็งแรงกด มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.33 – 4.38 โดยที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ในช่วง 50:50 – 30:70 จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนที่ 20:80 สมบัติเชิงกลจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อผสมยางธรรมชาติกับผงยางรถยนต์จะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ โดยเกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างผงยางรถยนต์ เป็นผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณผงยางรถยนต์มากเกินไป จะทำให้เกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างผงยางรถยนต์น้อยลง เป็นผลให้สมบัติเชิงกลลดลง

จากรูปที่ 4.39 เมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ลดลง การยุบตัวเนื่องจากการกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของผงยางรถยนต์มีลักษณะเป็นก้อนกลม มีรูปร่างไม่แน่นอน แต่จะก้อนติดกันเป็นก้อนใหญ่หรือแอกโกลเมอเรต (Agglomerates) และมีช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อน ซึ่งสามารถเกิดการยุบตัวได้เมื่อมีการกดอัด ดังนั้นเมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น การยุบตัวเนื่องจากการกดอัดจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์เท่ากับ 30:70 และ 20:80 จะทำให้การบดผสมสารเคมีด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งยากเนื่องจากยางไม่พันลูกกลิ้ง ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพการกระจายของสารเคมีในยางไม่ดี เป็นผลให้สมบัติของท่อน้ำซึมที่ผลิตได้ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน

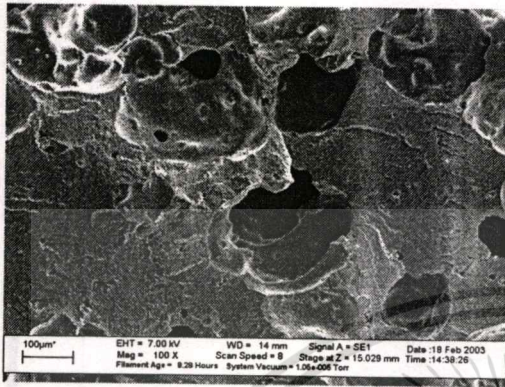
จากรูปที่ 4.40 เมื่ออัตราส่วนระหว่าง NR:GRT ลดลง เนื่องจากผงยางรถยนต์ประกอบด้วยยางและสารเคมีซึ่งส่วนใหญ่มีความหนาแน่นมากกว่ายาง โดยเฉพาะเขม่าดำซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่ายาง ($\rho_{CB} = 1.8 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{NR} = 0.92 \text{ g/cm}^3$) และมีปริมาณมากกว่า 50 phr ดังนั้นผงยางรถยนต์จึงมีความหนาแน่นมากกว่ายาง เมื่อปริมาณผงยางรถยนต์เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.41 จะเห็นว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนระหว่าง NR:GRT ลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติซึ่งเป็นวัฏภาคที่ต่อเนื่องและทำหน้าที่เป็นตัวยึดมีปริมาณน้อยลง ทำให้เกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างผงยางรถยนต์น้อยลง เป็นผลให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคผงยางรถยนต์มากขึ้น อัตราการซึมผ่านของน้ำจึงมากขึ้น ที่อัตราส่วนระหว่าง NR:GRT เท่ากับ 50:50 น้ำไม่สามารถซึมผ่านท่อได้ที่ความดัน 0.2-0.4 บาร์ และที่อัตราส่วนระหว่าง NR:GRT เท่ากับ 20:80 อัตราการซึมผ่านของน้ำมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีความแข็งแรงน้อยมากเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่นๆ เมื่อได้รับความดันน้ำสูงขึ้น ผนังเซลล์จะเกิดการขยายตัวได้มาก ทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมากขึ้น

จากรูปที่ 4.42 ก-ง แสดงสัญญาณวิทยาของท่อน้ำซึมที่มีอัตราส่วนระหว่าง NR:GRT 50:50, 40:60, 30:70 และ 20:80 ตามลำดับ จะเห็นว่าที่อัตราส่วนระหว่าง NR:GRT เท่ากับ 50:50 ดังรูปที่ 4.42 ก ชิ้นงานจะมีการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันระหว่าง NR และ GRT มีรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นภายในชิ้นงานและมีความต่อเนื่องกันน้อย เมื่ออัตราส่วนระหว่าง NR:GRT ลดลง ดังรูปที่ 4.42 ข-ง การยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างของผงยางรถยนต์น้อยลง ส่งผลให้การรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันระหว่าง NR และ GRT น้อยลง พื้นผิวมีลักษณะขรุขระขึ้น ขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้นและต่อเนื่องกันมากขึ้น เป็นผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและอัตราการซึมผ่านของน้ำ

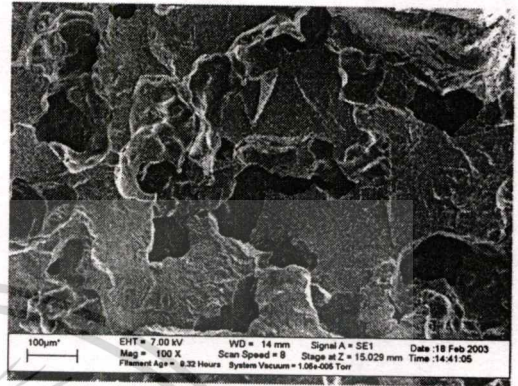
จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านของน้ำที่อัตราส่วนระหว่าง NR:GRT ต่างกัน พบว่าที่อัตราส่วนระหว่าง NR:GRT 50:50 มีสมบัติเชิงกลสูงกว่าที่ 40:60 และ 30:70 เล็กน้อย แต่อัตราการซึมผ่านของน้ำน้อยมาก ส่วนที่ 30:70 อัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกับการใช้งานจริงโดยใช้ความดันน้อย แต่ทำการบดผสมสารเคมีด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งยาก ส่วนอัตราส่วนระหว่าง NR:GRT เท่ากับ 40:60 ซึ่งมีอัตราการซึมผ่านของน้ำประมาณ 0.1-1.4 l/h/m ที่ความดัน 0.2-0.6 บาร์ แต่ถ้าปรับความดันให้เท่ากับความดันของน้ำที่ใช้งานจริง อัตราการซึมผ่านของน้ำก็จะใกล้เคียงกัน (อ้างอิงจากท่อน้ำซึมที่ผลิตในเชิงการค้าของบริษัท Leaky Pipe Systems ซึ่งมีอัตราการซึมผ่านของน้ำ 0.75-6.0 l/h/m ที่ความดัน 1-1.5 บาร์) ดังนั้นอัตราส่วน NR:GRT เท่ากับ 40:60 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตท่อน้ำซึม

เมื่อพิจารณาเวลาการเชื่อมโยงในขั้นตอนนี้จะเห็นว่าใช้เวลาการเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับท่อน้ำซึมที่มีอัตราส่วน NR:GRT เท่ากับ 30:70 คือ 20 นาที และเมื่อพิจารณาเวลาการเชื่อมโยงที่วัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

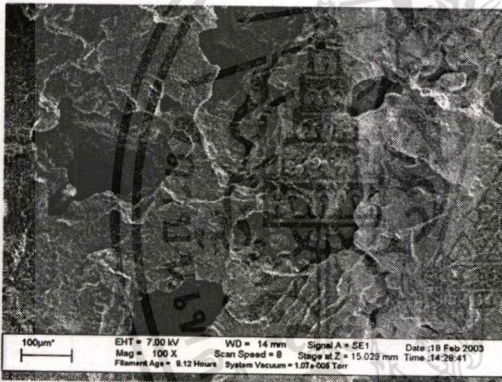
ได้จากเครื่องวัดการเชื่อมโยงยาง (ODR) แสดงดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.4 จะเห็นว่าที่อัตราส่วน NR:GRT เท่ากับ 40:60 มีเวลาการเชื่อมโยงใกล้เคียงกับที่อัตราส่วน NR:GRT เท่ากับ 40:60 ดังนั้นจึงสามารถใช้เวลาการเชื่อมโยง 20 นาที ในการศึกษาปัจจัยอื่นๆ ต่อไป



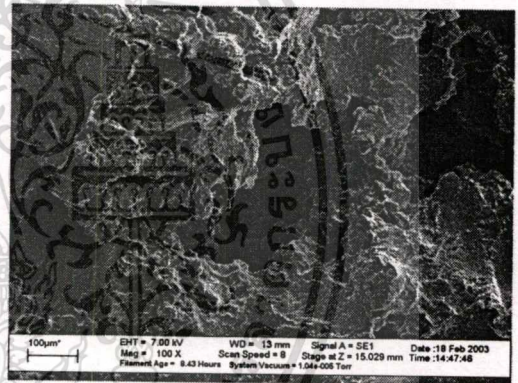
รูป ก



รูป ข



รูป ค



รูป ง

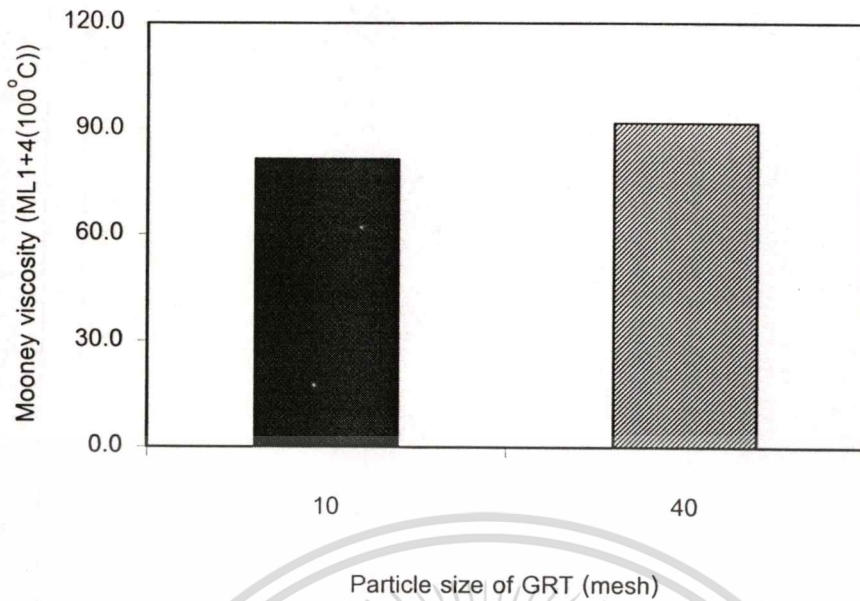
รูปที่ 4.42 SEM Micrographs แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้เมื่ออัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน (ภาพ ก – ง อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ 50:50, 40:60, 30:70 และ 20:80 ตามลำดับ)

4.5 การศึกษาขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์

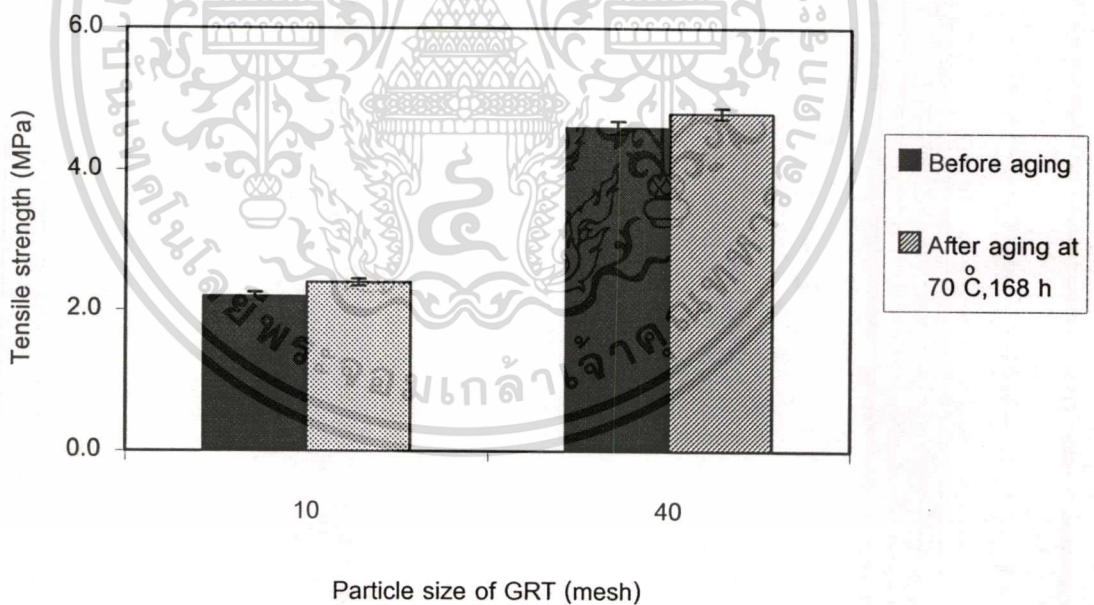
ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์จะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว โดยที่ผงยางรถยนต์ขนาดอนุภาคเล็ก (ขนาดเมซสูง) จะมีพื้นที่ผิวมาก ส่วนผงยางรถยนต์ขนาดอนุภาคใหญ่ (ขนาดเมซน้อย) จะมีพื้นที่ผิวมาก โดยพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน เมื่อผสมกับยางจะทำให้การยึดเกาะบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของผงยางรถยนต์แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและอัตราการซึมผ่านของน้ำ อย่างไรก็ตามผงยางรถยนต์ขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก การบดผสมเข้ากับยางจะทำให้ยากขึ้นและมีราคาแพงขึ้น ดังนั้นจึงทำการศึกษาขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ 10 และ 40 เมซ เพื่อหาขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ท่อน้ำซึมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำเหมาะสมกับการใช้งาน

จากผลการศึกษาเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซึมโดยใช้เครื่องวัดการเชื่อมโยง (ODR) แสดงดังภาคผนวก ข รูปที่ ข.5 พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ใหญ่ขึ้น เวลาการเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวสัมผัสน้อยลง เมื่อผสมกับยางจึงเกิดการยึดเกาะของยางบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างผงยางรถยนต์น้อยลง ทำให้สารเชื่อมโยงและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงบางส่วนสามารถแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างของโครงสร้างผงยางรถยนต์มากขึ้น ปริมาณสารเชื่อมโยงและสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่กระจายในอนุภาคยางน้อยลง เป็นผลให้ยางเกิดการเชื่อมโยงช้าลง

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์โดยมีองค์ประกอบของยางธรรมชาติ (NR) ปริมาณ 40 ส่วนโดยน้ำหนัก ผสมกับผงยางรถยนต์ (GRT) ปริมาณ 60 ส่วนโดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณไดโนโตรโซเพนตะเมทิลินเตตระมีน (DNPT) 3 ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ และปริมาณเคมีดำ 50 phr (ส่วนโดยน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ) เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที ผลของขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่อสมบัติเชิงกล (ก่อนและหลังการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง) สมบัติทางกายภาพ อัตราการซึมผ่านของน้ำและสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.43 - 4.52 และตารางที่ 4.1

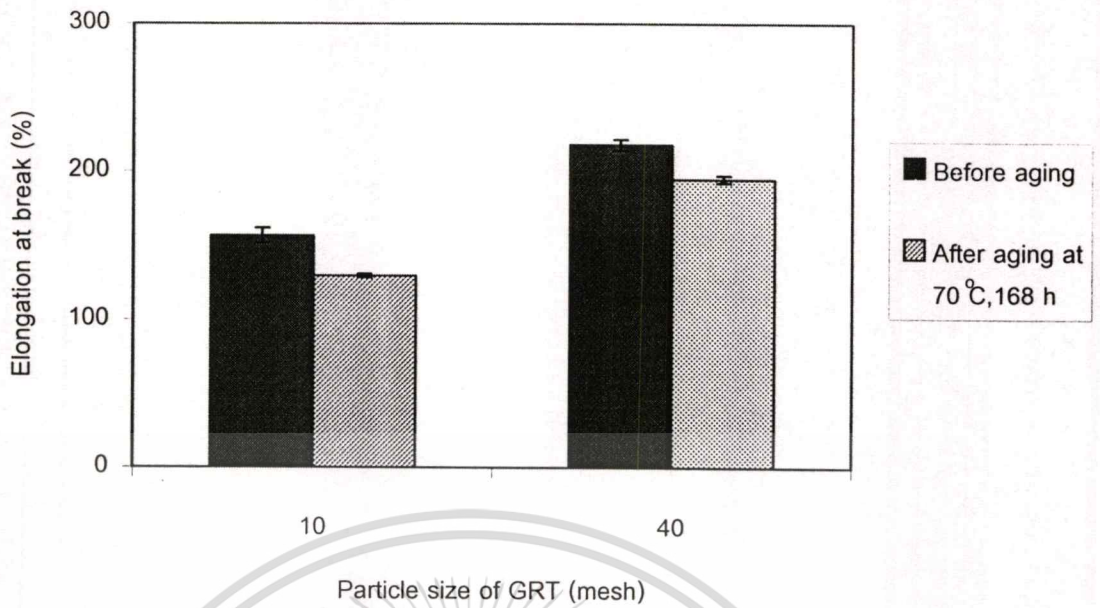


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4(100 °C)) ของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

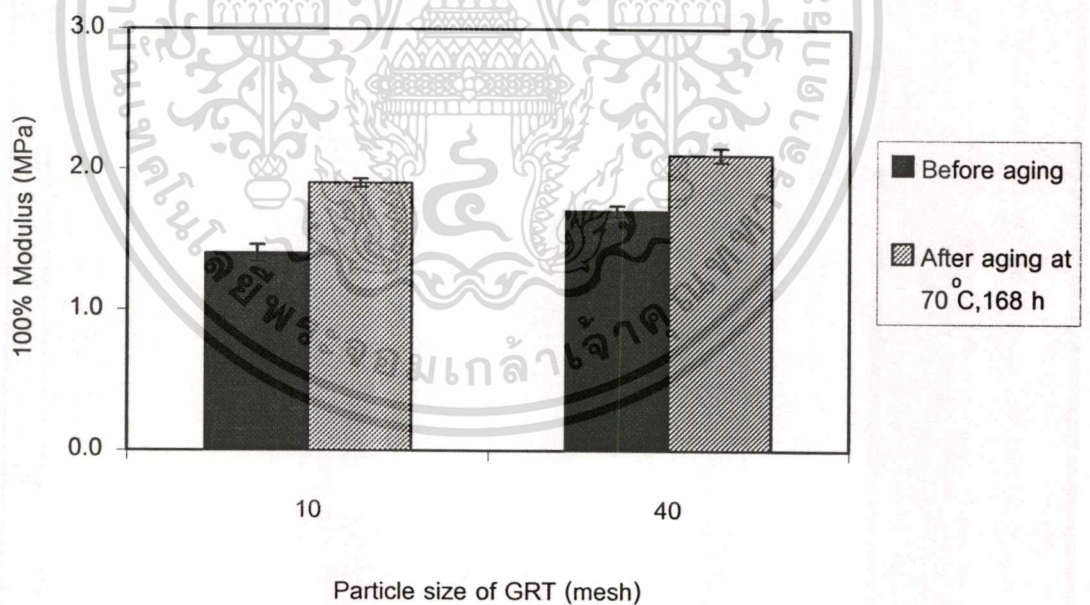


รูปที่ 4.44 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

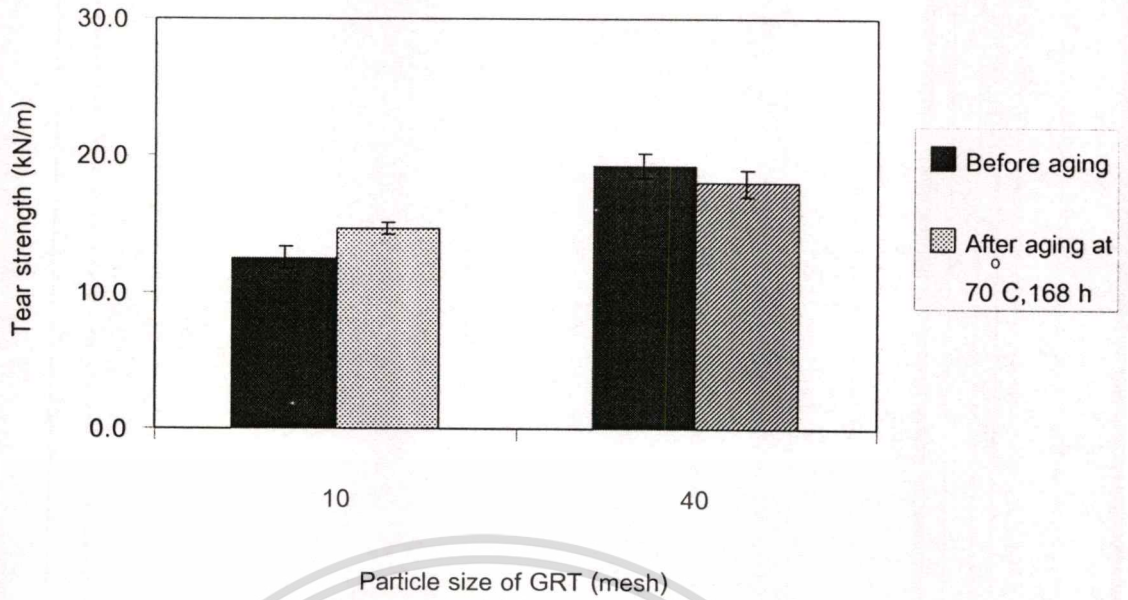


รูปที่ 4.45 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

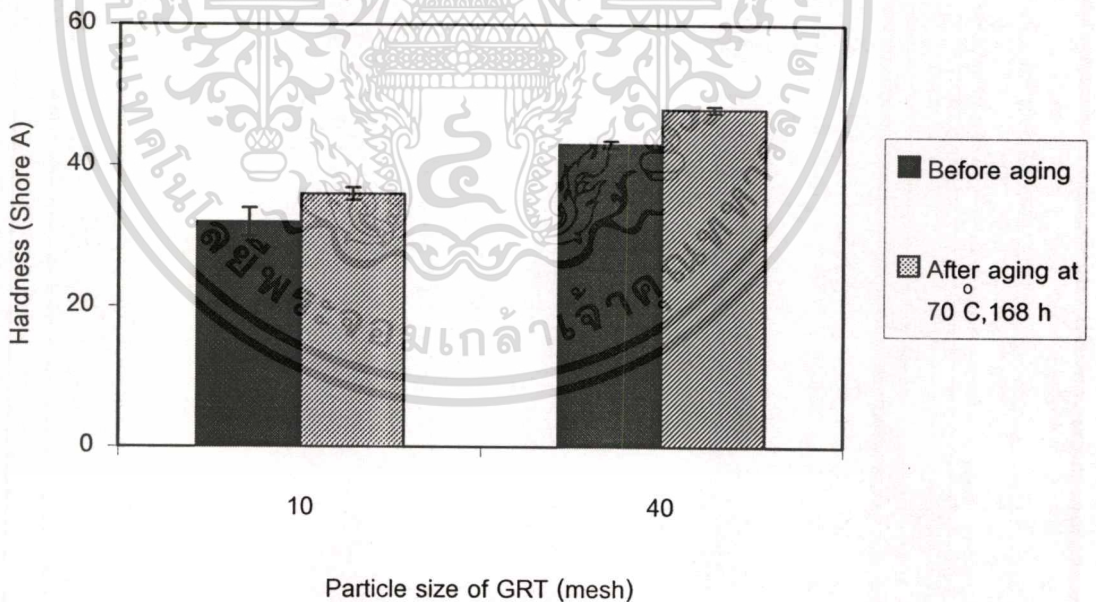


รูปที่ 4.46 กราฟแสดงค่ามอดูลัสที่ 100% ก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

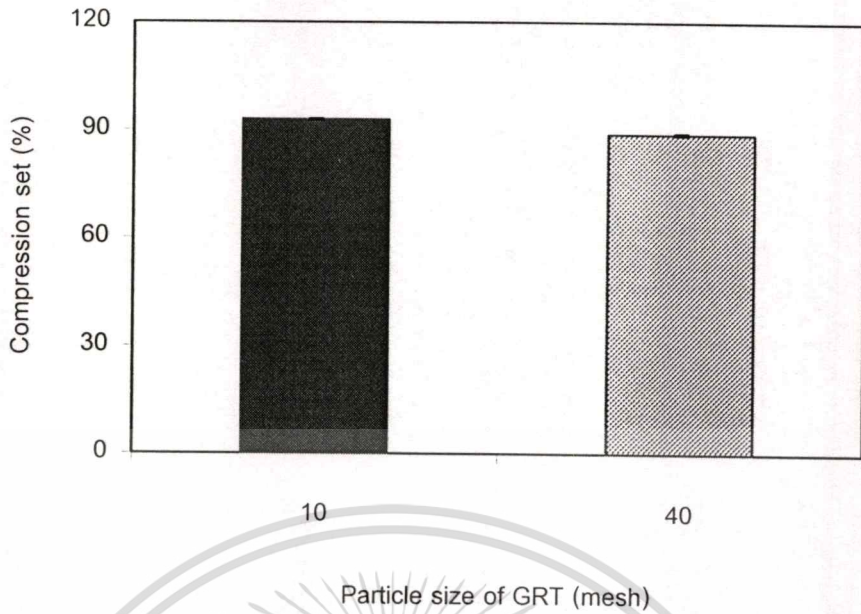


รูปที่ 4.47 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงฉีกขาดก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน



รูปที่ 4.48 กราฟแสดงค่าความแข็งกดก่อนและหลังการบ่มแรงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) ก่อนและหลังการบ่มแรง เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

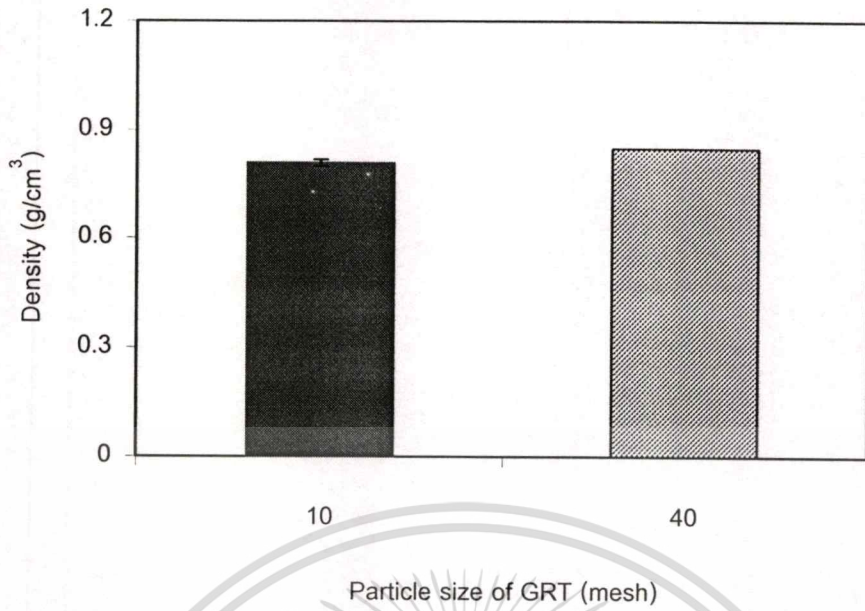
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



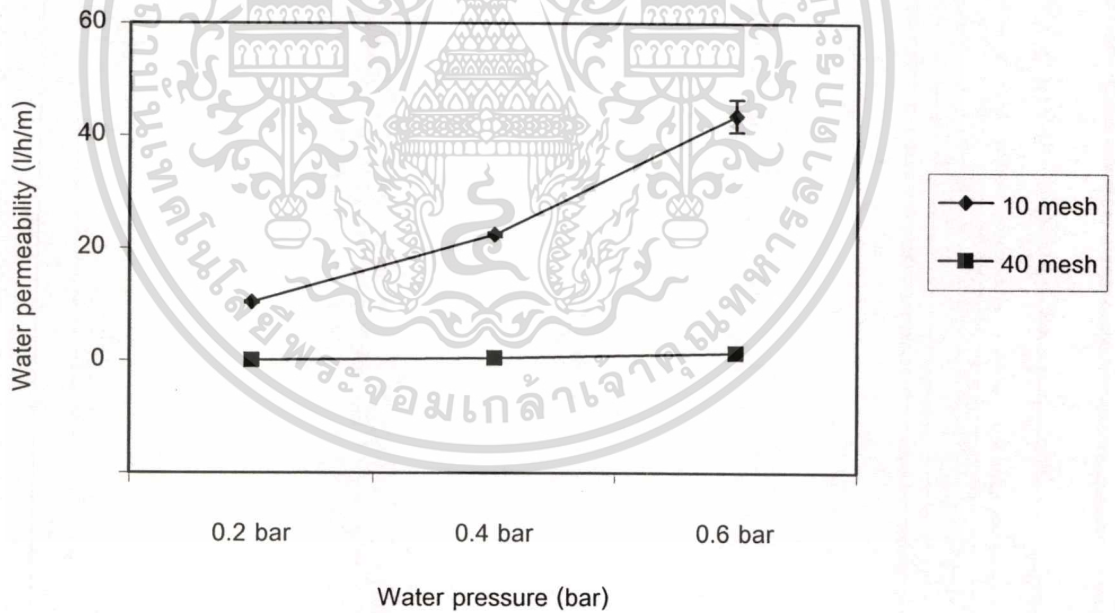
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.43 – 4.49 แสดงผลการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 10 และ 40 เมช ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล จะเห็นว่าเมื่อขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ลดลงจาก 10 เมช เป็น 40 เมช สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความหนืดมูนิ ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด มอดุลัส ที่ 100% ความแข็งแรงฉีกขาดและความแข็งกด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผงยางรถยนต์เป็นยางที่ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงแล้ว จึงมีโครงสร้างเป็นร่างแหสามมิติ ดังนั้นจึงทำหน้าที่เหมือนสารตัวเติม (Filler) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนกลม มีรูปร่างไม่แน่นอน แต่ละก้อนติดกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ (Agglomerates) และมีช่องว่างระหว่างกลุ่มก้อน เมื่อผสมกับยางจึงทำให้เกิดอันตรกิริยากับยาง โดยเกิดการยึดเกาะบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของผงยางรถยนต์ ดังนั้นเมื่อขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ลดลง พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อผสมกับยางจึงทำให้เกิดการยึดเกาะบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของผงยางรถยนต์มากขึ้น เป็นผลให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งของชิ้นงานที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันคือ มีสมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มเร่งมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในการทดลองจะใช้ 6PPD เป็นสารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidant) ปริมาณ 1 phr ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันการถูกออกซิเดชันได้ดี ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูปที่ 4.50 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน



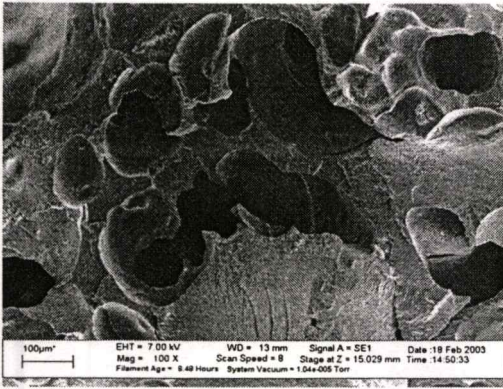
รูปที่ 4.51 กราฟแสดงค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

จากรูปที่ 4.50 – 4.51 จะเห็นว่าผลของความหนาแน่นสอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านของน้ำ กล่าวคือ เมื่อขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ลดลง ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง เนื่องจากเมื่อขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ลดลง ความหนืดของยางเพิ่มขึ้น ทำให้ฟองก๊าซที่เกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT เมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถขยายตัวได้น้อย ทำให้ชิ้นงานมีรูพรุนขนาดเล็กลงและมีความต่อเนื่องกันน้อย เป็นผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง นอกจากนี้้อาจเกิดจากเมื่อขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ลดลง ช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงยางรถยนต์จะน้อยลง เป็นผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และอัตราการซึมผ่านของน้ำลดลง

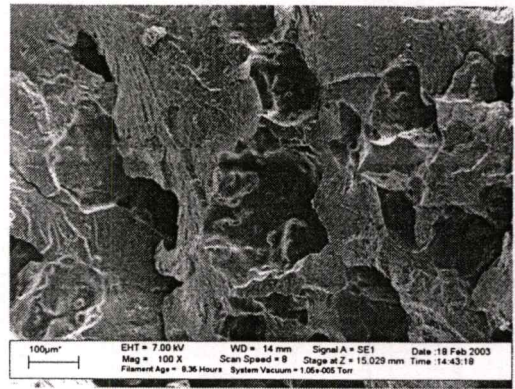
ตารางที่ 4.1 ความต้านทานต่อไอโซนของท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

ขนาดอนุภาคผงยางรถยนต์ (เมช)	ความต้านทานไอโซนที่ 50 pphm, 40 °C, ระยะยัด 20%, 72 ชม.
10	เกิดรอยแตกจำนวนมาก ความยาวรอยแตก 1 – 3 มิลลิเมตร
40	เกิดรอยแตกจำนวนมาก ความยาวรอยแตก 1 – 3 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบความต้านทานไอโซนของท่อน้ำซึมที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน จะเห็นว่าชิ้นงานทั้งสองมีความต้านทานต่อไอโซนในระดับเดียวกันคือ เกิดรอยแตกจำนวนมาก ความยาวรอยแตก 1 – 3 มิลลิเมตร ซึ่งรอยแตกที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับแนวการยัด ถึงแม้ว่าจะมีการใส่ซีเมนต์โรตโรเลียนปริมาณ 2 phr เพื่อป้องกันไอโซน แต่ชิ้นงานยังมีรอยแตกเกิดขึ้นจำนวนมาก เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะเป็นรูพรุนภายในชิ้นงาน เมื่อทำการทดสอบจะมีการยัดชิ้นงานออกไประดับหนึ่ง จึงทำให้รูพรุนภายในชิ้นงานเกิดการยัดขยายไปตามแนวแรง ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดรอยแตกจำนวนมาก



รูป ก



รูป ข

รูปที่ 4.52 SEM Micrographs แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมแตกหักที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน (รูป ก - ข ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 10 และ 40 เมช ตามลำดับ)

จากรูปที่ 4.52 แสดงสัณฐานวิทยาของท่อน้ำซึมที่มีขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกันคือ 10 และ 40 เมช จะเห็นว่าทั้งสองชิ้นงานมีรูพรุนเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารให้ฟอง DNPT ในวัฏภาคของยางธรรมชาติ โดยที่ชิ้นงานที่มีขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 10 เมช ดังรูปที่ 4.52 ก จะมีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และมีความต่อเนื่องกันมาก ส่วนชิ้นงานที่มีขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 40 เมช ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ดังรูปที่ 4.52 ข จะเห็นว่าชิ้นงานมีรูพรุนขนาดใหญ่แต่มีความต่อเนื่องกันน้อย ซึ่งสัณฐานวิทยาดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำ

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน พบว่าที่ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 40 เมช มีสมบัติเชิงกลดีกว่าที่ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 10 เมช และมีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ที่เหมาะสมกับการผลิตท่อน้ำซึมคือ ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 40 เมช

4.6 ผลของความยาวท่อต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

4.6.1 การศึกษาความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อ

จากการศึกษาความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อคือ 30 และ 60 เซนติเมตร โดยความดันน้ำเริ่มต้นที่ใช้คือ 0.6, 0.8 และ 1.0 บาร์ และท่อน้ำซึมที่ใช้ทดสอบคือ A ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:50) และ B ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) ผลของความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อ แสดงดังตารางที่ 4.2

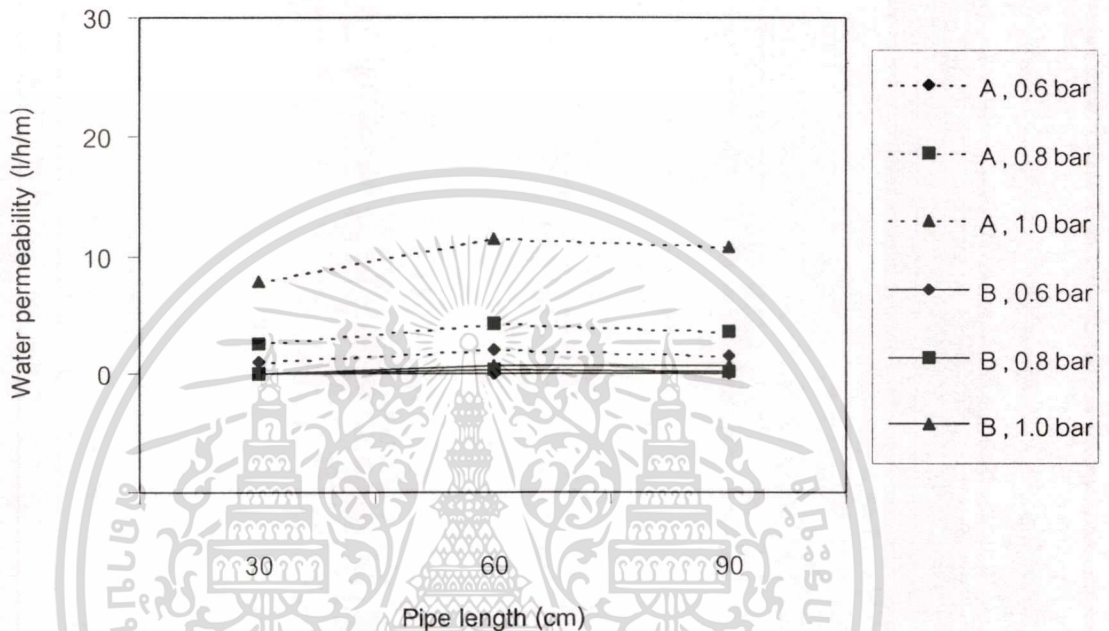
ตารางที่ 4.2 ความดันน้ำแต่ละตำแหน่งของความยาวท่อ เมื่อใช้ความดันน้ำเริ่มต้นต่างกัน

ความดันน้ำเริ่มต้น (บาร์)	ตำแหน่งของความยาวท่อ (เซนติเมตร)	อัตราส่วน NR:GRT:DNPT:C-black	ความดันน้ำที่วัดได้ (บาร์)
0.6	30	30:70:3:50	0.60
		40:60:3:50	0.60
	60	30:70:3:50	0.62
		40:60:3:50	0.58
0.8	30	30:70:3:50	0.80
		40:60:3:50	0.80
	60	30:70:3:50	0.80
		40:60:3:50	0.78
1.0	30	30:70:3:50	1.00
		40:60:3:50	1.00
	60	30:70:3:50	1.00
		40:60:3:50	0.99

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าท่อน้ำซึมทั้งสองตัวอย่างมีความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อ เมื่อใช้ความดันน้ำเริ่มต้นต่างกันในลักษณะเดียวกันคือ ความดันน้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อ มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความดันน้ำเริ่มต้น แสดงว่าท่อน้ำซึมมีความดันลด (Pressure drop) น้อยมาก เมื่อท่อมีความยาวเพิ่มขึ้นจาก 30 เซนติเมตร เป็น 60 เซนติเมตร อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองเรื่องความดันลดของท่อน้ำซึมยังไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน เนื่องจากท่อน้ำซึมที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้แต่ละสูตรมีจำกัด

4.6.2 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความยาวท่อต่างกัน

จากการศึกษาอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความยาวท่อต่างกันคือ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยทดสอบที่ความดันต่างกันคือ 0.6, 0.8 และ 1.0 บาร์ และท่อน้ำซึมที่ใช้ทดสอบคือ A ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:50) และ B ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) ผลของอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความยาวท่อต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 กราฟแสดงอัตราการซึมผ่านของน้ำของท่อน้ำซึมที่มีความยาวท่อต่างกัน (A ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:50) และ B ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50))

จากรูปที่ 4.53 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านน้ำของท่อน้ำซึมที่มีความยาวท่อต่างกัน จะเห็นว่าท่อน้ำซึมทั้งสองสูตรมีอัตราการซึมผ่านน้ำในลักษณะเดียวกันคือ เมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านน้ำในแต่ละตำแหน่งของท่อมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากความยาวท่อที่ใช้ทดลองมีความยาวน้อย ทำให้ท่อมีความดันลด (Pressure drop) น้อยมาก ถ้าหากใช้ท่อที่มีความยาวเพิ่มขึ้น จะสามารถเห็นผลเรื่องความดันลดได้ชัดเจนขึ้น จากการศึกษ้อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความยาวท่อ 15 และ 30 เมตร [23] พบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำแปรผกผันกับความยาวท่อ เนื่องจากความดันน้ำลดลงตามความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น

4.7 สูตรสูตรที่เหมาะสมและสมบัติของท่อน้ำซึม

จากการทดลองพบว่า องค์ประกอบของวัตถุดิบและสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับการผลิตท่อน้ำซึม เพื่อให้ได้ท่อน้ำซึมที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งานคือ ท่อน้ำซึมที่ประกอบด้วย

- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ (NR) : ผงยางรถยนต์ (GRT) คือ 40:60
- ปริมาณสารให้ฟองไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) 3 ส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์
- ปริมาณเขม่าดำ 50 phr (ส่วนโดยน้ำหนักของยางธรรมชาติ)
- ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ 40 เมช

ทำการบดผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ที่อุณหภูมิการผสม 70 °C และขึ้นรูปเป็นท่อด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่อุณหภูมิ 90 °C ความเร็วรอบ 30 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเชื่อมยางท่อด้วยเครื่องอบความร้อนอุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที โดยท่อที่ผลิตได้จะเป็นท่อที่มีรูพรุน สีดำ ผิวเรียบ สามารถโค้งงอได้และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร สมบัติบางประการของท่อน้ำซึมที่ผลิตได้ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติบางประการของท่อน้ำซีเมนต์

สมบัติของท่อน้ำซีเมนต์	ผลที่ได้
ความหนืดมูนิ (ML1+4 (100 °C))	91.9
ความแข็งแรงดึง (MPa)	4.6
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	218
มอดุลัสที่ 100% (MPa)	1.7
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	19.3
ความแข็งกด (Shore A)	43
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ 100 °C, 22 h (%)	89
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.85
ความต้านทานต่อไอโซนที่ 50 pphm, 40 °C, 20%, 72 h	เกิดรอยแตกจำนวนมาก ความยาวรอยแตก 1 – 3 มิลลิเมตร
อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ความดันต่างๆ (l/h/m)	
- 0.2 bar	0.05
- 0.4 bar	0.49
- 0.6 bar	1.41
หลังการบ่มเร่ง (Aging) ที่ 70 °C, 168 h	
ความแข็งแรงดึง (MPa)	4.8
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	195
มอดุลัสที่ 100% (MPa)	2.1
ความแข็งแรงฉีกขาด (kN/m)	18.1
ความแข็งกด (Shore A)	48

4.8 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะเลือกใช้ท่อน้ำซีเมนต์ที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งานคือ ท่อน้ำซีเมนต์ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black เท่ากับ 40:60:3:50 โดยวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ซึ่งสามารถผลิตท่อน้ำซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 20 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ได้ความยาวท่อ 7.3 เมตร (การหาความยาวท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม แสดงดังภาคผนวก ค) แสดงดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย ¹	เป็นเงิน(บาท)
1. ยางแผ่นรมควันชั้น 2	301.2 กรัม	40.38 บาท/กก.	12.16
2. ผงยางรถยนต์ (ขนาด 40 เมช)	451.8 กรัม	3 บาท/กก.	1.36
3. ซิงค์ออกไซด์	15.1 กรัม	58 บาท/กก.	0.88
4. กรดสเดียริก	6.0 กรัม	23 บาท/กก.	0.14
5. CBS	3.0 กรัม	135 บาท/กก.	0.41
6. TMTD	1.5 กรัม	118 บาท/กก.	0.18
7. เขม่าดำ (N550)	150.6 กรัม	27 บาท/กก.	4.07
8. น้ำมันแพททานิก	9.0 กรัม	68 บาท/กก.	0.61
9. 6PPD	3.0 กรัม	230 บาท/กก.	0.69
10. ซีเมนต์โพโรไลยม	6.0 กรัม	50 บาท/กก.	0.30
11. DNPT	22.6 กรัม	184 บาท/กก.	4.16
12. ยูเรีย	22.6 กรัม	136 บาท/กก.	3.07
13. กำมะถัน	7.6 กรัม	10.50 บาท/กก.	0.08
14. ค่าแรง	1 ชั่วโมง	165 บาท/วัน ²	20.63
15. ค่าไฟฟ้า	10 หน่วย	2.5 บาท/หน่วย	25.00
16. เบ็ดเตล็ด	-	-	5.00
รวมต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (7.3 เมตร) ³			78.74

หมายเหตุ ¹ เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือนตุลาคม 2546

² คิดค่าแรงตามค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน

³ราคานี้ไม่รวมต้นทุนเครื่องจักรการผลิต และค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร

จากตารางที่ 4.4 แสดงถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของท่อน้ำซีเมนต์ จะเห็นว่าการนำผงยางรถยนต์มาใช้เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ นอกจากจะช่วยให้เกิดรูปทรงภายในท่อน้ำซีเมนต์ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากผงยางรถยนต์มีราคาถูกกว่ายางธรรมชาติมากกว่า 10 เท่า และใช้ปริมาณมากคือ 60% เมื่อเทียบกับปริมาณยางธรรมชาติ เมื่อประมาณต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ปริมาณ 1 กิโลกรัม ได้ท่อน้ำซีเมนต์ประมาณ 7.3 เมตร ใช้ต้นทุนประมาณ 79 บาท กล่าวคือ ต้นทุนการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ประมาณ 10.7 บาทต่อหนึ่งเมตร ซึ่งนับว่าต้นทุนการผลิตต่ำ ราคาถูกเทียบกับท่อพีวีซี (PVC) ขนาดเดียวกันที่มีราคาขายปลีกประมาณ 89 บาทต่อหนึ่งเมตร [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการผลิตท่อน้ำซีเมนต์จากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการผลิตท่อน้ำซึมจากยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดียว สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของท่อน้ำซึม

- เมื่ออุณหภูมิการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เวลาการเชื่อมโยงจะลดลง ส่วนอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและความแข็งแรงฉีกขาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจุดหนึ่ง จากนั้นสมบัติเหล่านี้จะลดลง ส่วนมอดุลัสและความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
- การเติมเขม่าดำเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของท่อน้ำซึม พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปริมาณเขม่าดำมากกว่า 50 phr จะทำให้สมบัติเหล่านี้ลดลง มอดุลัส ความแข็งกดและความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง สันฐานวิทยาขึ้นอยู่กับปริมาณเขม่าดำ
- ปริมาณสารให้ฟองไดไนโตรโซเพนตะเมทิลีนเตตระมีน (DNPT) ที่ทำให้ท่อน้ำซึมมีสมบัติที่ดีและมีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่เหมาะสมกับการใช้งานคือ 3% โดยน้ำหนักของยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ ส่วนสันฐานวิทยาขึ้นอยู่กับปริมาณสารให้ฟอง
- อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ลดลง สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง ส่วนอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น
- เมื่อขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ลดลง สมบัติเชิงกลและความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง สมบัติเชิงกลก่อนและหลังการบ่มแรง (Hot air aging) มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และมีความต้านทานต่อไอโซนน้อย
- เมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้นในช่วง 30 – 60 เซนติเมตร อัตราการซึมผ่านน้ำแต่ละตำแหน่งของท่อมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน เนื่องจากความดันน้ำแต่ละตำแหน่งของท่อมีค่าใกล้เคียงกัน
- จากการผลิตท่อน้ำซึมพบว่าสูตรที่เหมาะสมต่อการผลิตและมีสมบัติเชิงกลที่ดีและอัตราการซึมผ่านของน้ำใกล้เคียงกับการใช้งานจริงประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black เท่ากับ 40:60:3:50 เชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 20 นาที โดยมีต้นทุนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 79 บาท/กิโลกรัม ท่อน้ำซีเมนต์ที่ผลิตได้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานบนดิน สำหรับการให้น้ำแก่ต้นกล้า สวนหย่อม สวนซา กาแฟ ฯลฯ สามารถปรับอัตราการซีเมนต์ผ่านของน้ำให้เหมาะสมกับการใช้งานแต่ละประเภทโดยการปรับความดันของน้ำที่ใช้ และมีความเป็นไปได้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยการผลิตท่อน้ำซีเมนต์ สามารถสรุปข้อเสนอแนะต่างๆ ที่น่าสนใจที่อาจเป็นแนวทางในการทำการศึกษาวิจัยต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างสารให้ฟองและคิกเกอร์ (เช่น DNPT/ยูเรีย) ต่อคุณสมบัติการสลายตัวของ DNPT ระยะเวลาการเชื่อมโยง (Cure time และ Scorch time) และสมบัติเชิงกลของท่อน้ำซีเมนต์
2. ศึกษาผลของสารให้ฟองชนิดอื่นๆ เช่น สารไฮโดรคาร์บอนาไมด์ (AZ)
3. ศึกษาผลของสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เช่น ดินขาว (Kaolin) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ฯลฯ
4. ศึกษาผลของความยาวท่อต่ออัตราการซีเมนต์ผ่านของน้ำ โดยใช้ท่อที่มีความยาวมากขึ้น เพื่อให้เห็นผลได้ชัดเจน เช่น 10 เมตร, 15 เมตร ฯลฯ
5. ศึกษาการเชื่อมโยงท่อน้ำซีเมนต์ด้วยวิธีอื่น เช่น การเชื่อมโยงด้วยไอน้ำร้อน (Steam)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rubber Research Institute. "Statistic." [Online] Available :
<http://www.Rubberthai.com>. 2003.
- [2] Rao P.P. "Sustainable Management of Used Tyres." The Rubber International., vol. 4, no. 1, August 2002. pp. 54-57.
- [3] Adhikari B., De D. and Maiti S. "Reclamation and Recycling of Waste Rubber." Progress in Polymer., vol. 25, no. 7, 2000. pp. 909-948.
- [4] อธิพิณ แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีการยาง. ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [5] International Rubber Quality and Packing Conferences. International Standards of Quality and Packing for Natural Rubber Grades (The Green Book). New York : The Rubber Manufacturers Association, Inc. 1969.
- [6] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2528.
- [7] Hofmann W. Rubber Technology Handbook. Munich : Hanser Publishers. 1989.
- [8] Dongjin Semichem. Dongjin Chemical. Dongjin Semichem Co.Ltd. 2001.
- [9] Blow C.M. Rubber Technology and Manufacture. London : Butterworth & Co. Publication Ltd. 1971.
- [10] บุญธรรม นิธิอุทัย, ปรีชา บ่อภัย. คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
- [11] อธิพิณ แจ่มชัด. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [12] Mark J.E., Erman B. and Eirich F.R. Science and Technology of Rubber. 2nd Ed. New York : Academic Press, Inc. 1994.
- [13] ชลดา เลวิส, สาโรช ช่างชุม. "การศึกษาชนิดและปริมาณของสารฟู่และสารกระตุ้นในยาง. ยางและพอลิเมอร์, ฉบับที่ 2, 2541.
- [14] Dutta A., Cakmark M. "Influence of Composition and Processing History on the Cellular Morphology of the Foamed Olefinic Thermoplastic Elastomers." Rubber Chemistry and Technology., vol. 65, no. 5, 1992. pp. 932-955.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] Huang Q., Klotzer R., Seibig B. and Paul D. "Extrusion of Microcellular Polysulfone Using Chemical Blowing Agents" *Journal of Applied Polymer Science.*, vol. 69, 1998 pp. 1753-1760.
- [16] ดาริน นิลทรงกลด. "การเตรียมยางไมโครเซลลูลาร์จากยางธรรมชาติ." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย* 2542.
- [17] Rajalingam P., Shape J. and Baker W.E. "Ground Rubber Tire / Thermoplastic Composites : Effect of Different Ground Rubber Tires" *Rubber Chemistry and Technology.*, vol. 66, no. 4, 1993. pp. 664-677.
- [18] Balogh G., Samay G. "Possibilities of Recycling Tyre Waste." *International Polymer Science and Technology.*, vol. 23, no. 11, 1996. pp. 86-91.
- [19] Tipanna M., Kale D.D. "Composites of Waste, Ground Rubber Particles and Poly (Vinyl Chloride)." *Rubber Chemistry and Technology.*, vol. 70, no. 5, 1997. pp. 815-819.
- [20] Han M.H. "Ground Rubber Criteria – for the Use in Tire Stock Compounds." *International Seminar on Elastomer, Bangkok, Thailand, December 1998.*
- [21] Kim J.K., Burford R.P. "Study on Power Utilization of Waste Tires as a Filler in Rubber Compounding." *Rubber Chemistry and Technology.*, vol. 71, no. 5, 1998. pp. 1028-1041.
- [22] พลชิต บัวแก้ว และคณะ. "การผลิตท่อน้ำหยดใช้ในสวน." *รายงานผลการวิจัยเรื่องเต็มประจำปี 2543. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.*
- [23] Kowalska E., Wielgosz Z. "Scrap Rubber Reused – A New Process Produces Porous Pipes from Worn-out Tyres." *Polymer Recycling.*, vol. 2, no. 3, 1996. pp. 213-219.
- [24] ยุทธพงษ์ แซ่ตั้ง, อลงกรณ์ ศิลปชำนาญ "การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ." *โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.* 2543.
- [25] คนัมพร สวัสดิ์ชุมพล, จงจิตร ลาภนิกรชัย และฉัตรมณี ชันทอง. "การปรับปรุงสมบัติท่อน้ำซึมจากผงยางรถยนต์และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น." *โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า*

- เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [26] สัจจะชัย สัจจะธนะสกุล. "การศึกษาท่อน้ำซึมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและ
ผยงารวดยนต์ที่ใช้แล้ว." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [27] ฟ้าดุขฎี พงษ์พิมาย และภัทรพร อินทเกษ. "ท่อน้ำซึมจาก GRT/HDPE : สมบัติการไหลและ
การซึมน้ำ." โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์,
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [28] ภัฏญญาณี แสงเกียรติยุทธ. "การศึกษาเพื่อหาแนวทางการผลิตท่อน้ำซึมจากผยงารวดยนต์
กับพอลิไวนิลคลอไรด์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม
ปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
2545.
- [29] Leaky Pipe Systems. "Porous Hoses." [Online] Available :
<http://www.leakypipe.co.uk>. 2003.
- [30] Micro-flo Industries. "Micro-flo Moisture Control System." [Online] Available :
<http://www.micro-flo.com>. 2003.
- [31] ASTM D 2084 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber Property
– Vulcanization Using Oscillating Disk Cure Meter.", Philadelphia : American
Society for Testing and Materials., 1993.
- [32] ASTM D 1646 Committee on standard "Standard Test Methods for Rubber -
Viscosity, Stress Relaxation, and Pre - Vulcanization Characteristics (Mooney
Viscometer).", Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1994.
- [33] ASTM D 412 Committee on standard "Standard Test Methods for Vulcanized
Rubber and Thermoplastic Rubbers and Thermoplastic Elastomers-Tension.",
Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [34] ASTM D 624 Committee on standard "Standard Test Method for Tear Strength of
Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers.", Philadelphia
: American Society for Testing and Materials., 1991.
- [35] ASTM D 2240 Committee on standard "Standard Test Method for Rubber
Property - Durometer Hardness.", Philadelphia : American Society for Testing
and Materials., 1991.
- [36] ASTM D 395 Committee on standard "Standard Test Methods for Rubber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Property - Compression Set.”, Philadelphia : American Society for Testing and Materials., 1989.

[37] ISO 1431/1 Committee on standard “Rubber, vulcanized - Resistance to ozone cracking – Part 1 : Static strain test.”, Switzerland : International Organization for Standardization., 1984.

[38] Morton M. The Rubber Technology. 2nd Ed. New York : Van Nostrond Reinhold Company. 1895.

[39] Flexible PVC . [Online] Available : <http://www.FlexPVC.com>. 2003.

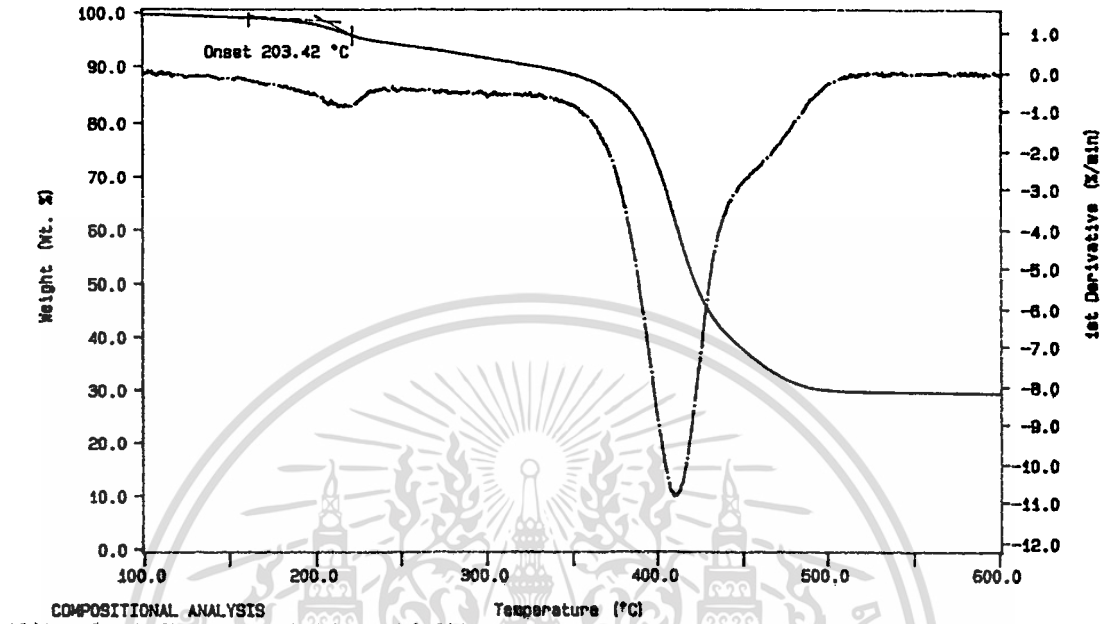
[40] สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. คู่มือเทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ. 2545.



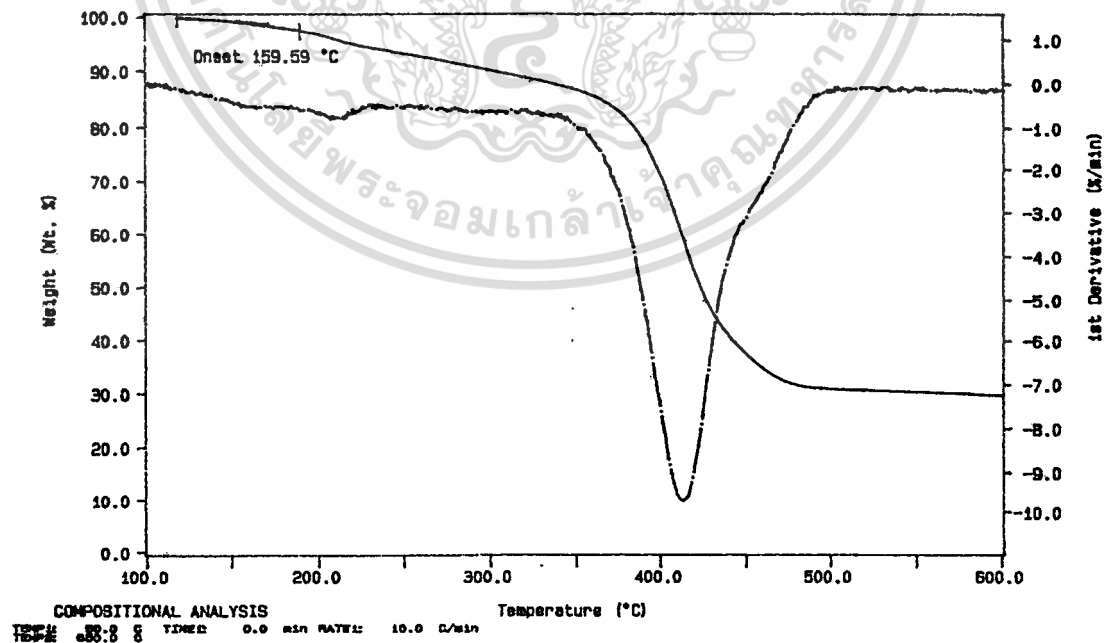
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตร



รูปที่ ก.1 อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตรที่มี DNPT เป็นสารให้ฟอง

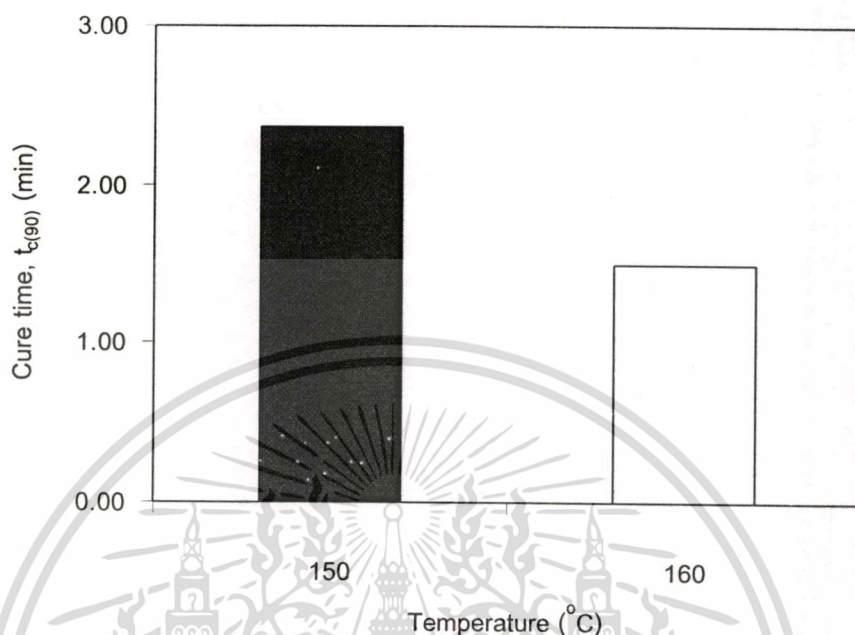


รูปที่ ก.2 อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมสูตรที่มี DNPT เป็นสารให้ฟองและยูเรียเป็นสารกระตุ้น

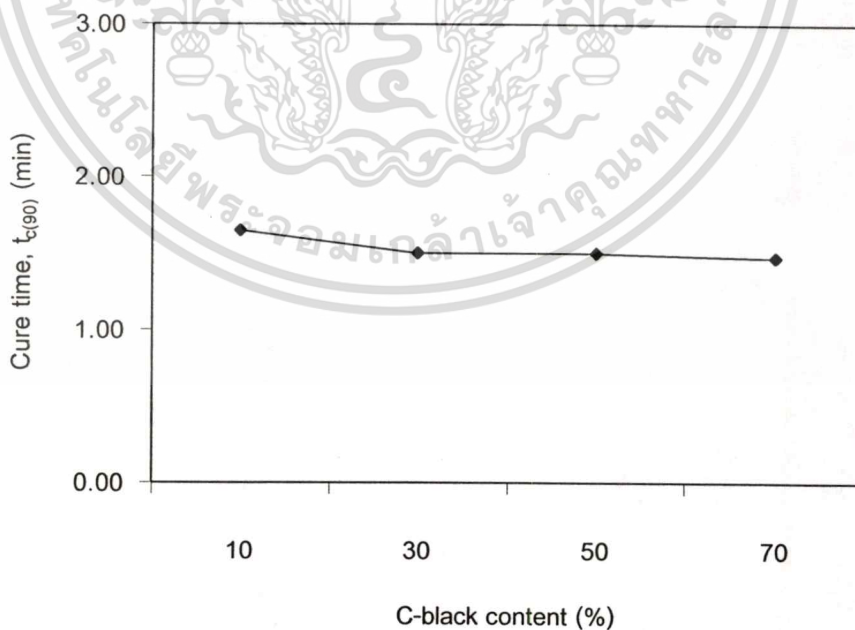
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีม

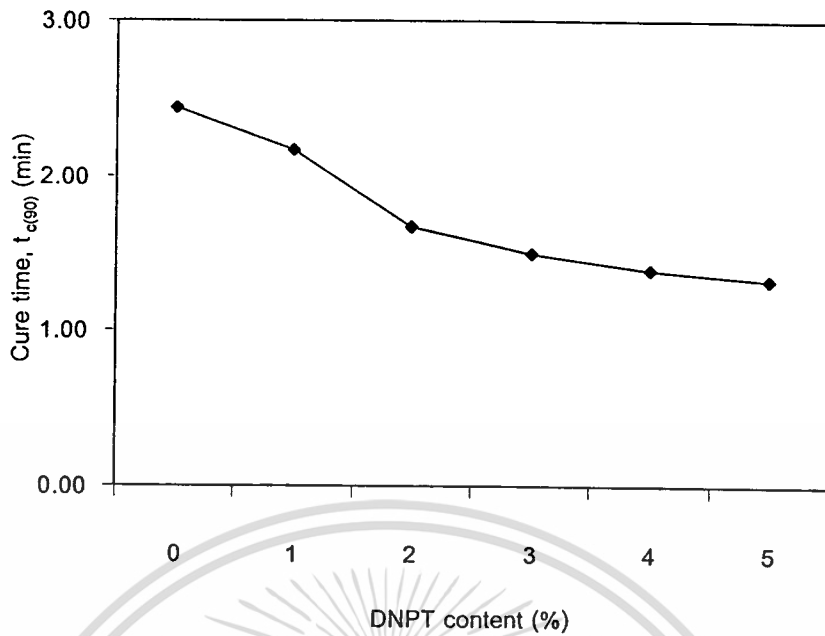


รูปที่ ข.1 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (30:70:3:30) เมื่อใช้อุณหภูมิการเชื่อมโยงต่างกัน

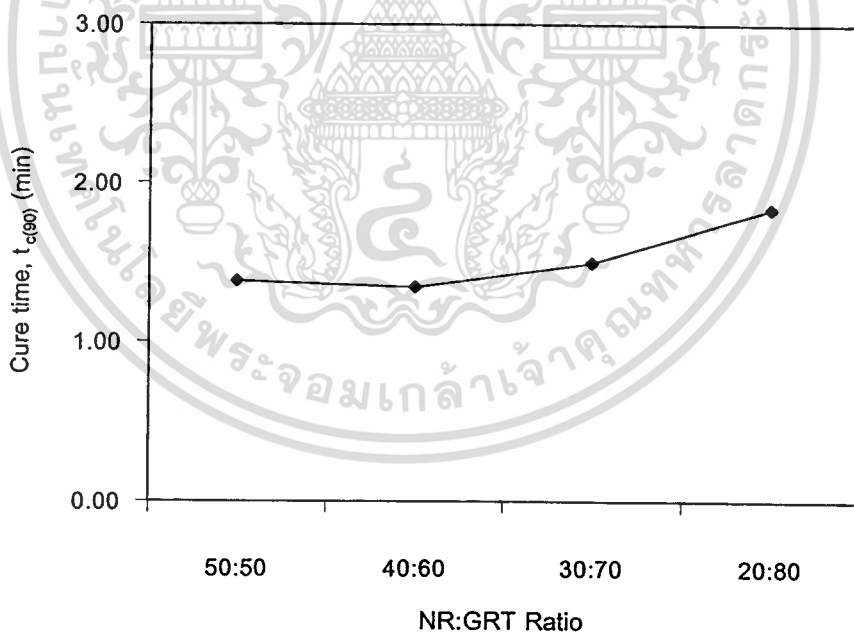


รูปที่ ข.2 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีมที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT (30:70:3) เมื่อใช้ปริมาณเขม่าดำต่างกัน

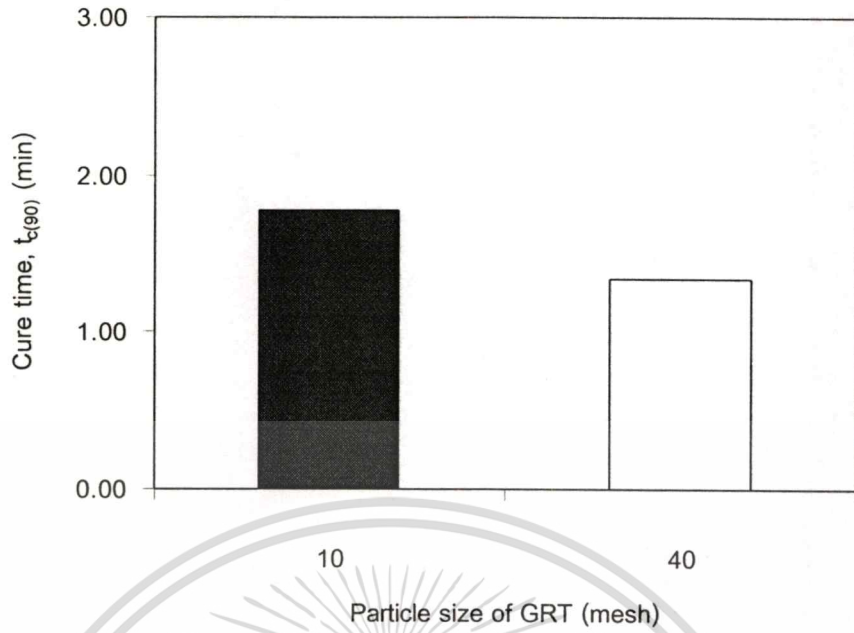
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:C-black (30:70:50) เมื่อใช้ปริมาณสารให้ฟองต่างกัน



รูปที่ ข.4 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย DNPT:C-black (3:50) เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและผงยางรถยนต์ต่างกัน



รูปที่ ข.5 กราฟแสดงเวลาการเชื่อมโยงของท่อน้ำซีเมนต์ที่ประกอบด้วย NR:GRT:DNPT:C-black (40:60:3:50) เมื่อใช้ขนาดอนุภาคของผงยางรถยนต์ต่างกัน

ภาคผนวก ค

นิยามศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย [4,40]

1. ยางผสมสูตรหรือยางคอมปาวด์ (Rubber compound) หมายถึง ยางดิบที่ผสมสารเติมแต่ง (Additive) ต่างๆ เช่น สารเชื่อมโยง สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง สารตัวเติม ฯลฯ
2. การเชื่อมโยงยาง (Rubber vulcanization) หมายถึง กระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ บางครั้งอาจเรียกว่าการทำให้ยางสุก (Curing) หรือทำให้ยางคงรูป
3. สารตัวเติม (Filler) หมายถึง สารที่ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงให้ผลิตภัณฑ์และลดต้นทุน เช่น เขม่าดำ (Carbon black, CB) ซิลิกา (Silica) ฯลฯ
4. สารให้ฟอง (Blowing agent) หมายถึง สารที่สลายตัวให้ก๊าซออกมาเมื่อได้รับความร้อนขณะทำการเชื่อมโยงยาง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีรูพรุน เช่น ฟองน้ำยาง โฟม
5. ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet, RSS) หมายถึง ยางแผ่นที่ทำจากน้ำยางที่ทำให้เกิดการจับตัวด้วยกรด จากนั้นนำไปรีดให้เป็นแผ่น ล้างน้ำ และทำให้แห้งโดยใช้ควันไฟรม
6. การยุบตัวเนื่องจากแรงกด (Compression set) หมายถึง ความสามารถในการคืนตัวของยางหลังจากถูกอัดไว้ตามระยะเวลาและสภาวะที่กำหนด
7. การบ่มเร่ง (Aging) หมายถึง การทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสลายของยางในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางพิจารณาหรือคาดการณ์เกี่ยวกับอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์
8. phr (part per hundred of rubber) หมายถึง ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน
9. ppm (part per hundred million) หมายถึง ส่วนในหนึ่งร้อยล้านส่วน
10. CBS หมายถึง N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide
11. TMTD หมายถึง Tetramethylthiuram disulfide
12. DNPT หมายถึง N,N'-Dinitroso pentamethylene tetramine
13. 6PPD หมายถึง N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylene

ภาคผนวก ง

การหาความยาวท่อน้ำซึมที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของท่อน้ำซึม} = 0.85$$

$$\text{ปริมาตรของท่อน้ำซึม 1 กิโลกรัม} = 1000 / 0.85$$

$$= 1176.47 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อน้ำซึมเท่ากับ 2.0 และ 1.4 เซนติเมตร ตามลำดับ

ปริมาตรของท่อน้ำซึมยาว 1 เมตร

$$= \pi(r_1^2 - r_2^2)h$$

$$= \pi(1.0^2 - 0.7^2) \times 100$$

$$= 160.22 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

∴ ท่อน้ำซึมน้ำหนัก 1 กิโลกรัม มีความยาว

$$= 1176.47 / 160.22$$

$$= 7.34 \text{ เมตร}$$



ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุมนา แจ่มเหมือน เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2510 ที่จังหวัดตรัง

การศึกษา สำเร็จการศึกษาวិทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีการยาง) จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2534

การทำงาน ปัจจุบันดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 5 กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้