

การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของการรีดคอมพาวนด์หน้ายางและวัลคาไนเซชัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE OPTIMIZATION FOR TREAD COMPOUND EXTRUSION AND
VULCANIZATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาอนุหุุมิที่เหมาะสมที่สุดของการรีดคอมพาวนด์หน้า ยางและวัลคาไนเซชัน
โดย	น.ส.พรทิพา ประสงค์เงิน
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิมดำ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิมดำ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยันต์ ไชยยะ)	

พรทิพา ประสงค์เงิน : การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของการรีดคอมพาวนด์หน้ายาง และวัลคาไนเซชัน. (TEMPERATURE OPTIMIZATION FOR TREAD COMPOUND EXTRUSION AND VULCANIZATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประเสริฐ เรียบร้อย เจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.พงษ์ศักดิ์ นิมิตำ

กระบวนการหลักของการผลิตยางหล่อดอกคือกระบวนการคงรูปร่าง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพ การผลิตยางหล่อดอก งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหาอุณหภูมิการอัดรีดยางคอมพาวนด์ที่เหมาะสมในการคงรูปร่างสำหรับการผลิตในโรงงาน และศึกษาสมบัติของยางที่ผ่านการคงรูปร่างที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 140 150 และ 160 องศาเซลเซียส โดยให้มีระยะเวลาการเก็บยางคอมพาวนด์ก่อนคงรูปร่างเพื่อจำลองการเก็บรักษากรี๊นไทร์เป็นเวลา 1 5 และ 10 วัน ก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการคงรูปร่างเพื่อให้ได้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการจัดเก็บ ทดสอบหาค่าความหนืด หาปริมาณการเกิดเจลในยาง พฤติกรรมการคงรูปของยาง และ ค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยาง รวมไปถึงสมบัติทางกลโดยการหาค่าการต้านทานแรงดึง ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัส จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาสกอกรีช และระยะเวลาการคงรูปร่างลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการคงรูปและระยะเวลาในการเก็บยางคอมพาวนด์ก่อนการคงรูป ค่าการต้านทานแรงดึงแปรผันตามอุณหภูมิการคงรูป ค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวางลดลงเมื่ออุณหภูมิการอัดรีดและอุณหภูมิการคงรูปร่างคอมพาวนด์เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสที่ 300 % อย่างไรก็ตามการใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการคงรูปร่างส่งผลทำให้ยางสมบัติทางกลที่ต่ำ ได้ผลผลิตยางที่มีความแข็งแรงทนทานต่ำ ต้องใช้พลังงานไอน้ำในการให้ความร้อนสูง และสิ้นเปลืองเบลดเดอร์ ดังนั้นอุณหภูมิการอัดรีดยางคอมพาวนด์ที่ 50 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการคงรูปร่างที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้ระยะเวลาการคงรูปที่สั้นและยังคงคุณสมบัติทางกลของยางคอมพาวนด์ที่ดีซึ่งจำเป็นต่อการปรับปรุงกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตยางหล่อดอกเพื่อที่จะบรรลุความต้องการของลูกค้าในอนาคต

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต

เมอร์

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270070323 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Extrusion temperature Cure temperature Retread tire

Porntipa Prasongoen : TEMPERATURE OPTIMIZATION FOR TREAD COMPOUND EXTRUSION AND VULCANIZATION. Advisor: Assoc. Prof. Dr. PRASERT REUBROYCHAROEN Co-advisor: Asst. Prof. Dr. Pongsak Nimdum

The primary process of retread tire manufacturing is the curing process. It is the key process that affects tire productivity performance. The propose of this study to determine temperature optimal for tread compound extrusion and vulcanization, including to examine properties of rubber vulcanized via different temperature at 140, 150, and 160 °C. Green tire storage time for 1, 5, and 10 days before cured to find appropriate green tire aging limit. The viscosity, cure characteristic, %gel content and crosslink density were analyzed. The mechanical properties were inspected by tensile testing, elongation at break and modulus. The results indicated that scorch time and curing time slightly decrease with increasing the cure temperature and compound storage time. Gel fraction occurs in the rubber molecule after compound stored. The tensile value is a direct variation with curing temperature. Crosslink density decreases with increasing extrusion temperature and cure temperature showed a quite same trend for tensile strength and modulus at 300%. However, extrusion and curing temperature at 50 °C and 150 °C respectively, are optimized temperatures because too high cure temperature affects larger steam energy for heating into mold and bladder damaged faster. That condition provides shorter curing time and still have excellent mechanical properties. These findings are important for improving tire productivity to achieve customer demand.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความอนุเคราะห์ช่วยเหลือของบุคคลหลายฝ่าย และผู้จัดทำขออ้อมรับคำติชมพร้อมทั้งข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไข ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีส่วนช่วยให้ผู้ที่สนใจเรื่องการพัฒนาปรับปรุงอุณหภูมิในการอัดรีดและคงรูปคอมพาวนด์หน้ายางที่ส่งผลต่อการผลิตยางเครื่องปั้นหล่อดอกในโรงงานอุตสาหกรรม ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นตอบสนองต่อความต้องการของตลาดได้อย่างดี

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นิมิตา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะเกี่ยวกับข้อสงสัยต่าง ๆ ทางด้านวิชาการและการแก้ปัญหาด้านการดำเนินการอื่น ๆ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ บุญเกิด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ไชยยันต์ ไชยยะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้เกียรติเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้อย่างดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากโครงการบูรณาการ การเรียนรู้กับการทำงาน (Work-integrated Learning: WiL) จากสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.) ขอขอบพระคุณบริษัท กู๊ดเยียร์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ข้อมูลความรู้ เครื่องมือและวัสดุในการทำงานวิจัย รวมถึงคำแนะนำและความช่วยเหลือจากพี่ ๆ แผนกยางหล่อดอกเครื่องปั้น และ พี่ ๆ แผนกทดสอบคุณภาพประจำบริษัททุกคนที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

พรทิพา ประสงค์เงิน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1	1
1.1. มूलเหตุจูงใจ	1
1.2. วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3. ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	1
2.1 ยาง (Rubber) [3].....	1
2.1.1 ยางธรรมชาติ [3].....	2
2.1.2 ยางสังเคราะห์.....	2
2.2 ยางหลอดดอก [4].....	2
2.2.1 การหลอดดอกแบบเย็น	2
2.1.2 การหลอดดอกแบบร้อน.....	3
2.3 การคงรูปยางหลอดดอก [4].....	3
2.4 วัลคาไนเซชัน [6].....	4

2.5	กระบวนการอัดรีดยาง (Rubber extrusion) [9] [10]	6
2.6	การวิเคราะห์สภาพโครงสร้าง (Shearography) [11] [12].....	8
2.7	การตรวจสอบคุณภาพของยางคอมพาวนด์.....	9
2.7.1.	การทดสอบค่าความหนืด (Mooney viscosity) [7].....	9
2.7.2.	การทดสอบพฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristics) [7].....	10
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
บทที่ 3	17
3.1.	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	17
3.2.	สารตั้งต้นและสารเคมี.....	17
3.3.	การดำเนินงานวิจัย.....	17
3.3.1.	การอัดรีดคอมพาวนด์หน้ายาง.....	17
3.3.2.	การทดสอบความหนืด (Mooney viscosity).....	18
3.3.3.	การทดสอบพฤติกรรมการคงรูปยาง (Cure characteristic)	19
3.3.4.	การทดสอบความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางและการเกิดเจล [17]	19
3.3.5.	การทดสอบแรงดึง	20
3.3.6.	การวิเคราะห์สภาพโครงสร้าง	21
3.3.7.	การตรวจสอบลักษณะภายนอกยาง	22
บทที่ 4	23
4.1	ผลกระทบของอุณหภูมิการอัดรีดคอมพาวนด์ที่มีต่อค่าความหนืด (Mooney Viscosity).....	23
4.2	ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการคงรูป	24
4.3	ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นการเชื่อมขวางและสมบัติทางกล [19].....	25
4.4	ผลของการตรวจสอบสภาพโครงสร้าง	28
4.5	ผลของอุณหภูมิการคงรูปยางต่อต้นทุนการผลิตยางล้อดอก.....	31
บทที่ 5	32

5.1 สรุปผลการทดลอง.....	32
5.2 ข้อเสนอแนะ	32
บรรณานุกรม.....	33
ภาคผนวก.....	36
ภาคผนวก ก.....	37
ภาคผนวก ข.....	39
ภาคผนวก ค.....	41
ภาคผนวก ง.....	42
ประวัติผู้เขียน.....	43



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนชั้นยางของยางล้อดอก [5].....	3
รูปที่ 2.2 ยางที่ถูกขูดหน้ายางเก่าออก.....	4
รูปที่ 2.3 ยางที่ผ่านการพันหน้ายางใหม่แล้ว (Green tire).....	4
รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาวัลคาไนเซชัน [8].....	6
รูปที่ 2.5 เครื่องอัดรีดยาง [10]	7
รูปที่ 2.6 เครื่องหมุนนิวส์โคมิเตอร์ [7].....	10
รูปที่ 2.7 เส้นกราฟการวัลคาไนซ์ที่วัดได้จากเครื่อง ODR [7].....	11
รูปที่ 2.8 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบด้ายเคลื่อนที่ [7].....	14
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบหาค่าความหนืดของยาง [16].....	19
รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง	21
รูปที่ 3.3 ลักษณะขึ้นทดสอบแรงดึง [13]	21
รูปที่ 3.4 เครื่องตรวจสอบสภาพโคร่งยาง [23].....	22
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของคอมพาวนด์ N17 ที่อัดรีด ณ อุณหภูมิ 60 °C	24
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิการอัดรีดต่อค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวาง	26
รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการต้านทานแรงดึง.....	26
รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่ามอดูลัสที่ระยะยืดดึง 300%.....	27
รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาด.....	27
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะภายในโคร่งยางของยางที่มีเก็บไว้ก่อนคงรูปเป็นเวลา (a) 1 วัน (b) 5 วัน ..	29
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการเกิดร่องบนหน้ายางของยางที่มีเก็บไว้ก่อนคงรูปเป็นเวลา (a) 1 วัน (b)30	
รูปที่ ก.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 วัน.....	37
รูปที่ ก.2 กราฟแสดงพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เก็บไว้เป็นเวลา 5 วัน.....	37

รูปที่ ก.3 กราฟแสดงพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เก็บไว้เป็นเวลา 10 วัน..... 38



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการอัดรีดคอมพาวนด์ต่อค่าความหนืดของยาง	23
ตารางที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิการอัดรีดคอมพาวนด์ต่อปริมาณการเกิดเจล	24
ตารางที่ 4.3 การทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่มีระยะเวลาการเก็บแตกต่างกัน	25
ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิการคงรูปยางต่อต้นทุนการผลิตยางหล่อดอก.....	31
ตารางที่ ค.1 การตรวจวัดความหนาของชั้นหน้ายาง	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1. มุลเหตุจูงใจ

การหล่อตอกยางใหม่ (Retread tire) เป็นการซ่อมบำรุงเปลี่ยนหน้ายางที่ชำรุดให้กลับมาใช้งานไดเหมือนเดิม ซึ่งในขั้นตอนดังกล่าวในอุตสาหกรรมได้ดำเนินการโดยผ่านกระบวนการลอกหน้ายางเก่าออก และปูหน้ายางไปเข้าไปแทนที่ ซึ่งปูโดยวิธีการใช้แผ่นยางคอมพาวนด์พันไปรอบโครงยางแผ่นยางคอมพาวนด์สตริปที่นำมาพันนั้นผ่านการอัดรีดออกมาจากเครื่องปูหน้ายาง (Orbitread) ซึ่งมีส่วนการอัดรีดยางคอมพาวนด์ (Extrusion) ใช้ความเร็วสกรู (Screw speed) 72 RPM ตัวเครื่องมีส่วนควบคุมส่วน Head และ Upper roller ส่วนควบคุมส่วนตั้งแต่ Hopper end ถึง Nozzle End ส่วนควบคุมส่วน Hopper และ Lower roller และส่วนที่ควบคุมส่วนสกรู เมื่อผ่านการปูคอมพาวนด์หน้ายางแล้วจะเรียกว่ากรีนไทร์ จากนั้นนำยางไปผ่านการคงรูปเกิดเป็นดอกยางใหม่ เรียกว่า ยางหล่อตอก ในปัจจุบันการปูหน้ายางใหม่ของโรงงานใช้คอมพาวนด์ N17 เป็นหลัก ได้ผลผลิตยางหล่อตอก 234 เส้น/วัน ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มความต้องการผลิตยางที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อีกทั้งยังเกิดยางเสียจำนวนมากทำให้เกิดของเสียและเสียเวลาในการซ่อมแซมแก้ไข

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องกลับมาพิจารณาปัจจัยที่ช่วยทำให้ผลผลิตยางให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เกิดยางเสียน้อยที่สุด และได้เวลาในการคงรูปยางที่เหมาะสม โดยงานวิจัยของ Huan Zhang และคณะ (2016) [1] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการคงรูปต่อสมบัติของยางที่คงรูปด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) โดยศึกษาอุณหภูมิตั้งแต่ 140 ถึง 180 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิในการคงรูปที่ดีที่สุดคือ 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี ใช้พลังงานสะสมต่ำกว่า มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงพันธะที่สูง และมีการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีกว่า KC Lee และคณะ (2017) [2] ศึกษาผลของอุณหภูมิการคงรูปที่มีต่อพฤติกรรมคงรูปของยางธรรมชาติที่ผสมพาลีโกล์ซ (Palygorskite) โดยทดสอบสมบัติ การไหลและสมบัติทางกลของยาง พบว่าระยะเวลาสกรูและระยะเวลาคงรูปยางคอมพอสิตลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการคงรูปยางเพิ่มขึ้น สมบัติทางกลและทางกายภาพของยางได้ผลเป็นที่น่าพอใจเมื่อมีการคงรูปยางที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการอัดรีดคอมพาวนด์หน้ายางในส่วนที่ควบคุมส่วนตั้งแต่ Hopper end ถึง Nozzle End และมีการศึกษาอุณหภูมิ ในการคงรูปยาง เพื่อให้ยางมีระยะเวลาการคงรูปยางที่เหมาะสมหรือลดลงจากเดิมโดยที่ยังคงสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดี

พร้อมทั้งศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บกรีนไทร์ (Green tire) ที่มีต่อสมบัติ ของยาง ยางคอมพาวนด์ที่ผ่านการอัดรีดที่อุณหภูมิต่างกันถูกนำมาหาค่าความหนืดและพฤติกรรมในการคงรูปยางที่ผ่านการคงรูปจะถูกนำมาหาค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยาง การทดสอบแรงดึง และการวิเคราะห์สภาพโครงสร้าง รวมไปถึงการตรวจสอบลักษณะภายนอกยางเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการอัดรีดยางคอมพาวนด์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และผ่านการคงรูปที่อุณหภูมิต่างกัน โดยคาดว่าจะสามารถวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตยางล้อดอกให้มีสมบัติตามมาตรฐานของโรงงานในการลดของเสียที่เกิดขึ้นและเพิ่มผลิตผลให้ได้ตามเป้าหมาย

1.2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 1.2.1. เพื่อหาอุณหภูมิของการอัดรีดคอมพาวนด์ที่เหมาะสมในการคงรูปยาง
- 1.2.2. เพื่อศึกษาสมบัติของยางที่ผ่านการคงรูปที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

1.3. ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาอุณหภูมิในการอัดรีดคอมพาวนด์หน้ายาง สำหรับยางล้อดอกเครื่องบิน และศึกษาระยะเวลาที่สามารถเก็บรักษายางคอมพาวนด์ที่ผ่านการอัดรีดก่อนนำยางเข้าสู่กระบวนการคงรูป ที่อาจส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการคงรูปของยาง โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางกรรมถึงการวิเคราะห์สภาพโครงสร้างล้อดอก

1.4. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัย และข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2. เตรียมคอมพาวนด์หน้ายางชนิด N17 (คอมพาวนด์หน้ายางล้อดอก) ที่ผ่านการอัดรีดโดยมีการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของการผสมยาง (Hopper end ถึง Nozzle End) ที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอัดรีดคอมพาวนด์หน้ายาง (Orbitread Machine) และมีระยะเวลาการเก็บรักษาคอมพาวนด์หน้ายางที่ผ่านการอัดรีดเป็นเวลา 1, 5, และ 10 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก่อนเข้าสู่กระบวนการคงรูปยาง
- 1.4.3. ทดสอบสมบัติของคอมพาวนด์หน้ายาง N17 โดยการหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ค่าความหนืด (Viscosity) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 และ พฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristic) ตามมาตรฐาน ASTM D5289

- 1.4.4. เตรียมตัวอย่างที่ผ่านการคงรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 140, 150 และ 160 องศาเซลเซียส
- 1.4.5. ทดสอบสมบัติของยางที่ผ่านการคงรูปแล้ว โดยการหาความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (Crosslink density) และการทดสอบแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 412 ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.4.6. วิเคราะห์สภาพโครงสร้างจริงหลังผ่านการคงรูปผ่านเตาอบ (Cure mold) ที่อุณหภูมิ 140, 150 และ 160 องศาเซลเซียส ได้แก่ โพรงอากาศ (Void) และยางไม่สุก (Soft cure) ด้วยเครื่อง Shearography และตรวจสอบตรวจสอบการเกิดการตกร่องบนหน้ายาง (Light tread) หรือจุดบกพร่องอื่น ๆ บนหน้ายาง
- 1.4.7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการอัดรีดยางคอมพาวนด์ และการคงรูปยาง
- 1.5.2. สามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตและลดของเสียจากกระบวนการผลิตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยาง (Rubber) [3]

ยางเป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ (Polymer) มีสมบัติเด่นคือความยืดหยุ่นจึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) แต่ยังมีจุดอ่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะไปตามอุณหภูมิ กล่าวคือ โมเลกุลขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงทำให้ยางนิ่มลงและโมเลกุลหดตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำทำให้ยางแข็งขึ้น การเปลี่ยนแปลงลักษณะตามอุณหภูมิดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้นาน การค้นพบปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ในปี ค.ศ. 1839 (พ.ศ. 2382) โดย ชาร์ล กูดเยียร์ (Charles Goodyear) ซึ่งเป็นปฏิกิริยา ทางเคมีที่ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางเปลี่ยนโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นร่างแห จะทำให้ยางไม่เปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างตามอุณหภูมิ และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นกว่าเดิมมาก ยางเป็นวัตถุดิบสำคัญของอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ยางสามารถเลือกใช้ทั้งจากยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ หรือยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพที่ต้องการ ประเทศไทยมีความได้เปรียบด้านอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลกโดยผลิตได้ 3,394 พันตัน จากผลผลิตรวมทั่วโลก 10,974 พันตัน จากผลผลิตรวมทั้งหมด 10,974 พันตัน และ 2,929.8 พันตัน จากการส่งออกทั้งหมด 8,350.2 พันตัน (ปี พ.ศ. 2554) ตามลำดับ จึงมีโอกาสและความเป็นไปได้ในการพัฒนาประเทศให้เป็นศูนย์กลางการผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์แปรรูปเบื้องต้นให้มีคุณภาพตรงตามความต้องการของผู้ใช้ได้รวมทั้งพัฒนาการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ยางในชั้นปลาย ทั้งนี้หน่วยงานภาครัฐได้สนับสนุนให้มีการใช้ยางธรรมชาติในประเทศเพิ่มมากขึ้น โดยให้มีการเพิ่มการผลิตยางที่มีศักยภาพ พัฒนาผลิตภัณฑ์ยาง สร้างมูลค่าเพิ่มเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้ยางให้มากขึ้นโดยมีเป้าหมายเพิ่มการใช้ภายในประเทศเป็นร้อยละ 20 จากเดิมที่มีการใช้เพียงร้อยละ 11 ของ ผลผลิตทั้งหมด หรือประมาณ 3.2-3.4 แสนตันต่อปี ทั้งนี้ในปี 2553 คาดว่าจะมีการใช้ยางพาราใน อุตสาหกรรมในประเทศประมาณ 0.373 ล้านตัน โดยจะเพิ่มขึ้นจากปี 2552 ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก ประเทศผู้ใช้ยางส่วนใหญ่ เช่น จีน ญี่ปุ่น มีการขยายฐานการผลิตในไทยมากขึ้น ยางแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่ ยางธรรมชาติ (Natural rubber) และยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber)

2.1.1 ยางธรรมชาติ [3]

มีสมบัติเด่น คือ มีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ ความเหนียวติดกัน (Tack) ในสภาพที่ยังไม่คงรูปดีเยี่ยมมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) สูงมากโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงมีความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength) สูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง มีสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำระหว่างการใช้งานมีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) ที่สูงมาก มีความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูงแต่ยังด้อยกว่ายาง SBR ยาง NR จัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง ยางรัดของ ท่อยาง สายพานลำเลียง ยางกระเปาะน้ำร้อน ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น สำหรับข้อดีของยางธรรมชาติ ได้แก่ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน (ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ เช่น เบนซีน เฮกเซน โทลูอิน) และสารเคมีอื่นๆ

2.1.2 ยางสังเคราะห์

ผลิตขึ้นมาเพื่อแทนที่ยางธรรมชาติที่มีข้อด้อยหลัก คือ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน และสารเคมี สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิดตามชนิดของมอนอเมอร์ที่เข้ามาทำปฏิกิริยากัน

2.2 ยางหล่อตอก [4]

ยางหล่อตอก หรือ ยางเปอร์เซ็นต์ คือ ยางที่ผ่านการใช้งานมาแล้วแต่ยังมีสภาพที่ดีสามารถนำไปใช้งานได้ต่ออีกสักระยะหนึ่ง การเลือกใช้ยางหล่อตอกเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สำคัญที่สามารถช่วยลดต้นทุนได้มาก โดยปกติแล้วต้นทุนของยางหล่อตอกจะต่ำกว่า ยางใหม่ 30% ถึง 50% โดยที่สมรรถนะในการขับขี่ ความเร็ว ความนุ่มนวล และความปลอดภัย เทียบเท่ากับยางใหม่

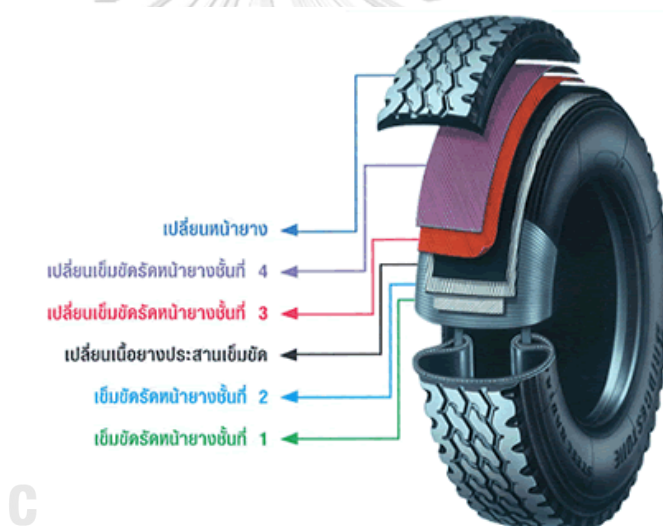
2.2.1 การหล่อตอกแบบเย็น

จากมาตรฐานกระบวนการผลิตยางหล่อตอกจากโรงงานที่ได้รับการตรวจสอบและรับประกันประสิทธิภาพ ด้วยเทคโนโลยีการหล่อเย็น โดยใช้เครื่องชูดยางเพื่อเจียรผิวหน้ายางให้เรียบเสมอกัน ด้วยระบบน้ำหล่อเย็นที่ทันสมัยช่วยรักษาผิวยาง ไม่ให้ไหม้จากการชูดทำการแต่งซ่อมแผลหน้ายางที่ชำรุดโครงสร้างจะได้รับการพ่น กาวยางน้ำ (Cement) เพื่อ

ให้ลายดอกยางประสานกันอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งขั้นตอนการอบยางด้วยหม้ออบขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส ทำให้ลายดอกและเนื้อยางประสานกับโครงยางเก่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.2 การหล่อดอกแบบร้อน

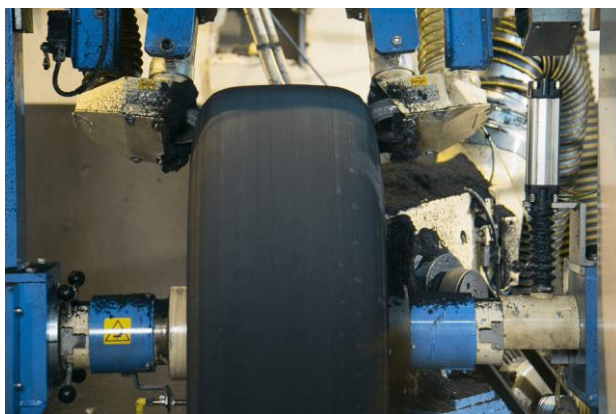
ด้วยเทคโนโลยีการหล่อแบบอบด้วยความร้อน จะทำให้ส่วนประกอบของยางใหม่และยางเก่าสามารถผสานเป็นเนื้อเดียวกันได้อย่าง สมบูรณ์แบบหมดปัญหาการบวมหลุดล่อน โดยโรงงานยางรถยนต์จะทำการเปลี่ยนเข็มขัด รัศมียาง 2 ชั้น ทุกครั้งที่ทำการหล่อดอกยางทำ ให้หน้ายางที่ได้รับความเสียหายจากการใช้งานจะได้รับการซ่อมแซม และมีสภาพดีดังเดิมจึงเสมือนได้ยางเส้นใหม่ทุกครั้งที่หล่อดอก โดยในการหล่อดอกยางใหม่นั้นจะทำการเปลี่ยนตั้งแต่ส่วนของชั้นเนื้อยางประสานเข็มขัดขึ้นไปดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนชั้นยางของยางหล่อดอก [5]

2.3 การคงรูปยางหล่อดอก [4]

การหล่อยางหล่อดอกนั้นทำโดยการพันยางคอมพาวด์ที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ไว้บนส่วนบนของยางที่ผ่านการชุบน้ำยางเก่าออกไปดังรูปที่ 2.2 ต่อมายางที่ผ่านการพันหน้ายาง (Green tire) เรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 2.3 ถูกนำไปวางในแม่พิมพ์ซึ่งได้มีการออกแบบไว้ให้เหมาะสมสำหรับการหล่อดอกยางใหม่ จากนั้นแม่พิมพ์จะถูกร้อนซึ่งทำให้ยางภายในแม่พิมพ์เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ และยึดติดกับโครงยางอย่างสมบูรณ์แบบ กระบวนการนี้เกือบจะคล้ายกับวิธีผลิตยางใหม่ที่ผู้ผลิตชั้นนำของโลกใช้กัน



รูปที่ 2.2 ยางที่ถูกขูดหน้ายางเก่าออก



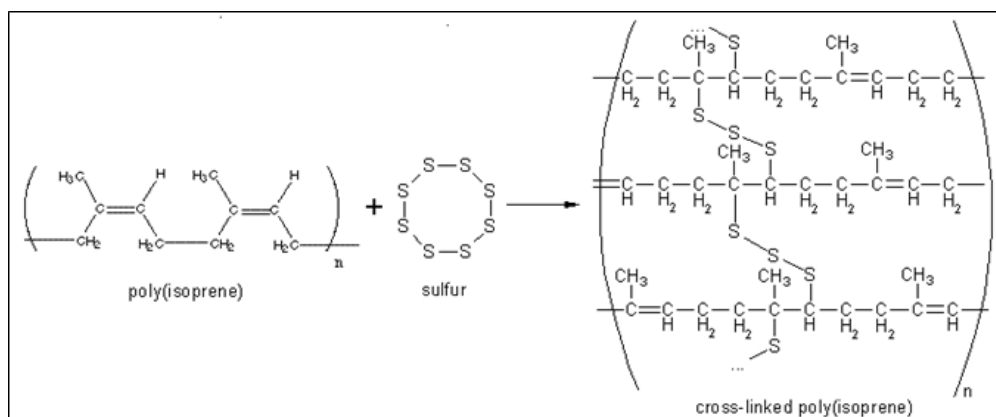
รูปที่ 2.3 ยางที่ผ่านการพันหน้ายางใหม่แล้ว (Green tire)

2.4 วัลคาไนเซชัน [6]

การทำใหยางคงรูปหรือทำใหยางสุกคือการทำใหยางเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างสายโมเลกุลหรือที่เรียกกันว่าปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ส่งผลใหยางเกิดการเปลี่ยนแปลงจากค่อนข้างอ่อนไปเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นและแข็งแรง มีสมบัติเชิงกลที่เสถียร และทำใหยางทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและแสงแดดได้ดียิ่งขึ้นจึงสามารถนำยางไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง รูปที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันต้องอาศัยสารเคมีกลุ่มที่ทำใหยางคงรูป (Vulcanizing or curing agents) และความร้อนเพื่อทำใหสารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ สำหรับในยางธรรมชาติที่มีพันธะคู่และหมู่อัลฟาเมทิลีนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำใหสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำใหยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ทำใหยางเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเช่นเดียวกัน ดังนั้นการออกสูตรยางจำเป็นจะต้องมีแอนตี้ออกซิแดนท์และแอนตี้โอโซนแนท์ร่วมด้วย

ลักษณะการวัลคาไนเซชันของยางคอมพาวนด์ [7] เมื่อนำยางคอมพาวนด์มาทำให้ร้อน สารเคมีในยางจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา ในตอนเริ่มต้นจะใช้ระยะเวลาหนึ่งอาจจะช้าเร็วขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและสารเคมีที่ใช้ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ระยะเวลาดังกล่าวก็จะสั้นลง ช่วงนี้เรียกว่าช่วงเวลา ก่อนยางสุก ต่อมาสารเคมีก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับยางก่อให้เกิดการแข็งตัว เรียกว่า สกอกซ์ไทม์ ยาง จะแปรรูปได้ยาก เรียกระยะนี้ว่ายางเริ่มสุก ยางจะแข็งขึ้นเรื่อย ๆ จนสารเคมีกระทำกับยางจนหมด เรียกว่าเวลาที่ยางสุกเต็มที่ (100% Cure time) แต่พบว่าเวลาที่ยางสุกเต็มที่ใช้เวลาานานเกินไป และ อาจทำให้สมบัติทางฟิสิกส์ของยางด้อยลง ดังนั้นระยะเวลาที่ยางสุกจึงมักกระทำที่ยางมีโมดูลัสขึ้น เพียง 90% หรือ 95% ของโมดูลัสที่ขึ้นสูงสุด ยางใดที่ได้รับความร้อนไม่เพียงพอจะไม่สุก (Under cure) แต่ถ้าหากปล่อยให้ยางได้รับความร้อนต่อไปอีกยางจะสุกเกินไป (Over cure) โมเลกุลของยางจะสลายตัว เรียกว่า เกิดการพลิกกลับสู่สภาพเดิม (Reversion) หรือยางอาจจะ แข็งขึ้น เรียกว่า เกิดมาร์ชชิงเคียว (Marching cure) แต่ยางใดสามารถรักษาโมดูลัสไม่ให้เกิดได้นาน ถึงแม้ว่าเกินเวลาที่ยางสุกเต็มที่ก็จะเรียกว่าเป็นยางแฟลทเคียว (Flat cure)

ระบบทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางกับยาง ที่มีโครงสร้างทางโมเลกุลไม่อิ่มตัว (Unsaturation) ระบบนี้จำเป็นต้องมีสารตัวกระตุ้น (Activator) เช่น ซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริกสำหรับสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาคงรูปสัดส่วนของการใช้ กำมะถันกับสารตัวเร่งมีความสำคัญเพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น เช่น ถ้าใช้ปริมาณของกำมะถันมากและใช้สารตัวเร่งน้อย เรียกว่า ระบบธรรมดาหรือ (Conventional vulcanization: CV system) ซึ่งจะมีพันธะเคมีแบบ Polysulfidic crosslinks และแบบ Cyclic แต่ถ้าใช้ปริมาณกำมะถันน้อยและใช้สารตัวเร่งมากจะได้พันธะ เคมีส่วนใหญ่เป็น แบบ Monosulfidic crosslinks เรียกระบบนี้ว่าระบบประสิทธิภาพหรือ Efficient vulcanization (EV system) นอกจากนี้ 2 ระบบดังกล่าวยังมีอีกระบบหนึ่งเรียกว่า ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV system) ซึ่งจะอยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 ระบบข้างต้นพันธะ เคมีแบบ Polysulfidic จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีแต่ไม่ทนต่อความร้อนในขณะที่ยางที่มี พันธะแบบ Mono- หรือ Disulfidic จะให้สมบัติเชิงกลที่ด้อยกว่าแต่ยางจะเสถียรต่อความ ร้อนได้ดี



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาวัลคาไนเซชัน [8]

2.5 กระบวนการอัดรีดยาง (Rubber extrusion) [9] [10]

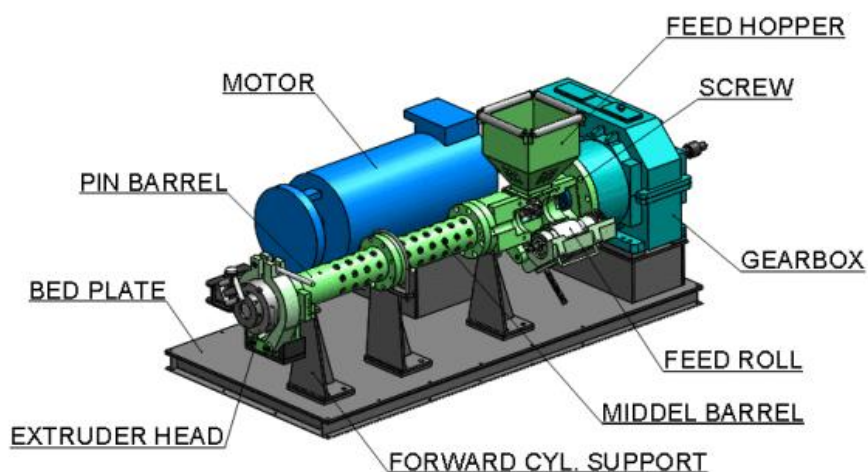
การขึ้นรูปด้วยเทคนิคการอัดรีดเป็นวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางที่มีลักษณะการผลิตแบบต่อเนื่องลักษณะการผลิตแบบลวด โดยใช้วัตถุดิบในการผลิตได้แก่ยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการผสมมาเป็นลักษณะแบท การอัดรีดเป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่ต้องอาศัยเครื่องอัดรีดเพื่อให้ยางไหลผ่านหัวดายมีรูปร่างต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดรีดต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างของภาพตัดขวางเหมือนกันตลอดตามแนวยาว (รูปร่างตัดขวางของผลิตภัณฑ์จะเหมือนกับรูปร่างของดาย)

เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า เครื่องเอ็กทรูดเดอร์ (Extruder) ซึ่งเครื่องนี้จะอาศัยแรงอัดจากการหมุนของสกรู (Screw extruder) ซึ่งหมุนอยู่ภายในบารเรล (Barrel) หรือห้องอัดซึ่งทั้งสกรูและบารเรลสามารถตั้งอุณหภูมิให้สูงหรือต่ำได้ตามต้องการที่ปลายด้านหนึ่งของบารเรล จะเป็นที่ตั้งของหัวดายและปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็นช่องสำหรับป้อนยางคอมพาวนด์เข้าสู่เครื่อง ยางคอมพาวนด์ที่ป้อนเข้าไปส่วนใหญ่อจะอยู่ในรูปของแถบยาง (Rubber Strip) หรือบางครั้งจะอยู่ในรูปของยางเม็ด (Rubber Pellets) การหมุนของสกรูจะทำให้ยางคอมพาวนด์ไหลเข้าไปในบารเรลอย่างต่อเนื่องขณะที่ยางไหลจากด้านหลังไปยังด้านหน้าของเครื่อง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ยางมีความหนืดลดลงจนอยู่ในสภาพที่ขึ้นรูปได้ง่าย การหมุนของสกรูยังก่อให้เกิดแรงดันสำหรับดันยางคอมพาวนด์เหล่านี้ให้ไหลผ่านหัวดายที่อยู่ทางด้านหน้าอีกด้วย ซึ่งแรงดันที่เกิดขึ้นนี้จำเป็นต้องรักษาให้คงที่เพื่อให้การอัดรีดยางมีความเสถียรทางรูปทรง ส่วนขนาดของแรงดันที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการหมุนสกรูแล้วยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของสกรู รวมถึงพื้นที่ภาพตัดขวางของรูดายด้วย

โดยทั่วไปแรงอัดหรือแรงดันจะสูงเมื่อระยะพิทของสกรู (Screw Pitch) มีขนาดเล็ก และมีความเร็วรอบในการหมุนสูงก่อให้เกิดแรงดันที่สูงด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามสภาวะเช่นนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาในเชิงปฏิบัติ เพราะความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีจะมีค่าสูงและไม่สม่ำเสมอจึงอาจทำให้เกิดยางตายภายในบารเรลได้ ดังนั้นในการออกแบบเพื่อให้เครื่องอัดรีดมีแรงดันสูงเฉพาะที่บริเวณปลายด้านหน้าของบารเรลเท่านั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการตายและการไหลย้อนกลับของยาง

โดยทั่วไปสกรูควรจะมีขนาดที่มากเพียงพอสำหรับให้ความร้อนและทำให้ยางนิ่ม ทั้งก่อให้เกิดแรงดันสูงเพียงพอสำหรับการอัดเท่านั้น เพราะหากสกรูมีความยาวมากเกินไป จะก่อให้เกิดผลเสีย เช่น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน เพิ่มอัตราเสี่ยงต่อการเกิดยางตายเพราะยางอาจมีอุณหภูมิสูงเกินไป

เครื่องอัดรีดมีความยาวตั้งแต่ 3D-6D เหมาะสำหรับทำให้ยางนิ่มเท่านั้นไม่ได้ช่วยให้ อุณหภูมิยางสูงขึ้นมากนัก ดังนั้นผู้ผลิตจึงต้องทำให้ยางคอมพาวด์ร้อนเพียงพอโดยการนำ ยางคอมพาวด์ไปรีดผ่านเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งก่อนที่จะป้อนยางเข้าสู่เครื่องอัดรีดจึง เรียกว่าเครื่องอัดรีดแบบร้อน (Hot Feed Extruder) รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของเครื่องอัดรีดยาง



รูปที่ 2.5 เครื่องอัดรีดยาง [10]

2.6 การวิเคราะห์สภาพโครงสร้าง (Shearography) [11] [12]

Shearography เป็นเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลายวัสดุ (Non-Destructive Testing : NDT) มักใช้กับวัสดุคอมโพสิตและวัสดุโลหะ ใช้สำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องในลักษณะเร่งด่วน หลักการทำงานประกอบด้วย การเปรียบเทียบอินเทอร์เฟอโรเมทริกส์ (Interferometric) ของวัตถุทดสอบ ซึ่งจะเผยให้เห็นความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวหรือความผิดปกติของวัสดุ เครื่อง Shearography ใช้วิธีการแบบไม่สัมผัสวัสดุ สามารถรองรับชิ้นงานทดสอบที่มีรูปทรงโค้งและพื้นผิวที่ซับซ้อน ช่วยตรวจจับความไม่เข้ากันบนวัสดุ คอมโพสิตได้อย่างรวดเร็ว เช่น รอยย่น ความไม่ยึดเกาะกัน รอยแยก รอยแตก ร้าว ผลจากการซ่อม โพรงอากาศ วัตถุแปลกปลอม เป็นต้น ลักษณะการทำงานมีทั้งการกระตุ้นด้วยความร้อน การกระตุ้นด้วยสุญญากาศ และการสั่นสะเทือน

การกระตุ้นความร้อน - ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากความง่ายในการใช้งานและความเร็วในการได้มา การกระตุ้นความร้อนเหมาะที่สุดสำหรับการตรวจสอบ CFRPs ลามิเนต แผ่นโลหะ GFRP บาง ๆ ฯลฯ

การกระตุ้นด้วยสุญญากาศ - เป็นการกระตุ้นเพื่อบ่งชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องของวัสดุ โดยการดึงพื้นผิวของวัสดุด้วยสุญญากาศที่ปรับได้ การกระตุ้นด้วยสุญญากาศเหมาะที่สุดสำหรับการตรวจสอบโครงสร้างวัสดุแบบรังผึ้ง โครงสร้างแบบประกบ, โฟม, พลาสติก ฯลฯ

การสั่นสะเทือนแบบสั่น - เป็นวิธีการตรวจสอบโดยมีสองวัตถุประสงค์ที่ทำให้เกิดการสั่นของจุดที่บกพร่องและทำให้เกิดรูป วิธีนี้ยังสามารถใช้สำหรับโหมด Eigen การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความถี่นั้นถูกใช้เป็นหลักในการทดสอบ Turbomachine

Laser Shearography เป็นเทคนิคการวัดแบบออปติคัลสำหรับการทดสอบแบบไม่ทำลาย (วัสดุ (Non-Destructive Testing: NDT) มักใช้กับวัสดุคอมโพสิตและวัสดุโลหะ วิธีการนี้ใช้สำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องในลักษณะเร่งด่วน Laser Shearography เป็นวิธีการที่ได้หลากหลายและทั้งภาคอุตสาหกรรมทหาร และการวิจัย Shearography เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ, ยานยนต์, การบิน, โยธา, ทางทะเล, ทางรถไฟ, สิ่งทอ เป็นต้น มันเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับบริษัทที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูง หลักการทำงานประกอบด้วย การเปรียบเทียบอินเทอร์เฟอโรเมทริกส์ ของวัตถุทดสอบ ซอฟต์แวร์ อัลกอริทึมขั้นสูงจะทำการประมวลผลภาพสดเพื่อระบุความแปรปรวนของการเปลี่ยนแปลงบนอกระนาบระหว่างทั้งสองส่วน ซึ่งจะเผยให้เห็นความไม่ต่อเนื่องของพื้นผิวหรือความผิดปกติของวัสดุ

2.7 การตรวจสอบคุณภาพของยางคอมพาวนด์

2.7.1. การทดสอบค่าความหนืด (Mooney viscosity) [7]

ความหนืดมูนีนีเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญที่สุดของยางคอมพาวนด์ที่ต้องตรวจสอบ เพราะเป็นสมบัติที่บ่งชี้ความสามารถในการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางคอมพาวนด์ ยางที่มีความหนืดต่ำจะไหลได้ง่ายทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้โดยง่ายด้วยเช่นกัน การวัดค่าความหนืดมูนีนีสามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบที่เรียกว่า “เครื่องมูนีนี วิสโคมิเตอร์ (Mooney viscometer)” ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ตัวเครื่องทดสอบประกอบด้วยโรเตอร์ที่วางอยู่ใน ช่องว่างระหว่างตาย 2 อัน คือ ตายบน (Upper die) และตายล่าง (Lower die) โดยโรเตอร์มี 2 ขนาดให้เลือกใช้ตามระดับความหนืดของยางกล่าวคือถ้ายางที่ทดสอบมีความหนืดสูงก็ใช้โรเตอร์ขนาดเล็กแต่ถ้ายางที่ทดสอบมีความหนืดปานกลางหรือต่ำก็ใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ใส่ยางเข้าไปในช่องว่างระหว่างตายบนและตายล่าง ให้ความร้อนแก่ยาง (Preheat time) 1 นาที เพื่อให้ยางมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่จะทดสอบ จากนั้นโรเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วประมาณ 2 รอบต่อนาทีทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างพื้นผิวของโรเตอร์และพื้นผิวของตาย แรงที่ใช้ในการหมุนโรเตอร์จะสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดของยางคอมพาวนด์ เครื่องจะบันทึกแรงบิดที่ต้องใช้ในการหมุนโรเตอร์ตามเวลาและแปลงค่าที่ได้ให้อยู่ในรูปของ “Mooney units (MU) หรือ Mooney viscosity (MV) โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมยางคอมพาวนด์เพื่อยกระดับมูลค่าผลิตภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมยานยนต์และเครื่องมือแพทย์ 21 scale” โดยส่วนใหญ่นิยมอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากที่โรเตอร์หมุนไป 4 นาที ยกเว้นในกรณีของยางบิวไทล์ (IIR) และยางฮาโลบิวไทล์ (XIIR) ซึ่งจะอ่านค่าความหนืดของยางหลังจากที่โรเตอร์หมุนไป 8 นาที สัญลักษณ์ที่ใช้ในการแสดงผลการทดสอบค่าความหนืดมูนีนีคือ 40 ML 1+4 (100 °C) เมื่อ 40 คือค่าความหนืดที่วัดได้ในหน่วยมูนีนี M มาจาก Mooney L หมายถึงโรเตอร์ขนาดใหญ่ (Large) แต่ถ้าเป็นโรเตอร์ขนาดเล็กจะใช้ S (small) แทน 1 คือระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ยางก่อนการทดสอบ 4 คือระยะเวลาที่อ่านค่าความหนืด (มีค่าเท่ากับ 8 สำหรับยางบิวไทล์) 100°C คืออุณหภูมิของการทดสอบ (มีค่าเท่ากับ 125°C สำหรับยาง EPDM เป็นต้น)



รูปที่ 2.6 เครื่องมุนีวิสโคมิเตอร์ [7]

2.7.2. การทดสอบพฤติกรรมการคงรูป (Cure characteristics) [7]

2.7.2.1 การทดสอบด้วยเครื่องมุนีวิสโคมิเตอร์

แม้ว่าเครื่องมุนีวิสโคมิเตอร์จะได้รับการออกแบบมาเพื่อวัดค่าความหนืดของยางมากกว่าที่จะใช้ในการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ แต่เนื่องจากค่าของความหนืดของยางแปรผันโดยตรงกับระดับของการวัลคาไนซ์ ด้วยเหตุนี้ผู้ประกอบการจึงสามารถนำเครื่องมุนีวิสโคมิเตอร์ไปใช้ในการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางได้ด้วยเช่นกัน โดยทั่วไปการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางด้วยเครื่องมุนีวิสโคมิเตอร์จะมีวิธีการทดสอบเช่นเดียวกับการวัดค่าความหนืดมุนี แต่จะแตกต่างกันตรงที่การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์จะเป็นการทดสอบแบบต่อเนื่องและนิยมทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่า (เช่น ที่อุณหภูมิ 125°C หรือ 140°C เป็นต้น) ดัชนีการวัลคาไนซ์ (Cure index) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{สำหรับโรเตอร์ขนาดใหญ่} : \Delta t_L = t_{35} - t_5$$

$$\text{สำหรับโรเตอร์ขนาดเล็ก} : \Delta t_s = t_{18} - t_3$$

โดย t_3 คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 3 หน่วย (โรเตอร์ขนาดเล็ก)

t_5 คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 5 หน่วย (โรเตอร์ขนาดใหญ่)

t_{18} คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 18 หน่วย (โรเตอร์ขนาดเล็ก)

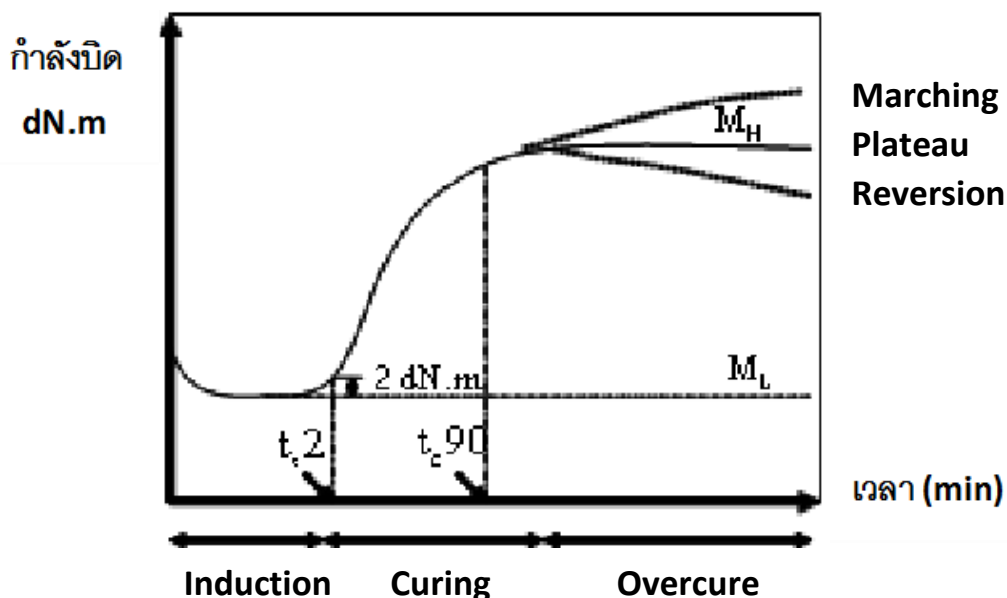
t_{35} คือ เวลาที่ยังมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากจุดต่ำสุด 35 หน่วย (โรเตอร์ขนาดใหญ่)

อย่างไรก็ตาม ผู้ทดสอบควรตระหนักไว้ว่าเครื่องมุนีวิสโคมิเตอร์สามารถนำไปใช้ในการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางได้เฉพาะในช่วงต้นของการวัลคาไนซ์เท่านั้นเพราะเมื่อโรเตอร์หมุนไปเรื่อยๆ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะไปทำลายโครงสร้าง

ตาข่าย 3 มิติที่เกิดจากวัลคาไนซ์ของยางซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบในช่วงท้ายมีความผิดพลาดสูง ด้วยเหตุนี้การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางในปัจจุบันจึงนิยมใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) ชนิดอื่นแทน

2.7.2.2 การทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง

เครื่อง ODR (Oscillating disc rheometer) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง โดยตรง ตัวเครื่องประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนที่อยู่ในช่องว่างระหว่างดาดบนและดาดล่างเช่นเดียวกับเครื่องมูน นีวิสโคมิเตอร์ อย่างไรก็ตามโรเตอร์ของเครื่อง ODR มีรูปร่างเป็นรูปโคนคู่ประกบ (Biconical shape) และการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในระหว่างการทดสอบจะเป็นแบบแกว่ง (ไม่ใช่แบบหมุนเหมือนในกรณีของเครื่องมูน นีวิสโคมิเตอร์) โดยการแกว่งของโรเตอร์จะเกิดขึ้นเป็นมุมแคบๆ (1° หรือ 3°) ด้วยความถี่ 1.67 Hz หรือ 100 รอบต่อ นาทีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำลายโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของยางวัลคาไนซ์ จากนั้นเครื่องก็จะบันทึกแรงบิดที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการทดสอบ



รูปที่ 2.7 เส้นกราฟการวัลคาไนซ์ที่วัดได้จากเครื่อง ODR [7]

จะเห็นได้ว่าลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนี้

1. ช่วงเริ่มต้น (Induction) เมื่อยางได้รับความร้อน ยางก็จะนิ่มลงทำให้แรงบิดลดลงในระยะแรก จนกระทั่งเมื่ออุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่ ณ จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ ใช้สัญลักษณ์ว่า M_L

2. ช่วงการวัลคาไนซ์ (Curing) หลังจากที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้น (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปิดตายจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์เรียกว่า “ระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time)” และใช้สัญลักษณ์เป็น t_s ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 1° ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซินิวตัน-เมตร (dN.m) ใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s1} แต่ในกรณีที่ใช้มุมแกว่งเท่ากับ 3° ค่าระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 2 เดซินิวตันเมตร และใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s2} ระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต เมื่อทดสอบต่อไปค่าแรงบิดก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับของการวัลคาไนซ์จนกระทั่งถึงจุดที่การวัลคาไนซ์เกิดขึ้นสมบูรณ์ แรงบิด ณ จุดนี้จะมีค่าสูงที่สุดและใช้สัญลักษณ์ว่า M_H ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงค่าโมดูลัสเฉือนของยางวัลคาไนซ์ ณ อุณหภูมิของการทดสอบ ตัวแปรสำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของการวัลคาไนซ์ก็คือ “ระยะเวลาของการวัลคาไนซ์ (Curing time)” โดยทั่วไปใช้สัญลักษณ์เป็น t_c เมื่อ x คือร้อยละการเพิ่มขึ้นของแรงบิดจากจุดต่ำสุด (M_L) เมื่อ เปรียบเทียบกับจุดสูงสุด (M_H) ซึ่งค่า t_{c90} จัดเป็นค่า “ระยะเวลาการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม (Optimum curing time)” หมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการทำใหยางวัลคาไนซ์ไปร้อยละ 90 หรือระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับค่าแรงบิดต่ำสุดบวกด้วย 90% ของผลต่างระหว่างค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากการวัลคาไนซ์ ณ จุดนี้ทำใหยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี การวัลคาไนซ์ไปจนถึง 100% ส่วนใหญ่มักจะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของยางด้อยลง

t_{c90} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$t_{c90} = \text{ระยะเวลาที่ทำให้แรงบิดมีค่าเท่ากับ } M_L + [90 (M_H - M_L)/100]$$

นอกจากตัวแปรต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถใช้แสดงลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง นั่นคือดัชนีอัตราการวัลคาไนซ์ (Cure rate index; CRI) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$CRI = 100 / (\text{ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ที่เหมาะสม} - \text{ระยะเวลาสกอร์ช})$$

3. ช่วงของการวัลคาไนซ์ที่มากเกินไป (Overcure) เมื่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เกิดได้สมบูรณ์แล้ว แต่ยังคง ทดสอบต่อไป ค่าแรงบิดหรือโมดูลัสของยางอาจจะคงที่ตามเวลา เรียกว่าเกิด “Plateau” แต่ในบางกรณีอาจพบว่ามีค่าโมดูลัสของยางอาจจะสูงขึ้นไปเรื่อยๆ เรียกว่าเกิด Marching หรืออาจจะมียาค่าต่ำลง เรียกว่าเกิด reversion ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรเคมีที่ใช้

2.7.2.3 การทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางอย่างต่อเนื่อง จนได้เป็นเครื่องมือทดสอบชนิดที่ไม่มีโรเตอร์เรียกว่า “Rotorless curemeter” ตัวอย่างที่สำคัญของเครื่องมือวัดชนิดนี้ ได้แก่ เครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่หรือเครื่อง MDR (Moving die rheometer) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยทั่วไป เครื่อง MDR มีหลักการทำงานและวิธีการทดสอบเหมือนกับเครื่อง ODR ยกเว้นเครื่อง MDR จะไม่มีโรเตอร์ (มีเพียงตายบนและตายล่าง) เมื่อเริ่มการทดสอบตายล่างจะแกว่งไป-มาเป็นมุมแคบๆ (ส่วนใหญ่จะตั้งไว้ที่ 0.5° ซึ่งต่ำกว่าเครื่อง ODR) ด้วยความถี่ 1.7 Hz จากนั้นเครื่องก็จะเริ่มบันทึกค่าแรงบิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ผลการทดสอบที่ได้จึงมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง ODR แต่ค่าระยะเวลาสกอร์ชที่วัดได้จากเครื่อง MDR คือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซิวิวตัน-เมตร โดยไม่ขึ้นอยู่กับมุมแกว่งของเครื่อง



รูปที่ 2.8 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบค้ายเคลื่อนที่ [7]

2.7.2.4 การทดสอบแรงดึง [13]

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานหนึ่งของสมบัติในวัสดุต่างๆ ปกติการทดสอบจะประเมินความแข็งแรงของวัสดุ โดยการใช้วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาหนึ่งที่อัตราความเร็วคงที่ ขณะเดียวกันสามารถใช้ชิ้นทดสอบแบบอื่นที่ทราบค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเริ่มต้น โดยการทดสอบแรงดึงใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุภายใต้แรงดึงหรือการยืดในแนวแกนข้อมูลและการคำนวณในการทดสอบแรงดึงโดยทั่วไปได้แก่ ชีตจำกัดการยืดหยุ่น ร้อยละการยืด โมดูลัสความยืดหยุ่น ร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด เป็นต้น การทดสอบแรงดึง สามารถทำได้โดยวิธีใน มาตรฐาน ASTM ได้แก่ ASTM D2343 สำหรับวัสดุโฟมเบอร์ ASTMD412 สำหรับวัสดุยาง ASTM D638 สำหรับวัสดุพลาสติก ASTMD897 สำหรับวัสดุทากา ASTMD987 สำหรับวัสดุกระดาษ และ ASTM E8/E8M-11 สำหรับวัสดุโลหะ

แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากกระทำ ได้แก่ แรงต้านภายในจากแรงดึงเป็นแรงที่พยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน แรงต้านภายในจากแรงอัดเป็นแรงที่พยายามจะอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง และแรงต้านภายในจากแรงเฉือนเป็นแรงที่วัสดุเคลื่อนผ่านกัน

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะแบบคืนรูปและแบบคงรูป คือการเปลี่ยนแปลงคืนรูปการเปลี่ยนรูปเมื่อปลด

แรงกระทำ เนื่องจากผลของแรงต้านภายในรูปของชิ้นงานจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่าง ได้แก่ พวงยาง สปริง ถ้ากดให้แรงชิ้นงานแล้วปล่อยชิ้นงานจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

การเปลี่ยนแบบคงรูปเมื่อปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยชิ้นงานเคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิมวัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หากไม่เกินพิกัดการคืนแล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Darja และคณะ (2018) [14] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปยางที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของยางที่ผสมระหว่าง NR/SBR (Natural rubber/Styrene butadiene rubber blends) โดยใช้ SBR ที่มีตำแหน่งสายโซ่ต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ SBR-LV (Styrene butadiene rubber low vinyl content) และ SBR-HV (Styrene butadiene rubber high vinyl content) ผลการวิจัยพบว่า ยาง NR/SBR คงรูปที่อุณหภูมิต่างกันที่ 140 และ 160 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดอนุภาคของยาง SBR เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การเพิ่มสายโซ่แบบไวโนลนำไปสู่การเพิ่มการดึงดูดกันระหว่างยางทั้งสอง การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคของยางจะมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อคงรูปยางที่ 140 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่าอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปยางมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของยางผสมและยังขึ้นอยู่กับ SBR vinyl content

Huan Zhang และคณะ (2016) [1] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการคงรูปของยางที่มีต่อสมบัติของยางที่คงรูปด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) โดยใช้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิการคงรูปตั้งแต่ 140 ถึง 180 องศาเซลเซียส ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของยางคงรูปถูกตรวจสอบด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy ผลการทดลองบ่งชี้ว่าอุณหภูมิส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้างยางและสมบัติของยาง และอุณหภูมิในการคงรูปที่ดีที่สุดคือ 150 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด สมบัติด้านไดนามิกส์ที่ดีกว่า และใช้พลังงานสะสมต่ำกว่า เนื่องจากความหนาแน่นการเชื่อมโยงพันธะที่มากและมีการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดี

Lee และคณะ (2017) [2] ศึกษาผลของอุณหภูมิการคงรูปยางที่มีต่อพฤติกรรมคงรูปของยางที่ผสมกันระหว่างยางธรรมชาติกับปาลิโกลอร์ซไคต์ (Palygorskite) โดยใช้อุณหภูมิในการคงรูป

ยางที่ 140,150, และ 160 องศาเซลเซียส โดยได้ทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติทางกลของยางคอมพอสิต พบว่าระยะเวลาสกร์ชและระยะเวลาคงรูปยางของยางคอมพอสิตลดลง เมื่ออุณหภูมิการคงรูปยางเพิ่มขึ้น สมบัติของยางได้ผลเป็นที่น่าพอใจที่การคงรูปยางด้วยอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

Al-nesrawy และคณะ (2016) [15] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติการไหลของยางคอมพาวนด์ SBR ที่ได้รับการเสริมแรงจากของเสียนในอุตสาหกรรมมาใช้เป็นสารตัวเติม โดยใช้ยางคอมพาวนด์ 4 สูตรที่ผสมกับซีเมนต์และคาร์บอนแบล็กในปริมาณ 10, 20, 30, 35 phr นอกจากนี้สมบัติการไหลถูกทดสอบโดยรีโอมิเตอร์ ค่า Viscosity, Maximum torque, Minimum torque, Scorch time, Optimum cure และ Thermoplasticity ถูกศึกษาที่อุณหภูมิ 165, 175, และ 185 องศาเซลเซียส ซึ่งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิและปริมาณการเติมคาร์บอนแบล็กและซีเมนต์เพิ่มขึ้น อีกทั้งค่า Scorch time, Optimum cure time และ Cure time จะลดลงอีกด้วย



บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการดำเนินการ

เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากบริษัททิวเดียร์ (ประเทศไทย) เครื่องมือและวิธีในการดำเนินงานวิจัย แบ่งออกเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

3.1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1. เครื่องอัดรีดยาง Orbitread ยี่ห้อ McNeil & NRM
- 3.1.2. เครื่องตรวจสอบสภาพโครงยาง ยี่ห้อ SDS Systemtechnik GmbH รุ่น ITT1
- 3.1.3. เครื่องรีดสองลูกกลิ้ง ยี่ห้อเจริญทัศน์ รุ่น ML-D6L12-HT-INV
- 3.1.4. เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก ยี่ห้อ RIMPEX รุ่น XYC 50
- 3.1.5. เครื่องทดสอบการดึงยืด ยี่ห้อ Instron รุ่น 5965
- 3.1.6. เครื่องทดสอบค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)
- 3.1.7. เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง Moving Die Rheometer (MDR) ยี่ห้อ Alpha Technologies รุ่น Rheometer MDR 2000
- 3.1.8. ตู้อบอากาศร้อน (Hot air oven) ยี่ห้อ Blue M ขนาด 85 ลิตร

3.2. สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.2.1. ยางคอมพาวนด์หน้ายางรหัส N17
- 3.2.2. โทลูอีน

3.3. การดำเนินงานวิจัย

3.3.1. การอัดรีดคอมพาวนด์หน้ายาง

1. คอมพาวนด์หน้ายางชนิด N17 (คอมพาวนด์หน้ายางหล่อตอกยางเครื่องบินของโรงงาน) ที่ผ่านการอัดรีดโดยมีการควบคุมอุณหภูมิในส่วนของการผสมยาง (Hopper end ถึง Nozzle End) ที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องอัดรีดคอมพาวนด์หน้ายาง (Orbitread Machine) โดยใช้ความเร็วสกรู 72 RPM และได้ยางคอมพาวนด์ออกมาในรูปแบบ Compound strip ทุกรอบการเก็บตัวอย่างจะเก็บยางคอมพาวนด์ที่อัดรีดออกมาหลังผ่านไป แล้ว 5 เมตร เพื่อให้ได้คอมพาวนด์สตริปที่มีขนาดที่เสถียร หลังจากนั้นนำมาเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องตามระยะเวลา 1,5 และ 10 วันตามลำดับเพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาของคอมพาวนด์ที่มีต่อสมบัติยาง ตัวอย่างยางคอมพาวนด์ที่ผ่านการอัดรีดผ่านเงื่อนไขที่แตกต่างกันเหล่านี้จะถูกนำไปทดสอบค่าความหนืดและพฤติกรรมการคงรูปของยางต่อไป

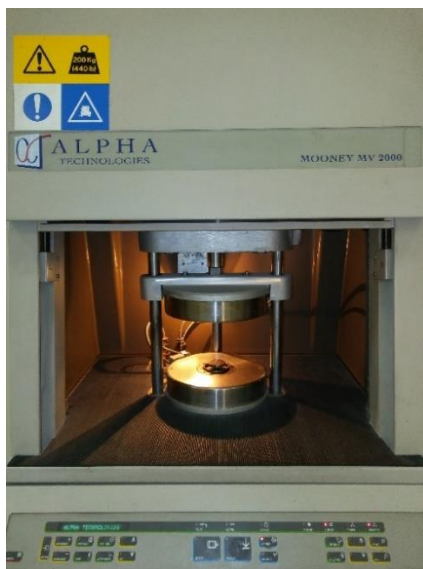
2. หลังจากนั้นนำคอมพาวนด์ถูกกดผ่านเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งเพื่อทำเป็นแผ่นคอมพาวนด์เข้าสู่กระบวนการคงรูปที่อุณหภูมิ 140, 150 และ 160 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 18 นาที โดยเครื่องอัดขึ้นรูปอย่างง่าย เครื่องขึ้นรูปกึ่งอัตโนมัติ ยี่ห้อ RIMPEX รุ่น XYC 50 ใช้แม่พิมพ์ขนาด 14.6 นิ้ว × 16.6 นิ้ว เพื่อนำตัวอย่างมาทำการทดสอบต่อไป ซึ่งการเตรียมตัวอย่างคอมพาวนด์แสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเตรียมตัวอย่างคอมพาวนด์ที่นำมาใช้ในการทดสอบ

อุณหภูมิการอัดรีด (°C)	ระยะเวลาการเก็บยางคอมพาวนด์ (วัน)	อุณหภูมิคงรูป (°C)
50	1	140, 150 และ 160 (27 ตัวอย่าง)
60		
70		
50	5	
60		
70		
50	10	
60		
70		

3.3.2. การทดสอบความหนืด (Mooney viscosity)

การทดสอบหาค่าความหนืดทำโดยนำยางคอมพาวนด์ที่ผสมได้ตัดเป็นชิ้นตัวอย่าง 2 ชิ้น มีน้ำหนักรวม 27 ± 3 กรัม แล้วนำไปใส่ทดสอบค่าด้วยเครื่องทดสอบหาค่าความหนืดของยาง (Mooney viscometer) ยี่ห้อ alpha รุ่น MV-2000 ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1+1.5 นาที



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบหาค่าความหนืดของยาง [16]

3.3.3. การทดสอบพฤติกรรมกรรมการคงรูปยาง (Cure characteristic)

ทดสอบพฤติกรรมกรรมการคงรูป ด้วยเครื่อง Alpha technologist Rheometer (MDR 2000) ที่อุณหภูมิ 140, 150 และ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D5289 โดยตัดยางที่ผ่านการคงรูปแล้วเป็นชิ้นตัวอย่าง 2 ชิ้นต่อ 1 เงื่อนไขการขึ้นรูป น้ำหนัก 5 กรัม/ชิ้น มาทำการทดสอบและหาค่าเฉลี่ย ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ ระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time) และ ระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ (Curing time) ตามมาตรฐานของ โรงงาน คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางวัลคาไนซ์ไป 25% (t_{25}) และ 90% (t_{90}) ตามลำดับ

3.3.4. การทดสอบความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางและการเกิดเจล [17]

1. การหาความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวาง (Crosslink density) โดยการแช่ตัวอย่างยางที่ผ่านการคงรูปมาตัดเป็นขนาด 10x10 มม. ในโทลูอีนเป็นเวลา 72 ชม. ที่อุณหภูมิห้องเพื่อกำจัดสาร activators and accelerators ออกจากตัวอย่างทดสอบ ต่อมาอบในตู้อบสุญญากาศที่ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำหนักก่อนและหลังอบของตัวอย่างทดสอบที่ผ่านการแช่ในโทลูอีน ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของตัวอย่างทดสอบถูกคำนวณโดยทฤษฎีของ Flory-Rehner ดังสมการต่อไปนี้ [18] [19]

$$V = \frac{-\ln(1-V_{2m}) + V_{2m} + XV^2_{2m}}{V_1(V^{\frac{1}{3}}_{2m} - \frac{V_{2m}}{2})} \quad (3.1)$$

- V คือ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง
 V_{2m} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของยางที่บวม
 V_1 คือ ปริมาตร/โมล ของตัวทำละลาย
X คือ ค่าพารามิเตอร์ของแรงที่กระทำกันระหว่างยางกับตัวทำละลาย ($X=0.377$) [20]

$$V_{2m} = \frac{\left(\frac{w_1}{\rho_{2m}} - \frac{w_f}{\rho_f}\right)}{\left(\frac{w_1}{\rho_{2m}} - \frac{w_f}{\rho_f}\right) + \left(\frac{w_2 - w_1}{\rho_1}\right)} \quad (3.2)$$

W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างก่อนแช่ตัวทำละลาย

W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังแช่ตัวทำละลาย

W_f คือ น้ำหนักของสารตัวเติมในชิ้นตัวอย่าง

ρ_{2m} คือ ความหนาแน่นของยาง

ρ_f คือ ความหนาแน่นของสารตัวเติม

ρ_1 คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลาย

2 การทดสอบหาปริมาณการเกิดเจล

นำผลการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ได้จากการดำเนินการในข้อ 3.3.4 มาคำนวณหาค่าปริมาณการเกิดเจลด้วยสูตรดังต่อไปนี้ [21] [22]

$$\%Gel \text{ content} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างก่อนแช่ตัวทำละลาย

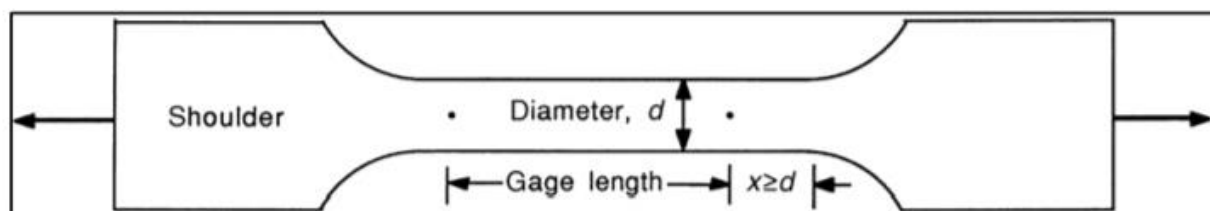
W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังแช่ตัวทำละลาย

3.3.5. การทดสอบแรงดึง

หลังจากได้ตัวอย่างยางคงรูปที่ผ่านการขึ้นรูป ณ อุณหภูมิต่าง ๆ แล้วนั้น นำตัวอย่างยางคงรูปมาตัดชิ้นตัวอย่างทดสอบแบบ Die D แล้วนำตัวอย่างยางรูปแบบคัมเบลดังรูปที่ 3.3 ไปทดสอบหาค่าการต้านทานแรงดึง ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ด้วยเครื่อง Instron universal testing machine (Instron 5900, USA) ดังรูปที่ 3.2 ตาม ASTM D 412 ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึง [13]

3.3.6. การวิเคราะห์สภาพโครงยาง

เครื่องตรวจสอบสภาพโครงยาง ยี่ห้อ SDS Systemtechnik GmbH รุ่น ITT1 เพื่อตรวจสอบหาข้อบกพร่องภายในโครงยางที่สายตาเรามองไม่เห็น เครื่องชนิดนี้ใช้วิธีการดันทดสอบด้วยสุญญากาศ เพื่อบ่งชี้ให้เห็นถึงข้อบกพร่องของวัสดุ โดยการดึงพื้นผิวของวัสดุด้วยสุญญากาศที่ปรับได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบในตัวอย่างยางขนาด 27x7.75-15 นิ้ว ใช้แรงดันสุญญากาศที่ 45 มิลลิบาร์ และจะแสดงผลการวิเคราะห์ออกมาในภาพลักษณะไฮโลแกรมผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์แบบทันที รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะเครื่องตรวจสอบสภาพโครงยาง



รูปที่ 3.4 เครื่องตรวจสอบสภาพโครงยาง [23]

3.3.7. การตรวจสอบลักษณะภายนอกยาง

นอกจากการตรวจสอบข้อบกพร่องต่างๆในโครงยางแล้วนั้นยังต้องมีการตรวจสอบสภาพภายนอกของยางด้วยเพื่อหาข้อบกพร่องหรือรอยแผลต่างๆที่อาจเกิดขึ้นจากการผลิต โดยการตรวจสอบนั้นโดยการใช้วิธีตรวจสอบด้วยสายตา ซึ่งจำเป็นจะต้องมีความทักษะในการตรวจสอบอยู่พอสมควร

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองหาอุณหภูมิการอัดรีดและวัลคาไนเซชันของยางคอมพาวนด์หน้ายางรหัส N17 ที่ใช้สำหรับผลิตยางล้อดอกเครื่องบิน โดยมีการใช้อุณหภูมิการอัดรีดที่ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และศึกษาอุณหภูมิการคงรูปที่ 140 150 และ 160 องศาเซลเซียส รวมทั้งศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาคอมพาวนด์หน้ายางก่อนการคงรูปเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตยางล้อดอกในโรงงาน ได้ผลออกมาตามหัวข้อต่างๆดังนี้

4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการอัดรีดคอมพาวนด์ที่มีต่อค่าความหนืด (Mooney Viscosity)

ตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการอัดรีดยางคอมพาวนด์ไม่ส่งผลต่อค่าความหนืดของยางหลังการอัดรีด ทำให้ค่าความหนืดของยางที่ผ่านการอัดรีดที่อุณหภูมิต่างกันไม่เกิดความแตกต่างเนื่องจากอุณหภูมิการอัดรีดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลยางคอมพาวนด์เพียงแค่ขณะหนึ่งเท่านั้นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการอัดรีดยางคอมพาวนด์ซึ่งมีการให้ความร้อนและแรงเฉือนทำให้ยางคอมพาวนด์นิ่มลง ง่ายต่อการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเก็บยางคอมพาวนด์ไว้นานขึ้นเนื่องจากการเกิดเจล (Gel fraction) ตารางที่ 4.2 แสดงผลของปริมาณการเกิดเจลในยางขณะเก็บไว้ก่อนการคงรูป ซึ่งให้เห็นว่ายิ่งเก็บยางไว้นานขึ้นปริมาณการเกิดเจลจะยิ่งเพิ่มขึ้นตามมาด้วยส่งผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เรียกว่าการเกิดความแข็งขณะเก็บในยางธรรมชาติ (Storage hardening) เนื่องจากโมเลกุลยางประกอบประกอบด้วยหมู่ปลาย 2 ชนิด ได้แก่ ปลายที่ต่อกับโปรตีน และปลายที่มีหมู่มอนอหรือไดฟอสเฟตต่อกับฟอสโฟไลปิด โดยหมู่ปลายทั้งสองนี้เป็นส่วนประกอบหลักที่ไม่ใช่ยางถึงแม้จะมีปริมาณน้อยแต่ส่งผลต่อสมบัติของยาง โดยทั่วไปยางจะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและโครงสร้างแบบโซ่กิ่งหรือแบบร่างแห เป็นส่วนที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย เรียกว่าเจลซึ่งเป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างหมู่ปลายทั้งสองกับโมเลกุลยาง ทำให้ยางที่ได้ยากต่อการควบคุมการผลิตและต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในกระบวนการบดยาง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีค่าเพิ่มขึ้น [24]

ตารางที่ 4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการอัดรีดคอมพาวนด์ต่อค่าความหนืดของยาง

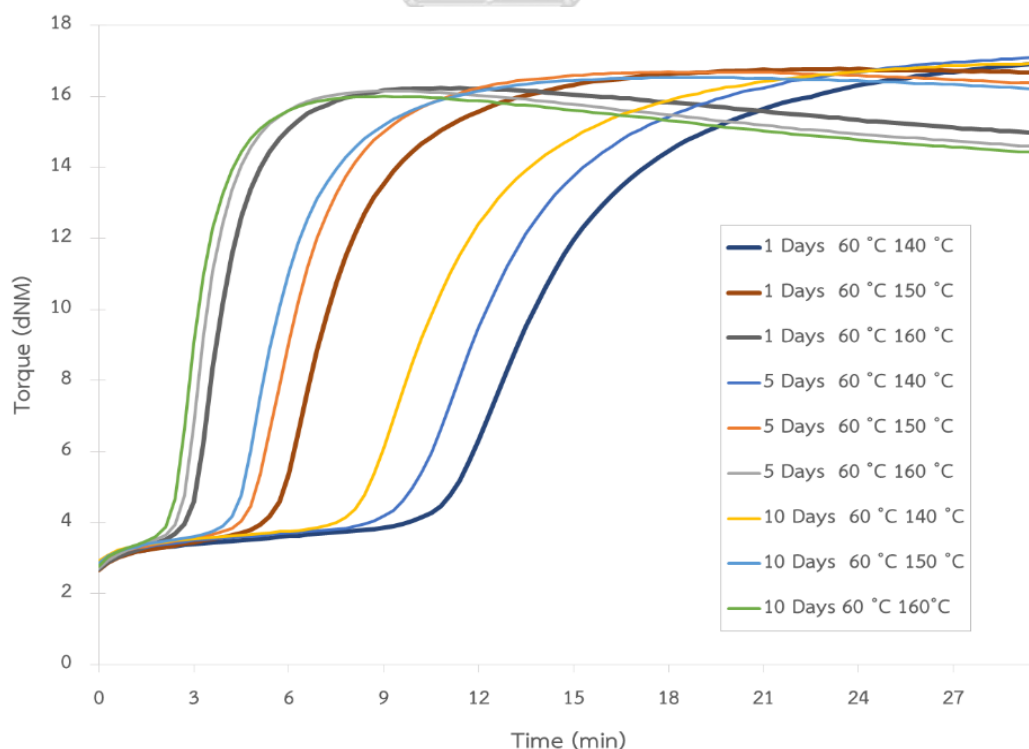
	อุณหภูมิ การอัดรีด (°C)	ระยะเวลาการเก็บยางคอมพาวนด์ (วัน)		
		1	5	10
ค่าความหนืด (Mooney viscosity)	50	35.1 ± 0.22	37.4 ± 0.36	39.5 ± 0.25
	60	34.7 ± 0.08	37.3 ± 0.48	39.8 ± 0.56
	70	34.9 ± 0.24	38.5 ± 0.13	40.0 ± 0.16

ตารางที่ 4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิการอัดรีดคอมพาวนด์ต่อปริมาณการเกิดเจล

	อุณหภูมิ การอัดรีด (°C)	ระยะเวลาการเก็บยางคอมพาวนด์ (วัน)		
		1	5	10
ปริมาณการเกิดเจล (%Gel content)	50	10.99 ± 0.18	11.16 ± 0.06	13.84 ± 0.31
	60	11.02 ± 0.22	11.08 ± 0.45	15.85 ± 0.74
	70	10.36 ± 0.54	11.65 ± 0.38	13.12 ± 0.46

4.2 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการคงรูป

ยางคอมพาวนด์ที่ผ่านการคงรูปที่อุณหภูมิ 140 150 และ 160 องศาเซลเซียสแสดงดังภาพที่ 4.1 ค่า Scorch time, Cure time และ Delta torque ลดลงเมื่ออุณหภูมิการคงรูปเพิ่มขึ้นและมีการเก็บยางคอมพาวนด์นานขึ้น ที่อุณหภูมิการคงรูปที่สูงมีอิทธิพลต่อการเชื่อมขวางที่เร็วขึ้น โดยสายโซ่โมเลกุลมีแนวโน้มที่จะดูดซับพลังงานความร้อนมากขึ้นส่งผลให้ค่า Scorch time และ Cure time (ระยะเวลาที่ยางคงรูป : t_{90}) ลดลงเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน เมื่อค่า Delta Torque แสดงปริมาณของโมเลกุลที่ควรที่จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาการเชื่อมขวางทำให้ค่า Delta Torque ลดลง



รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปยางคอมพาวนด์ N17 ที่อัดรีด ณ อุณหภูมิ 60 °C

ตารางที่ 4.3 การทดสอบพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่มีระยะเวลาการเก็บแตกต่างกัน

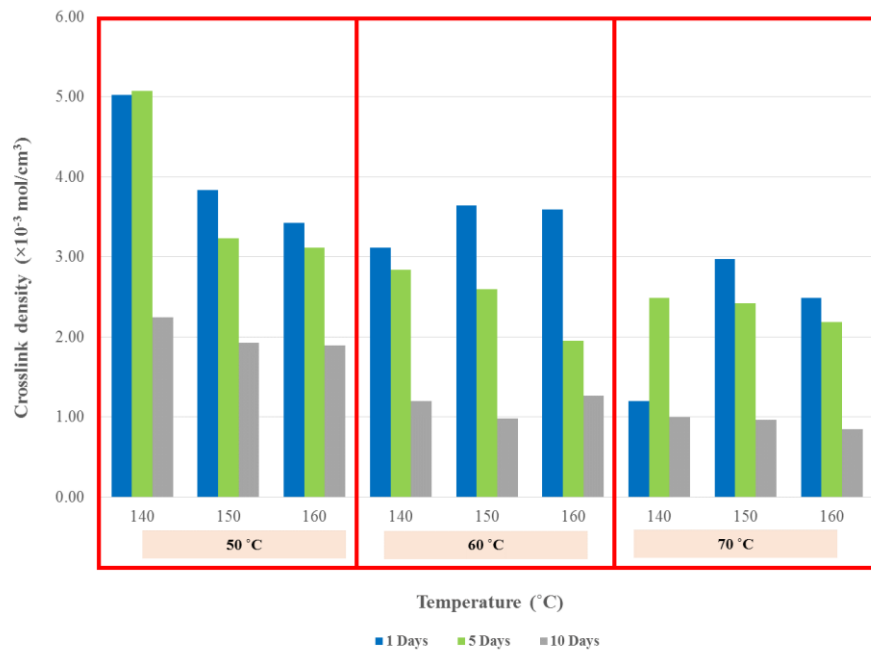
	อุณหภูมิ การคงรูป (°C)	ระยะเวลาการเก็บยางคอมพาวนด์ (วัน)		
		1	5	10
Scorch time (min)	140	12.26 ± 0.72	11.83 ± 0.78	9.37 ± 0.21
	150	6.38 ± 0.13	5.75 ± 0.26	5.09 ± 0.03
	160	3.57 ± 0.26	3.50 ± 0.40	2.90 ± 0.036
Cure time (min)	140	20.86 ± 0.28	19.83 ± 0.95	16.96 ± 0.20
	150	11.67 ± 0.45	10.13 ± 0.55	9.17 ± 0.05
	160	6.70 ± 0.16	5.87 ± 0.66	4.97 ± 0.08
Delta torque (dNm)	140	14.19 ± 0.35	14.11 ± 0.17	14.05 ± 0.06
	150	14.11 ± 0.13	13.82 ± 0.08	13.69 ± 0.17
	160	13.68 ± 0.46	13.64 ± 0.22	13.31 ± 0.11

*ตัวอย่างที่ผ่านการอัดรีด ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

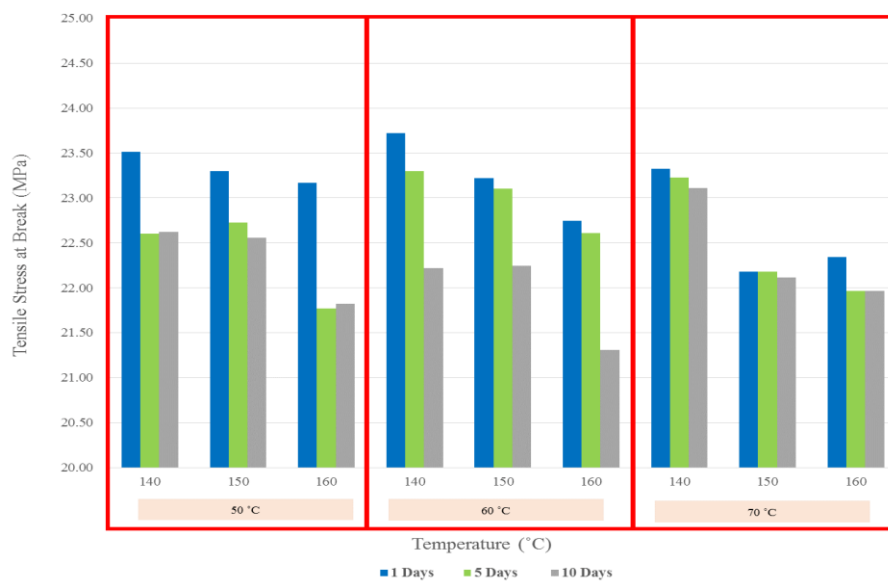
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อความหนาแน่นการเชื่อมขวางและสมบัติทางกล [19]

จากงานวิจัยที่มีศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการคงรูปยางที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของยางที่ผสมระหว่าง NR/SBR (Natural rubber/Styrene butadiene rubber blends) คงรูปที่อุณหภูมิต่างกันที่ 140 และ 160 องศาเซลเซียส พบว่าขนาดอนุภาคของยาง SBR เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการคงรูปลดลง และมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อคงรูปยางที่ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการเข้ากันได้ดีของยางผสม [14] ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ การหาค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (Crosslink Density) และค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile Testing) จากภาพที่ 4.2 ผลของความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยางคอมพาวนด์แสดงให้เห็นว่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิการอัดรีดและอุณหภูมิการคงรูปยางคอมพาวนด์ การเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่ยางคอมพาวนด์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการคงรูปของยาง เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาควตาคาไนซ์หรือการเชื่อมขวางของซัลเฟอร์ให้เกิดได้เร็วขึ้นเวลาที่ใช้เกิดพันธะเชื่อมโยงสั้นทำให้ปริมาณของการเกิดพันธะเชื่อมขวางเกิดขึ้นน้อยส่งผลต่อสมบัติทางกล ดังรูปที่ 4.3 ค่าการต้านทานแรงดึง (Tensile stress at break) ลดลงเล็กน้อยเมื่อมีเพิ่มอุณหภูมิการคงรูปและระยะเวลาในการเก็บยางคอมพาวนด์ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวาง เนื่องจากความทนต่อแรงดึงของยางคงรูปจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับระดับการเชื่อมขวางที่เหมาะสม เช่นเดียวกับค่ามอดูลัสที่ระยะยืดดึง 300 % ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการคงรูปมากขึ้น ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง [25] ใน

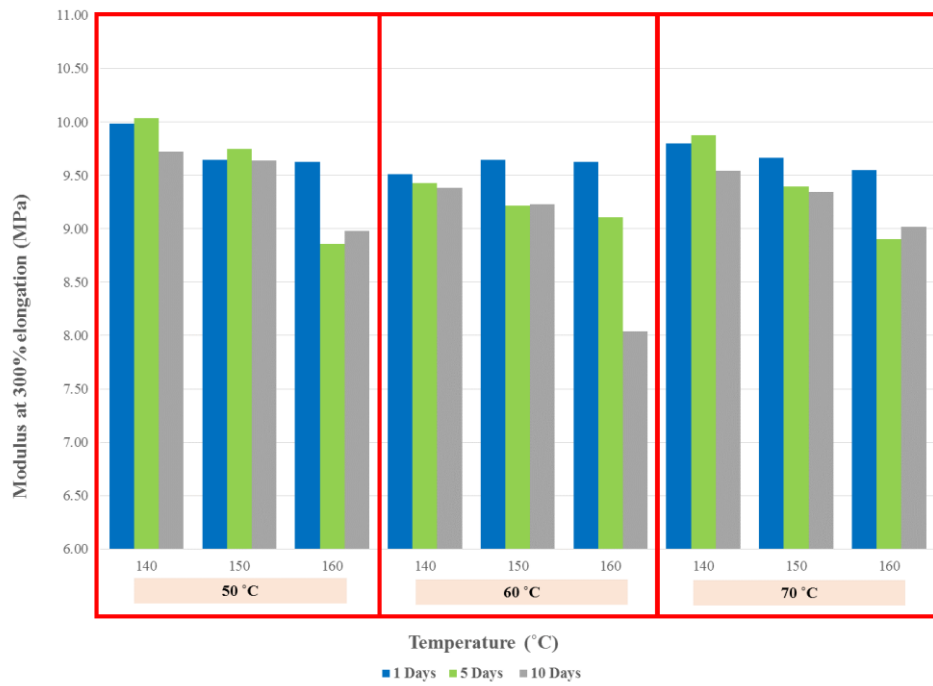
ส่วนของค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ดังรูปที่ 4.5 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคงรูปเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงยางจะมีความความต้านทานต่อแรงกระทำลดลงทำให้ความสามารถในการยืดดึงเพิ่มมากขึ้น มีการเชื่อมขวางของพันธะที่สูงทำให้การเคลื่อนที่ของโซ่ยางจะถูกจำกัด และสายโซ่จะไม่สามารถกระจายความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปผ่านการเคลื่อนที่ของโมเลกุล ส่งผลให้เกิดการแตกร้าวดังง่ายและเปราะ [26]



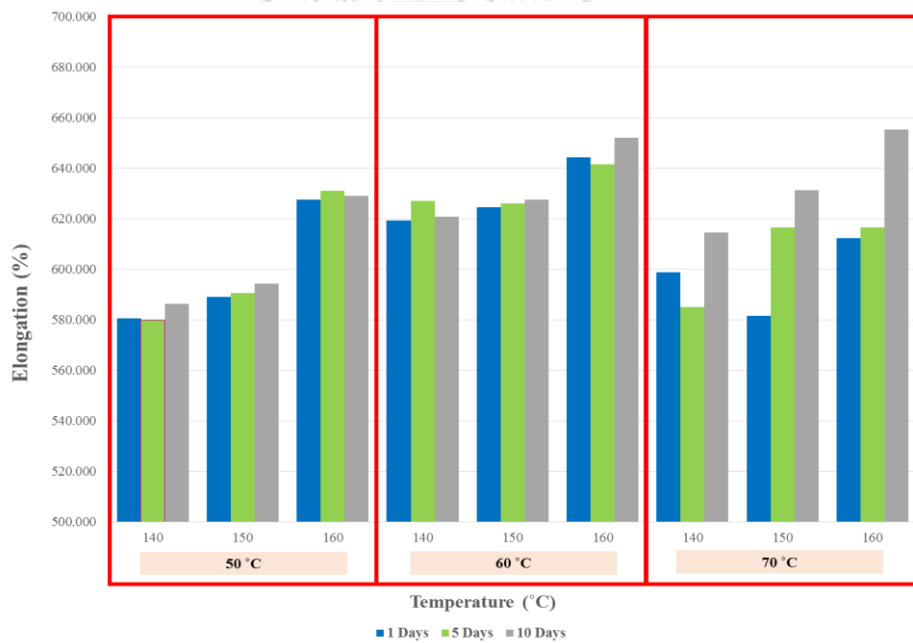
รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิการอัดรีดต่อค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวาง



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการต้านทานแรงดึง



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อค่ามอดุลัสที่ระยะยืดถึง 300%



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาด

4.4 ผลของการตรวจสอบสภาพโครงสร้าง

4.4.1 การตรวจสอบภายในโครงสร้าง

จากการนำยางคอมพาวนด์ที่ผ่านการอัดรีดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มาทำการปูเป็นหน้ายางลงไปบนโครงสร้างเครื่องบินแล้วนำไปผ่านการคงรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นข้อกำหนดเดิมของทางโรงเรียน แต่ก่อนการคงรูปได้มีการวางยางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ ณ เส้นผลิตยางหล่อตอก (30-40 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1, 5, และ 10 วัน ตามลำดับ เมื่อมีการคงรูปยางแล้วได้นำมาตรวจสอบสภาพโครงสร้างด้วยเครื่อง Shearography เพื่อหาข้อบกพร่องภายในยางพบว่ายางที่ผ่านการเก็บไว้ระยะเวลาต่างๆ ไม่เกิดสิ่งผิดปกติในโครงสร้างแต่อย่างใด ซึ่งเป็นไปได้ว่าระยะเวลาในการเก็บรักษา ยางนั้นไม่ส่งผลต่อความเสียหายของตัวโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.4

4.4.2 การตรวจสอบภายนอกโครงสร้าง

จากการตรวจสอบลักษณะภายนอกของยางที่ผ่านการคงรูปตามเงื่อนไขเดียวกับข้อ 4.4.1 แล้วนั้นพบว่ายางที่มีการเก็บไว้ก่อนการคงรูปเป็นเวลา 1 วัน และ 5 วัน ดังรูปที่ 4.5 (a) และ (b) ตามลำดับ หน้ายางไม่ไหลเกินขอบยางออกมา เมื่อวัดความหนาของชั้นหน้ายางตามมาตรฐานของทางโรงงานแล้วนั้นความหนาของยางยังคงอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ตามข้อกำหนดที่โรงงานตั้งไว้ แต่พบว่ายางที่มีการเก็บไว้ก่อนการคงรูปเป็นระยะเวลา 10 วันดังรูปที่ 4.5 (c) เกิดร่องบนยางหรือเรียกว่ายางเบา (Light tread) หรือยางไหลไม่เต็มจากการศึกษาเพิ่มเติมและสอบถามผู้รู้คาดว่าสาเหตุเกิดจากเมื่อมีการเก็บยางไว้ในระยะเวลาที่นานจะทำให้ตัวยางคอมพาวนด์มีความหนืดที่สูงขึ้นทำให้การไหลตัวภายในแม่แบบไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้งยังสอดคล้องกับผลการทดสอบพฤติกรรมการคงรูปยางที่ว่า ยางที่เก็บไว้เป็นระยะเวลานานกว่าจะเกิดการวัลคาไนเซชันได้เร็วขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดการวัลคาไนเซชันไปแล้วนั้นทำให้ไม่สามารถไหลให้เต็มแม่แบบได้ อีกแง่หนึ่งคือยางที่ผ่านการเก็บไว้ก่อนการคงรูปนานจะทำให้เกิดการปนเปื้อนฝุ่น หรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ได้มากขึ้นก็ส่งผลต่อการขึ้นรูปยางเช่นกัน



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะภายในโครงยางของยางที่มีเก็บไว้ก่อนคงรูปเป็นเวลา (a) 1 วัน (b) 5 วัน (c) 10 วัน



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการเกิดร่องบนหน้ายางของยางที่มีเก็บไว้ก่อนคงรูปเป็นเวลา (a) 1 วัน (b) 5 วัน (c) 10 วัน

4.5 ผลของอุณหภูมิการคงรูปร่างต่อต้นทุนการผลิตยางหล่อดอก

จากการคงรูปร่างหล่อดอกที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 140 150 และ 160 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าทั้งการทดสอบการคงรูปร่างคอมพาวนด์ในห้องทดลองด้วยเครื่อง MDR และการหาระยะเวลาการคงรูปร่างหล่อดอกในแม่แบบด้วยวิธีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) พบว่ายิ่งเพิ่มอุณหภูมิในการคงรูปร่างจะทำให้ระยะเวลาในการคงรูปร่างลดลง ส่งผลให้จำนวนยางที่ผลิตได้ต่อวันมีจำนวนเพิ่มขึ้น สามารถส่งยางออกขายได้เพิ่มขึ้น จากการคำนวณหาราคายางที่ขายได้ต่อวันนั้นพบว่าที่อุณหภูมิการคงรูป 150 องศาเซลเซียส ขายยางได้เพิ่มขึ้นถึง 19.23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามเราจำเป็นต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตในส่วนอื่นๆด้วย เนื่องจากการคงรูปร่างหล่อดอกที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าจะได้เวลาที่ดีกว่า แต่ต้องมีการใช้พลังงานในส่วนของแรงดันไอน้ำเพื่อไหลเวียนให้ความร้อนแก่ยางในแม่แบบมากขึ้น อีกทั้งการใช้อุณหภูมิที่สูงนั้นยังทำให้เบลดเตอร์หรือยางในที่ใส่ไว้ตรงกลางแม่แบบเพื่อให้ความร้อนแก่ยางนั้นแตกหรือร้าวได้ง่าย ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองต้นทุนในส่วนนี้ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิการคงรูปร่างต่อต้นทุนการผลิตยางหล่อดอก

อุณหภูมิการคงรูปร่าง (°C)	เวลาในการคงรูปร่างคอมพาวนด์ (นาท)	เวลาในการคงรูปร่างหล่อดอก (นาท)	จำนวนยางที่ผลิตได้ (เส้น/วัน)	ราคายางที่ขายได้ (บาท/วัน)
140	20.86	66	21	94,500
150	11.67	55	26	11,7000
160	6.7	45	32	14,4000

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ยางคอมพาวนด์พรีวัลคาไนเซชันถูกอัดรีดผ่านอุณหภูมิที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นความร้อนและแรงเฉือนที่ยางได้รับอย่างต่อเนื่องจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางนิ่มลง ง่ายต่อการขึ้นรูป แต่ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างยาง หลังจากมีการเก็บยางคอมพาวนด์ที่ผ่านการอัดรีดก่อนจะนำไปสู่กระบวนการคงรูป ยางจะเกิดเจลส่งผลให้มีการเกิดความแข็งขณะเก็บในยาง ค่าความหนืดของยางจึงเพิ่มขึ้นทำให้ยางนำไปขึ้นรูปได้ยากขึ้น อีกทั้งยางที่เก็บไว้นานนั้นอาจสัมผัสกับสิ่งแปลกปลอมเกิดการปนเปื้อนในยางได้ สำหรับยางที่ผ่านการคงรูปที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ค่าการความหนาแน่นพันธะการเชื่อมขวางที่ต่ำ ส่งผลต่อสมบัติทางกลลดลง ได้แก่ การต้านทานแรงดึง ค่ามอดูลัส ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ยางเกิดการเปราะ และไม่แข็งแรงทนทานเมื่อนำไปใช้งาน อุณหภูมิในการคงรูปของยางส่งผลต่อโครงสร้างการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุลยางคอมพาวนด์ สมบัติที่เหมาะสมที่สุดจะถูกดำเนินการภายใต้อุณหภูมิการคงรูปที่ต่ำที่สุดที่สามารถเป็นไปได้ ในที่นี้คืออุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เพราะในแง่การผลิตในโรงงานยังจำเป็นต้องคำนึงถึงเวลาในการดำเนินการซึ่งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสใช้เวลาการดำเนินการนานกว่า ทำให้ผลิตยางได้ต่อวันในปริมาณที่น้อยกว่า ส่วนการคงรูปที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสยังมีข้อด้อยอยู่มากนั่นคือการต้องใช้พลังงานที่มากขึ้นในการให้ความร้อนแก่แม่แบบ และความเสี่ยงที่จะเกิดเบลดเดอร์เสียหายได้บ่อยขึ้น และเลือกอุณหภูมิการอัดรีดยางคอมพาวนด์ที่ 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากยังคงสมบัติทางกลของยางคอมพาวนด์ที่ดี อีกทั้งไม่ควรเก็บยางก่อนการคงรูปไว้นานหากไม่จำเป็น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตยางที่อุณหภูมิการอัดรีดที่ 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการคงรูปที่ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตยางล้อดอกเพื่อที่จะบรรลุความต้องการของลูกค้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ทำการทดลองปรับความเร็วรอบการทำงานของเครื่องอัดรีดยางคอมพาวนด์ และเปรียบเทียบว่าความเร็วรอบที่แตกต่างกันมีผลต่อสมบัติของยางหรือไม่
- 5.2.2 ทำการศึกษาหลังที่ต้องใช้ไปเมื่อมีการคงรูปยางผ่านอุณหภูมิที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาสภาวะการผลิตยางที่มีต้นทุนที่คุ้มค่าที่สุดสำหรับการผลิตในโรงงาน

บรรณานุกรม

1. Zhang, H., et al., Effect of curing temperature on properties of semi-efficient vulcanized natural rubber. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2016. **48**: p. 331 - 339.
2. Lee, K.C., et al., Effect of vulcanization temperature on curing characteristic, physical and mechanical properties of natural rubber/palygorskite composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. **223**: p. 012017.
3. ยางพารา. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://bit.ly/3ySylAk>. [2563, พฤศจิกายน 20].
4. The process of retreading. [Online]. Vaculug technologies limited. Available from: <https://bit.ly/2T8APRq> [2020, January 2]
5. ยางล้อดอกคืออะไร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://bit.ly/3z2IQH3>. [2563, กุมภาพันธ์ 14].
6. พงษ์ธร แซ่อูย. การทำให้ยางคงรูป. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://bit.ly/2UIVXOE>. [2563, มกราคม 30].
7. เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์. (ม.ป.ป.).[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://bit.ly/3hxTrk9> [2563, มกราคม 30].
8. นิธิอุทัย, พ., สารเคมีสำหรับยาง. 1985, ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
9. Rubber extrusion [Online]. Soluciones Globales y Gestión de Compras S.L. Available from: <https://bit.ly/2XZlFwf> [2020, January 13]
10. Rubber Extruders and Extrusion [Online]. Rubber and tyre machinery world. Available from: <https://bit.ly/36BuDVq> [2020, January 27]
11. Francis, D., 4 - Non-destructive evaluation (NDE) of composites: introduction to shearography, in *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, V.M. Karbhari, Editor. 2013, Woodhead Publishing. p. 56-83.
12. Optotechnik, S., Tire inspection machine, in *INTACT - Shearography Tire Inspection*. Germany.
13. ณัฐเขต หมูทอง, การทดสอบแรงดึงวัสดุโลหะ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<https://bit.ly/3xHAYu7> . [2563, พฤษภาคม 27].

14. Klat, D., H.A. Karimi-Varzaneh, and J. Lacayo-Pineda, Phase Morphology of NR/SBR Blends: Effect of Curing Temperature and Curing Time. *Polymers*, 2018. **10**(5): p. 510.
15. Al-nesrawy, S.H., M. Al-maamori, and H.R. Jappor, Effect of Temperature on Rheological Properties of SBR Compounds Reinforced by some Industrial Scraps as a Filler. *international journal of chemical sciences*, 2016. **14**: p. 1285-1295.
16. Mooney viscometer [Online]. Wikiwand. Available from: <https://bit.ly/3eiG3BC> [2020, September 1]
17. Siri-Upathum, C. and M. Sonsuk. Development of an efficient process for radiation vulcanization of natural rubber latex using hydroperoxide with sensitizers. in *Proceedings of the Second International Symposium on RVNRL (Radiation Vulcanisation of Natural Rubber Latex)*. 1996. Malaysia: Malaysian Inst for Nuclear Technology Research, MINT.
18. Tunlert, A., P. Prasassarakich, and S. Poompradub, Antidegradation and reinforcement effects of phenyltrimethoxysilane- or N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]aniline-modified silica particles in natural rubber composites. *Materials Chemistry and Physics*, 2016. **173**: p. 78-88.
19. Bansod, N.D., et al., Controlled growth of in situ silica in a NR/CR blend by a solution sol-gel method and the studies of its composite properties. *RSC Advances*, 2015. **5**(66): p. 53559-53568.
20. Moon, B., et al., Study on the Aging Behavior of Natural Rubber/Butadiene Rubber (NR/BR) Blends Using a Parallel Spring Model. *Polymers*, 2018. **10**: p. 658.
21. Hossain, K., et al., Physicochemical, Thermomechanical, and Swelling Properties of Radiation Vulcanised Natural Rubber Latex Film: Effect of Diospyros peregrina Fruit Extracts. *International Scholarly Research Notices*, 2013. **2013**: p. 1-8.
22. Nimpaiboon, A., S. Amnuaypornsrri, and J. Sakdapipanich, Influence of gel content on the physical properties of unfilled and carbon black filled natural rubber vulcanizates. *Polymer Testing*, 2013. **32**(6): p. 1135-1144.
23. Tyre Testing Equipment [Online]. Venture Technologies. Available from: <https://bit.ly/3eiGCeI> [2020, November 12]

24. พัชรา อินทแสง และ กิตติคุณ บุญวานิช, การลดปริมาณการเกิดเจล. วารสารยางพารา, 2015(20): p. 28-41.
25. Kruželák, J., R. Sýkora, and I. Hudec, Sulphur and peroxide vulcanisation of rubber compounds – overview. Chemical Papers, 2016. **70**(12): p. 1533-1555.
26. Mok, K.L. and A.H. Eng, Characterisation of crosslinks in vulcanised rubbers: From simple to advanced techniques. Malaysian Journal of Chemistry, 2018. **20**: p. 118-127.



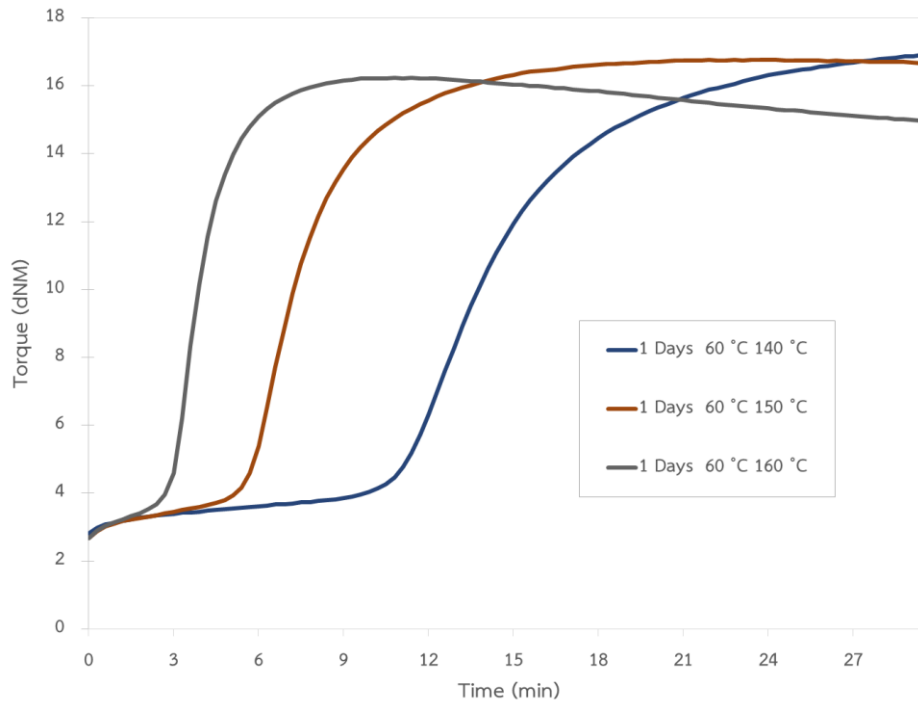


ภาคผนวก

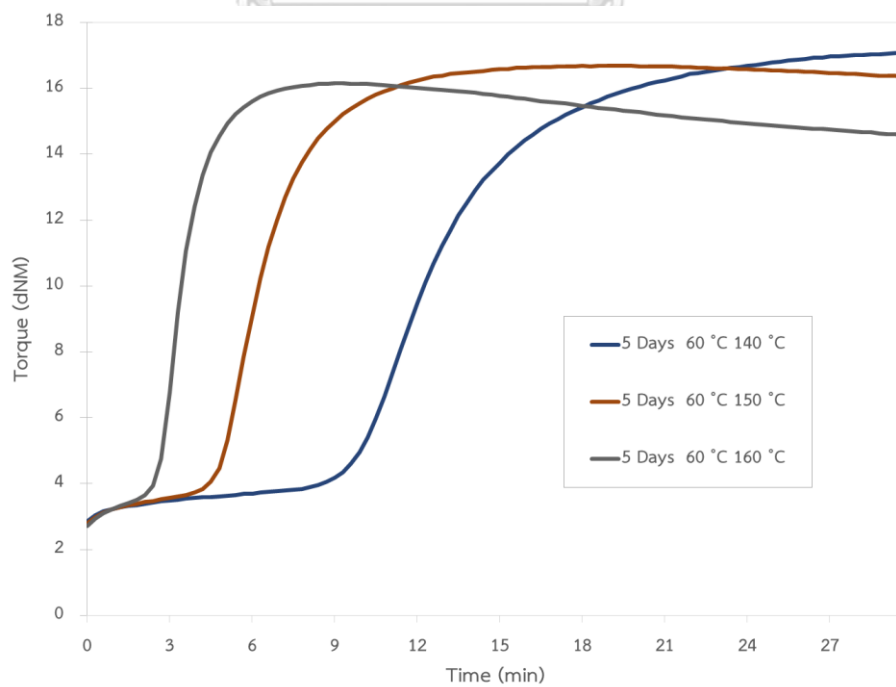
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

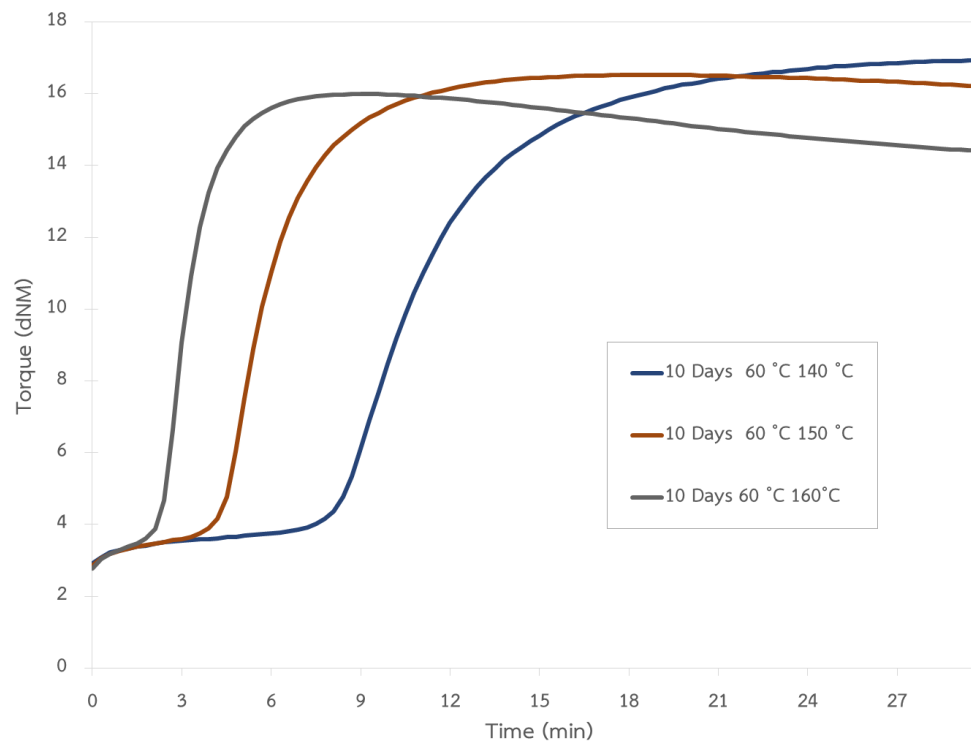
กราฟแสดงพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์



รูปที่ ก.1 กราฟแสดงพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 วัน



รูปที่ ก.2 กราฟแสดงพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เก็บไว้เป็นเวลา 5 วัน



รูปที่ ก.3 กราฟแสดงพฤติกรรมการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่เก็บไว้เป็นเวลา 10 วัน



ภาคผนวก ข

การคำนวณความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยาง

แสดงตัวอย่างการคำนวณยางที่อัดรีดที่อุณหภูมิ 50 °c คงรูปที่อุณหภูมิ 150 °c เก็บรักษาไว้เป็นเวลา 1 วัน

จากสมการของ Flory-Rehner

$$V = \frac{-\ln(1-V_{2m}) + V_{2m} + XV^2_{2m}}{V_1(V^{\frac{1}{3}}_{2m} - \frac{V_{2m}}{2})} \quad (3.1)$$

$$V_{2m} = \frac{\left(\frac{w_1}{\rho_{N17}} - \frac{w_f}{\rho_f}\right)}{\left(\frac{w_1}{\rho_{N17}} - \frac{w_f}{\rho_f}\right) + \left(\frac{w_2 - w_1}{\rho_1}\right)} \quad (3.2)$$

กำหนดให้

ความหนาแน่นของโทลูอีน (ρ_{toluene}) = 0.867 g/cm³

ความหนาแน่นของผงเขม่าดำ ($\rho_{\text{carbonblack}}$) = 1.820 g/cm³

ความหนาแน่นของคอมพาวนด์ N17 (ρ_{N17}) = 1.12 g/cm³

Molar mass toluene = 92.14 g/mol

X = 0.377

น้ำหนักก่อนแช่โทลูอีนของยาง (W1) = 0.2624 g

น้ำหนักหลังแช่โทลูอีนของยาง (W2) = 0.4283 g

น้ำหนักของสารเติมในยาง = 0.2624 × 0.328 g = 0.0861 g

หาสัดส่วนโดยปริมาตรของยางที่บวมตัว V_r

$$V_{2m} = \frac{\left(\frac{0.2624 \text{ g}}{1.12 \text{ g/cm}^3} - \frac{0.0861 \text{ g}}{1.820 \text{ g/cm}^3} \right)}{\left(\frac{0.2624 \text{ g}}{1.12 \text{ g/cm}^3} - \frac{0.0861 \text{ g}}{1.820 \text{ g/cm}^3} \right) + \left(\frac{0.4283 \text{ g} - 0.2624 \text{ g}}{0.867 \text{ g/cm}^3} \right)}$$

$$= 0.6723 \text{ cm}^3$$

หาปริมาตรต่อโมลของตัวทำละลาย V_1

$$V_1 = \frac{92.14 \text{ g/mol}}{0.867 \text{ g/cm}^3} = 106.27 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

หาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง V

$$V = \frac{-\ln(1 - 0.6723 \text{ cm}^3) + 0.6723 \text{ cm}^3 + (0.377)(0.6723 \text{ cm}^3)^2}{(106.27 \text{ cm}^3/\text{mol}) \left((0.6723 \text{ cm}^3)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{0.6723 \text{ cm}^3}{2} \right) \right)}$$

$$= 0.00384 \text{ mol/cm}^3$$

เพราะฉะนั้นความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยาง = 0.00384 mol/cm³

ภาคผนวก ค
การตรวจสอบสภาพยางจากภายนอก

ตารางที่ ค.1 การตรวจวัดความหนาของชั้นหน้ายาง

	SPEC. (mm.)	Section1		Section2		AVG
		SS	NSS	SS	NSS	
CL	8.6-10.1	9.69	-	9.38	-	9.54
C1	1.5-3.0	3.3	2.7	3	2.3	2.83
C2	3.0-5.0	5.5	5	5.4	4.7	5.15
C3	-	-	-	-	-	-
SH	10.2-11.4	10.6	11.1	11.6	10.3	10.90
Distance to SH	58.4					

โดยที่

Section คือ ส่วนของหน้ายางที่ตัดแบ่งออกมาตามแนวขวางของยางเพื่อตรวจดูชั้นต่าง ๆ ของยาง

SS คือ ยางด้านที่มีเลขซีเรียลนัมเบอร์กำกับ

NSS คือ ยางด้านที่ไม่มีเลขซีเรียลนัมเบอร์กำกับ

C1 คือ ร่องยางร่องที่หนึ่งนับจากกึ่งกลาง section

C2 คือ ร่องยางร่องที่สองนับจากกึ่งกลาง section

C3 คือ ร่องยางร่องที่สามนับจากกึ่งกลาง section

SH คือ ความหนาหน้ายางบริเวณไหล่ยาง

Distance to SH คือ ระยะตั้งแต่กึ่งกลางยางมาจนถึงไหล่ยาง

ภาคผนวก ง

การคำนวณราคาขายหล่อดอกที่ขายได้

เมื่อขายหล่อดอกขนาด 27x7.75 ราคา 4,500 บาท/เส้น

การคงรูปยางที่อุณหภูมิ 140 °C

จากการทดสอบหาระยะเวลาการคงรูปยางหล่อดอกโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ใช้ระยะเวลาในการคงรูป 66 นาที

1 วันมี 1,440 นาที

เพราะฉะนั้น 1 วัน ผลิตยางได้ $1,440/66 = 21$ เส้น

1 วันส่งยางขายได้ราคา $21 \times 4,500 = 94,500$ บาท

การคงรูปยางที่อุณหภูมิ 150 °C

จากการทดสอบหาระยะเวลาการคงรูปยางหล่อดอกโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ใช้ระยะเวลาในการคงรูป 55 นาที

1 วันมี 1,440 นาที

เพราะฉะนั้น 1 วัน ผลิตยางได้ $1,440/55 = 26$ เส้น

1 วันส่งยางขายได้ราคา $26 \times 4,500 = 117,000$ บาท

การคงรูปยางที่อุณหภูมิ 160 °C

จากการทดสอบหาระยะเวลาการคงรูปยางหล่อดอกโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ใช้ระยะเวลาในการคงรูป 45 นาที

1 วันมี 1,440 นาที

เพราะฉะนั้น 1 วัน ผลิตยางได้ $1,440/45 = 32$ เส้น

1 วันส่งยางขายได้ราคา $32 \times 4,500 = 144,000$ บาท

เมื่อเปรียบเทียบราคาขายยางหล่อดอกระหว่างอุณหภูมิการคงรูปที่ 140 °C และ 150 °C พบว่าที่

150 °C ขายยางได้มากขึ้น $117,000 - 94,500 = 22,500$ บาท คิดเป็น $\frac{22,500 \times 100}{117,000} = 19.23 \%$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พรทิพา ประสงค์เงิน
วัน เดือน ปี เกิด	21 ตุลาคม 2538
สถานที่เกิด	นครศรีธรรมราช
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่อยู่ปัจจุบัน	64 หมู่ 2 ตำบลเขาน้อย อำเภอสีชล จังหวัดนครศรีธรรมราช
ผลงานตีพิมพ์	โครงการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 11 เรื่อง “วิจัยและนวัตกรรมเพื่อเตรียมพร้อมรับการเปลี่ยนแปลง” หัวข้องานวิจัย : การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดของการรีดคอมพาวนด์หน้ายางและวัลคาไนเซชัน