



รายงานการวิจัย

การวิจัยและพัฒนาผลของอุณหภูมิต่ำที่เกี่ยวข้องต่อการเร่งการแข็งตัวของยางซิลิโคนเหลวชนิด RTV (Room Temperature Vulcanization)
Research and Development of Low Temperature Related to Accelerate the Curing RTV (Room Temperature Vulcanization) Liquid Silicone Rubber

จักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง
Jakkrit Yimchang

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ปี พ.ศ. 2559

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

โครงการวิจัย : การวิจัยและพัฒนาผลของอุณหภูมิต่ำที่เกี่ยวข้องต่อการเร่งการแข็งตัวของยางซิลิโคนเหลวชนิด RTV (Room Temperature Vulcanization)

ผู้วิจัย : นายจักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง

บทคัดย่อ

การวิจัยฉบับนี้ได้กล่าวถึงการลดระยะเวลาการทำแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใสโดยเร่งความแข็งด้วยอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส สามารถเก็บรายละเอียดของชิ้นงานได้ดีและสามารถมองเห็นชิ้นงานด้านในได้แต่แม่พิมพ์ยางซิลิโคนใสใช้เวลาในการแข็งตัวนาน จึงได้ศึกษาและทำการทดลองนำเอาอุณหภูมิความเย็นเข้ามาช่วยในการเร่งการแข็งตัวของซิลิโคนใสโดยกำหนดอุณหภูมิเป็น 3 อุณหภูมิ ประกอบด้วย 10,5,0 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา ประกอบด้วย 2,3,4 ชั่วโมง จึงทำการทดลองขั้นต่อไป

จากการทดลองโครงการลดระยะเวลาการทำแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใสโดยเร่งความแข็งด้วยอุณหภูมิต่ำเพื่อหาอุณหภูมิและช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมในการเร่งความแข็งของซิลิโคนใส พบว่าที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ช่วงระยะเวลา 3 ชั่วโมงมีค่าความแข็งใกล้เคียงกับตัวมาตรฐานและมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดนั้นสามารถลดระยะเวลาการแข็งตัวของซิลิโคนใสได้ 6 ชั่วโมงและมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับชิ้นงานมาตรฐาน

คำสำคัญ : RTV (Room Temperature Vulcanization)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีแม่พิมพ์เครื่องประดับ ที่ให้การสนับสนุนอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทำนุผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้ทุนสนับสนุน จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ



สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูปภาพ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 ความสำคัญของโครงการ	1
1.3 จุดประสงค์ของโครงการ	#
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ	
2.1 บทนำ	3
2.2 แนวคิด	3
2.3 นิยามศัพท์เฉพาะ	3
2.4 ทฤษฎีที่สำคัญ	
2.4.1 ทฤษฎีอย่าง	3
2.4.2 ทฤษฎีอย่างซิลิคอน	15
2.4.3 ทฤษฎีระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์	23
2.4.4 เครื่องดูดอากาศ	29
2.1	%
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ	
3.1 บทนำ	31
3.2 แผนการดำเนินการ	31
3.3. การออกแบบการทดลอง	32
3.4 ดำเนินการทดลอง	3%
3.5 บันทึกผลการทดลอง	39
3.6 สรุปผลการทดลอง	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	
4.1 บทนำ	49
4.2 การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	49
4.3 สรุปผลการทดลอง	53
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 บทนำ	54
5.2 สรุปผลที่ได้จากโครงการ	54
5.2.1 สรุปผลการทดลอง	54
5.2.2 สรุปตามวัตถุประสงค์	54
5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	54
5.4 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	55



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2.1	ชนิดและโครงสร้างของโมโนเมอร์ที่สำคัญในการสังเคราะห์ยาง	6
ตารางที่ 2.2	การเปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูประหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์	14
ตารางที่ 2.3	ยางซิลิโคนเกรดต่างๆ แบ่งตามมาตรฐาน ASTM D1418	15
ตารางที่ 2.4	สมบัติทั่วไปของยางซิลิโคน	16
ตารางที่ 2.5	เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย ของยางซิลิโคน	19
ตารางที่ 2.6	เพอร์ออกไซด์อินทรีย์	25
ตารางที่ 3.1	แสดงการเก็บข้อมูลการทดลองที่ 1 อุณหภูมิที่ 10°C	32
ตารางที่ 3.2	แสดงการเก็บข้อมูลการทดลองที่ 1 อุณหภูมิที่ 5°C	32
ตารางที่ 3.3	แสดงการเก็บข้อมูลการทดลองที่ 1 อุณหภูมิที่ 0°C	33
ตารางที่ 3.4	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 10°C เวลา 2 ชั่วโมง	39
ตารางที่ 3.5	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 10°C เวลา 3 ชั่วโมง	40
ตารางที่ 3.6	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 10°C เวลา 4 ชั่วโมง	41
ตารางที่ 3.7	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 5°C เวลา 2 ชั่วโมง	42
ตารางที่ 3.8	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 5°C เวลา 3 ชั่วโมง	43
ตารางที่ 3.9	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 5°C เวลา 4 ชั่วโมง	44
ตารางที่ 3.10	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 0°C เวลา 2 ชั่วโมง	45
ตารางที่ 3.11	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 0°C เวลา 3 ชั่วโมง	46
ตารางที่ 3.12	แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 0°C เวลา 4 ชั่วโมง	47
ตารางที่ 3.13	แสดงผลสรุปของผลการทดลอง	48
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส อุณหภูมิ 10°C	49
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส อุณหภูมิ 5 °C	50
ตารางที่ 4.3	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส อุณหภูมิ 0°C	51

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินการ	31
แผนภูมิที่ 4.1	แสดงการหาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส อุณหภูมิ 10°C	50
แผนภูมิที่ 4.2	แสดงการหาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส อุณหภูมิ 5 °C	51
แผนภูมิที่ 4.3	แสดงการหาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส อุณหภูมิ 0°C	52
แผนภูมิที่ 4.4	แสดงผลสรุปการหาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส อุณหภูมิ 10°,5°C,0°C	52



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างธรรมชาติ	4
รูปที่ 2.2	สูตรโครงสร้างยางพารา	5
รูปที่ 2.3	สูตรโครงสร้างยาง SER	7
รูปที่ 2.4	สูตรโครงสร้างยาง NBR	8
รูปที่ 2.5	สูตรโครงสร้างยาง CR	9
รูปที่ 2.6	ยางคลอโรพรีน	10
รูปที่ 2.7	สูตรโครงสร้างของยางบิวไทล์	10
รูปที่ 2.8	สูตรโครงสร้างของยางบิวทาไดอิน	11
รูปที่ 2.9	สูตรโครงสร้างของยางอีพิตีเอ็ม	12
รูปที่ 2.10	สูตรโครงสร้างของยางไดอินที่มีอยู่ในยางอีพิตีเอ็ม	13
รูปที่ 2.11	สูตรโครงสร้างของยางซิลิโคน	13
รูปที่ 2.12	ยางซิลิโคนแข็ง	18
รูปที่ 2.13	ยางซิลิโคนเหลว	18
รูปที่ 2.14	เครื่องดูดอากาศ	20
รูปที่ 2.15	เครื่องซั่ง	20
รูปที่ 2.16	ตู้เย็น	20
รูปที่ 2.17	เทอร์โมมิเตอร์	21
รูปที่ 2.18	กรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง	21
รูปที่ 2.19	นาฬิกา	21
รูปที่ 2.20	แก้วน้ำ - ไม้	22
รูปที่ 2.21	แอลกอฮอล์ - สำลี	22
รูปที่ 2.22	ยางซิลิโคน - ตัวเร่ง	22
รูปที่ 2.23	เครื่องดูดอากาศ	29
รูปที่ 3.1	การทำความสะอาดกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง	33
รูปที่ 3.2	การประกอบกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง	34
รูปที่ 3.3	การตวงยางซิลิโคนใส่กับตัวเร่ง	34
รูปที่ 3.4	การกวนยางซิลิโคนใส่กับตัวเร่ง	35
รูปที่ 3.5	การเทซิลิโคน	35
รูปที่ 3.6	การดูดอากาศ	36
รูปที่ 3.7	การนำยางซิลิโคนพักไว้ในอุณหภูมิห้องปกติ	36

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.8 การแช่ยางซิลิโคนในตู้เย็น	37
รูปที่ 3.9 การแกะกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง	37
รูปที่ 3.10 การวัดค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส	38



บทที่ 1

1.1 บทนำ

ปัจจุบันการทำแม่พิมพ์ยางเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่สำคัญอย่างมาก วัสดุที่นิยมนำมาทำแม่พิมพ์ยาง ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ทำจากยางสังเคราะห์ชนิดแผ่น ซึ่งต้องใช้ความร้อนในการขึ้นรูป โดยลักษณะของยางจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ยางใส ชนิด RTV (Room Temperature Vulcanization) และยางแผ่น HTV (High Temperature Vulcanization) ยางแต่ละชนิดมีวิธีการทำงานที่แตกต่างกัน โดยยางซิลิโคนใสชนิด RTV สามารถใช้แว็กซ์เป็นต้นแบบโลหะได้ โดยไม่ต้องใช้โลหะ สามารถมองเห็นชิ้นงานด้านในและยังสามารถเก็บรายละเอียดชิ้นงานได้ดีกว่ายางชนิดอื่น ยางซิลิโคนใส RTV จึงง่ายต่อการผ่าพิมพ์ยาง แต่ยางชนิดนี้จะใช้ระยะเวลาในการทำงานค่อนข้างนาน ประมาณ 10 ชั่วโมง จึงจะสามารถผ่าพิมพ์ยางได้

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเอายางซิลิโคนใส มาเป็นวัสดุหลักในการทำแม่พิมพ์ยาง ทั้งนี้จึงทำการศึกษาขอบเขตขั้นตอนการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการทำงาน

1.2 ความสำคัญของโครงการ

ที่ผ่านมา ในสถานประกอบการได้มีการทำแม่พิมพ์ยางโดยใช้ยางซิลิโคนใส แต่ประสบกับปัญหาในเรื่องของข้อจำกัดของเวลาที่เร่งด่วนในการทำงานส่งลูกค้า เพื่อเป็นการไม่เสียเวลา ทางสถานประกอบการจึงหาวิธีการลดระยะเวลาในการปฏิบัติงาน โดยการนำยางซิลิโคนใสแช่ในตู้เย็น เพื่อเป็นการเร่งให้ยางซิลิโคนใสมีการแข็งตัวเร็วขึ้น จากการทดลองที่อุณหภูมิปกติ 32°C จำนวน 5 ครั้ง ใช้เวลา 10 ชั่วโมง ทดสอบค่าความแข็งมาตรฐานได้ 43.9 ± 0.5 (Shore A) ผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาหาอุณหภูมิความเย็นที่เหมาะสม เพื่อช่วยในการลดระยะเวลาในการปฏิบัติงาน

1.3 จุดประสงค์ของโครงการ

- 1.3.1 เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ต่ำที่เหมาะสมต่อการเร่งการแข็งตัวของยางซิลิโคนเหลว
- 1.3.2 เพื่อลดเวลาในการผลิตแม่พิมพ์ยางซิลิโคนเหลว

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่สำคัญ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะศึกษาทฤษฎีที่สำคัญ และหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ “ยางซิลิโคนใส” ซึ่งเป็นเนื้อหาสำคัญที่ต้องใช้ศึกษาประกอบการทดลอง มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎียาง ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ ยางซิลิโคน เพอร์ออกไซด์ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำยางซิลิโคนใส เมื่อศึกษาทฤษฎีต่างๆ จึงนำความรู้ ทักษะ ที่ได้จากการศึกษา นำมาปฏิบัติงานได้จริง ส่งผลทำให้การทดลองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

2.2 แนวคิด

ในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ยาง นิยมใช้ยางซิลิโคนใสเนื่องจากยางซิลิโคนใสเหมาะกับงานที่ต้องเก็บรายละเอียด ใช้ได้กับต้นแบบทุกประเภท สามารถผลิตซ้ำได้หลายครั้งไม่หดตัว จึงทำให้หล่อชิ้นงานที่มีขนาดแม่นยำเหมือนต้นแบบ แต่ยางซิลิโคนใสใช้ระยะเวลาในการทำงานนานพอสมควร จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาอุณหภูมิความเย็นเข้ามาช่วยในการเร่งตัวของยางซิลิโคนใส เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการทำงาน และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งแก่ผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้ทำงานได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.3 นิยามศัพท์เฉพาะ

- Silastic T-4 หมายถึง น้ำยางซิลิโคนใส มีลักษณะเป็นน้ำสีใสขุ่นเป็นวัสดุที่ผสมกับตัวเร่ง
- Shore A หมายถึง หน่วยในการวัดค่าความแข็ง

2.4 ทฤษฎีที่สำคัญ

2.4.1 ทฤษฎียาง

ยางแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ได้แก่ ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

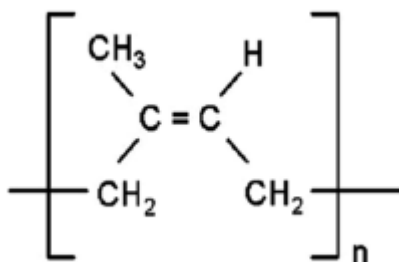
2.4.1.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR)

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง (Hevea Brazilliensis) ซึ่งมีต้นกำเนิดจากแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30% แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugel) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือ

จะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยางมือยางและยางอนามัย แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็กรี๊ดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70°C เวลา 3 วัน เราก็จะได้ยางแผ่นรมควัน

นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางที่มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควันผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางและยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR 5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพงและต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นยางแท่งจึงมีราคาสูงกว่ายางรมควัน

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene กล่าวคือ isoprene (C_5H_8) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 15-20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซิน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติ คือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่เชื่อมต่อการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็น

สมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกบ (assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์

อย่างไรก็ตามยางดิบจะมีขีดจำกัดในการทำงาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพไม่เสถียรขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ยางจะอ่อนแ่้ม และเหนียวเหนอะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้งานจำเป็นต้องมีการผสม ยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้จะนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อน และความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วุลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า “ยางสุกหรือยางคงรูป” (vulcanizate) ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและมีสมบัติเชิงกลที่ดี



รูปที่ 2.2 ยางพารา

ยางธรรมชาติถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ มากมาย เนื่องจาก

1) ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถูมือยาง ยางรัดของ

2) ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูงในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

3) ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เพราะในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้า ในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกับโอโซนโดยมีมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมัน และสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสิ่งต่างๆดังกล่าว

2.4.1.2 ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber, SR)

ยางสังเคราะห์ไม่ได้หมายถึงยางเทียมที่มีลักษณะทางเคมีและมีสมบัติคล้ายคลึงกับยางธรรมชาติเท่านั้นแต่ยังรวมถึงยางชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย สาเหตุสำคัญที่ผลักดันให้เกิดการริเริ่มค้นคว้าการผลิตยางสังเคราะห์จนขยายมาเป็นการผลิตเชิงการค้าสรุปได้ดังนี้

- 1) ปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติที่จำเป็นต้องใช้ในงานผลิตอาวุธยุทธภัณฑ์ในช่วงสงครามของบางประเทศ
- 2) ราคาที่ไม่แน่นอนของยางธรรมชาติ
- 3) ความต้องการยางที่มีคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น มีความทนทานต่อน้ำมัน สารเคมีและความร้อนสูงๆ

การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตโมโนเมอร์ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ยางสังเคราะห์แต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่ชนิดของโมโนเมอร์ ถ้ายางสังเคราะห์ประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวกัน เรียกว่า โฮโมโพลิเมอร์ (homopolymer) เช่น ยางโพลิบิวทาไดอีน (polybutadiene, BR) หรือยางโพลิไอโซพรีน (polyisoprene, IR) ยางสังเคราะห์บางชนิดอาจจะประกอบด้วยโมโนเมอร์มากกว่า 1 ชนิด เรียกว่า โคโพลิเมอร์ (copolymer) เช่น ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene-butadiene rubber, SBR) ชนิดและโครงสร้างของโมโนเมอร์

ตารางที่ 2.1 ชนิดและโครงสร้างของโมโนเมอร์ที่สำคัญในการสังเคราะห์ยาง

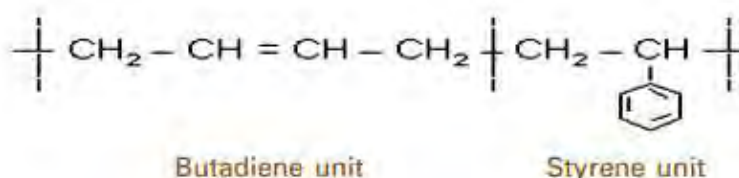
โมโนเมอร์	โครงสร้าง	จุดเดือด (°C)
Ethylene	$\text{CH}_2=\text{CH}_2$	-104
Propylene	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	-50
Isobutylene	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{C} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	-6
1,3-Butadiene	$\text{CH}_2=\text{CH}=\text{CH}=\text{CH}_2$	-4.5
Isoprene	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}=\text{CH}_2 \end{array}$	34
Chloroprene	$\begin{array}{c} \text{Cl} \\ \\ \text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}=\text{CH}_2 \end{array}$	59
Styrene (Vinylbenzene)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	145
Vinyl acetate	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH} \\ \\ \text{C}(=\text{O})\text{CH}_3 \end{array}$	72
Methyl methacrylate	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{C} \\ \\ \text{C}(=\text{O})\text{CH}_3 \end{array}$	80
Acrylonitrile	$\begin{array}{c} \text{CH}_2=\text{CH} \\ \\ \text{C}\equiv\text{N} \end{array}$	77

1) ยางสังเคราะห์ IR หรือ cis1,4-polyisoprene

ยาง IR เกิดจากความพยายามที่จะสังเคราะห์ยางที่มีสมบัติและโครงสร้างเหมือนกับยางธรรมชาติ โดยในปี ค.ศ. 1954 Goodrich ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ยาง IR จากไอโซพรีนโมโนเมอร์ (isoprene monomer) โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันชนิด Ziegler-Natta และได้ตั้งชื่อยางชนิดนี้ว่า “synthetic natural rubber” อย่างไรก็ตามยาง IR มีสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ต่ำกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย แต่มีข้อดีคือ คุณภาพของยางสม่ำเสมอ มีสิ่งเจือปนน้อยทำให้ยางมีสีขาวสวย (ในขณะที่ยางธรรมชาติจะมีสีเหลืองอ่อนถึงน้ำตาลเข้ม เนื่องจากมีสารเบต้าแคโรทีน (β -carotene) บางครั้งจะใช้ยาง IR แทนยางธรรมชาติในการผลิตยางจุกนมและอุปกรณ์การแพทย์บางชนิด

2) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน หรือยาง SBR (styrene-butadiene rubber)

ยางสไตรีนบิวทาไดอีนประกอบด้วย สไตรีนโมโนเมอร์ (styrene monomer) ประมาณ 23.5% และบิวทาไดอีนโมโนเมอร์ (butadiene monomer) ประมาณ 76.5% โมโนเมอร์ทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีแบบแผน (random copolymer) นอกจากนี้ การจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลของยาง SBR ก็ไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่สามารถเกิดการตกผลึก (crystalline) ได้เมื่อถูกยืด ยางจึงมีความทนต่อแรงดึงต่ำ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานจำเป็นต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วย



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของยาง SBR

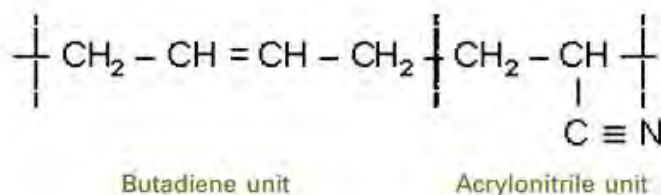
ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนำไปใช้ยางสไตรีนบิวทาไดอีนเป็นยางประเภทใช้งานได้ทั่วไป เช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยาง IR เพราะสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีคุณภาพสม่ำเสมอกว่า การนำไปใช้งานและสมบัติของยางคงรูปจึงสม่ำเสมอ มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า และไม่ต้องบดยางให้หยาบ (mastication) ก่อนการผสมสารเคมีในระหว่างกระบวนการผลิต เพราะยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สูงมากนัก มีความยืดหยุ่นเหมาะสมที่ทำให้สารเคมีกระจายตัวได้อย่างดีและยางก็ไหลได้ง่ายในระหว่างการผลิตขึ้นรูปในแบบต่างๆ ทำให้ยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีข้อดีเหนือกว่ายางธรรมชาติในด้านกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่า ประหยัดทั้งกำลังงานและเวลา ตลอดจนต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตามเนื่องจากยาง SBR มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ดังนั้นจึงเสื่อมสภาพเร็วในสภาวะที่มีออกซิเจน โอโซน หรือแสงแดด เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ แต่ความยืดหยุ่น (elasticity) ของยางสไตรีนบิวทาไดอีนจะต่ำกว่า ในขณะที่

ที่ความทนต่อน้ำมันใกล้เคียงกัน ยาง SBR ที่เสริมแรงด้วยสารเสริมแรง เช่น เขม่าดำ จะมีความทนต่อการขีดถูได้ดีกว่ายางธรรมชาติ แต่ว่าจะมีความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่า

ในการผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ ภาชนะหีบห่ออาหาร ยางชนิดนี้ส่วนมากจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางยานพาหนะขนาดเล็ก โดยการผสมกับยางชนิดอื่นๆ เช่น ยางบิวทาไดอีน (BR) และยางธรรมชาติ (NR) สาเหตุที่ไม่สามารถใชยางชนิดนี้เพียงชนิดเดียวในการผลิตยางยานพาหนะได้เพราะว่า ยางชนิดนี้จะทำให้เกิดความร้อนสะสมสูงในระหว่างการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน

3) ยางไนไตรล์ หรือยาง NBR (nitrile rubber)

ยางไนไตรล์เป็นโคโพลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์โมโนเมอร์ (acrylonitrile monomer) และบิวทาไดอีนโมโนเมอร์ (butadiene) ซึ่งประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ ตั้งแต่ 20-50% จากโครงสร้างของโมเลกุลจะเห็นได้ว่ามีหมู่ฟังก์ชัน CN- อยู่ ดังนั้น โมเลกุลจึงมีความเป็นขั้วทำให้ยางมีสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี ความทนน้ำมันจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอะคริโลไนไตรล์ที่มีในโมเลกุล

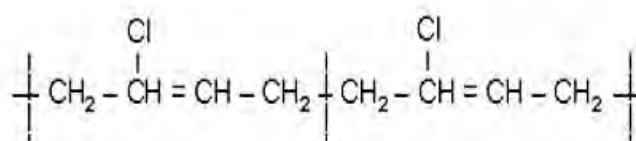


รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างยาง NBR

ยางไนไตรล์ไม่สามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (เช่นเดียวกับยาง SBR) ดังนั้นจึงมีค่าความทนต่อแรงดึงต่ำจำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย ส่วนความยืดหยุ่นจะมีค่าใกล้เคียงกับยาง SBR ยางชนิดนี้ส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เช่น ใช้ทำประเก็นน้ำมันยาง o-ring ยางเชื่อมต่อ สายพานลำเลียงหรือทำท่อดูดหรือส่งน้ำมัน

4) ยางคลอโรพรีนหรือยาง CR (chloroprene rubber)

ยางคลอโรพรีนมีชื่อทางการค้าว่า ยางนีโอพรีน (neoprene) เป็นยางสังเคราะห์จากคลอโรพรีนโมโนเมอร์ (chloroprene monomer) โมเลกุลของยางคลอโรพรีนสามารถจัดเรียงตัวได้อย่างเป็นระเบียบภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ยางชนิดนี้จึงสามารถตกผลึกได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยางคลอโรพรีนจึงมีค่าต่อแรงดึงสูง (โดยที่ไม่ใส่สารตัวเติม) นอกจากนี้ยังมีความทนต่อการฉีกขาดและการขีดถูสูงด้วย



Chloroprene unit

รูปที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของยาง CR

ยางคลอโรพรีนที่อยู่ในรูปของแข็งแบ่งออกเป็นประเภทการใช้งานทั่วไปและประเภทใช้งานพิเศษ ประเภทใช้งานทั่วไป ได้แก่ เกรด G W และ T และประเภทการใช้งานพิเศษ ได้แก่ เกรด AC AD AG และ FB เป็นต้น ซึ่งใช้สำหรับงานเฉพาะ เช่น ทำกาวยาง ยางใช้เคลือบ (coating) และ sealants โครงสร้างของยางคลอโรพรีนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการโพลิเมอไรซ์และ มีผลโดยตรงต่อกระบวนการตกผลึกหรือต่อความยืดหยุ่นของยาง ถ้าอุณหภูมิการโพลิเมอไรซ์สูงขึ้นจะ ได้ยางที่มีโครงสร้างที่สม่มาเสมอ น้อยลงมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่ปกติ ทำให้อัตราการตกผลึกต่ำลง ในทางตรงกันข้ามยางคลอโรพรีนที่ได้จากการโพลิเมอไรซ์ที่อุณหภูมิต่ำจะยังมีอัตราการตกผลึกสูง ซึ่งสมบัติเช่นนี้เป็นที่ต้องการของการผลิตกาวที่ต้องการความเหนียวติดทนทาน อย่างไรก็ตามเกรดนี้ไม่เหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ เพราะยางจะแข็งตัวอย่างรวดเร็วและ สูญเสียความยืดหยุ่น ดังนั้นยางคลอโรพรีนที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไปจึงต้องเป็นเกรดที่ ตกผลึกได้น้อย

ยางคลอโรพรีนมีสมบัติคล้ายยางธรรมชาติ คือ มีความเหนียวติดก๊ต (tack) ที่ดี ทำให้สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบจากหลายชิ้นส่วนได้ดี ยางคลอโรพรีนยังสามารถไหลเข้ามาเชื่อมกันได้ไม่ก่อให้เกิดปัญหารอยต่อของชิ้นงานในระหว่างการขึ้นรูปในเบ้าพิมพ์ เนื่องจากยางคลอโรพรีนเป็นยางที่มีขี้ เพราะประกอบด้วยอะตอมของคลอรีน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่มีขี้ พบว่ายางคลอโรพรีนจะทนต่อการบวมพองในน้ำมันได้ดี (แต่ ยังดีน้อยกว่ายาง NBR) นอกจากนี้อะตอมของคลอรีนยังทำให้ยางคลอโรพรีนมีสมบัติที่ดีในด้านการทน ต่อเปลวไฟ สภาพอากาศ และโอโซน อย่างไรก็ตามอะตอมของคลอรีนก็มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของยาง กล่าวคือ ทำให้ยางนำไฟฟ้าได้มากขึ้น ยางคลอโรพรีนจึงจัดอยู่ในกลุ่ม “antistatic” ไม่ใช่กลุ่มที่

เป็นฉนวน ดังนั้นยางชนิดนี้จึงไม่สามารถใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลได้แต่อาจใช้เป็นอย่างปลอกนอกของสายเคเบิลได้

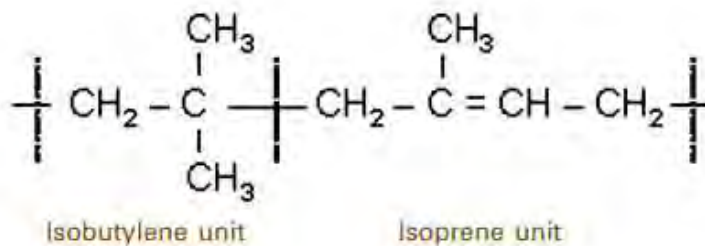
ยางคลอโรพรีนเกรดที่สามารถตกผลึกได้เล็กน้อยถึงปานกลางจะถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดี ทนต่อการติดไฟ ทนต่อน้ำมัน สภาพอากาศทั่วไปและโอโซน ซึ่งผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ ยางซีล ท่อยางเสริมแรง ยางพันลูกกลิ้ง สายพานยาง สายพานรูปตัววี (V-belt) ยางกันกระแทก (bearing) ยางบุ (lining) พื้นรองเท้าและผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ยางขอบหน้าต่าง ขอบหลังคา และยางปลอกสายเคเบิล ส่วนยางคลอโรพรีนเกรดที่ตกผลึกได้มากจะนิยมใช้ในการผลิตกาวยาง



รูปที่ 2.6 ยางคลอโรพรีน

5) ยางบิวไทล์ (butyl rubber, IIR)

ยางบิวไทล์เป็นโคโพลิเมอร์ระหว่างโมโนเมอร์ของไอโซพรีน (isoprene) และไอโซบิวทีลีน (isobutylene) โดยมีไอโซพรีนน้อยมากประมาณ 0.5-3% โมล เพียงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยกัมมะถันในระหว่างปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้เท่านั้น ทั้งนี้เพราะเมื่อในไอโซพรีนมีพันธะคู่ว่างไวต่อปฏิกิริยา



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของยางบิวไทล์

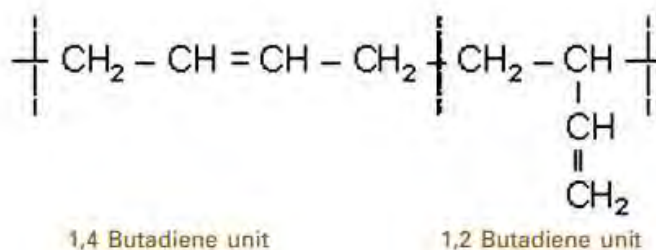
จากโครงสร้างทางเคมี จะเห็นว่ายางบิวไทล์ประกอบด้วยส่วนที่อิ่มตัว (saturaten) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ยางมีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน โอโซน และความร้อน

อย่างไรก็ตามพันธะคู่ที่มีที่มืออยู่เพียงเล็กน้อยก็ยังสามารถทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันได้ โดยที่การคงรูปจะเกิดได้เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปริมาณของพันธะคู่ ถ้าเพิ่มปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลการคงรูปก็จะเกิดได้เร็ว ยางจะมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงขึ้นแต่ความทนต่อโอโซนและสภาพอากาศจะด้อยลง

นอกจากสมบัติการทนต่อออกซิเจน ความร้อน และสภาพอากาศแล้ว ยางบิวไทล์ยังมีความทนต่อน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ได้ดีมาก ทนต่อกรดและด่าง รวมถึงทนต่อการถูกออกซิไดซ์โดยสารเคมีต่างๆ และสมบัติพิเศษอีกอย่างของยางบิวไทล์ คือ มีการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก (ต่ำกว่ายางธรรมชาติประมาณ 8-10 เท่า) ทำให้ยางบิวไทล์เหมาะในการผลิตยางในรถยนต์ ถูยางลมสำหรับบอยยางล้อให้คงรูป (curing bladder) ในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ ทำฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า แผ่นยางใช้ภายนอกอาคาร เป็นต้น

6) ยางบิวทาไดอิน (butadiene rubber, BR)

ยางบิวทาไดอินเป็นพอลิเมอร์ของบิวทาไดอินที่มีการจัดเชื่อมต่อกันหลายแบบ เช่น แบบ cis-1,4 tran-1,4 หรือแบบ vinyl-1,2 ขึ้นอยู่กับตัวริ่งปฏิกิริยา (initiator) ที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยปกติยางบิวทาไดอินจะไม่ถูกใช้เดี่ยวๆ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจาก การบดผสมยางเป็นไปได้อย่างยากโดยเฉพาะเมื่อการบดผสมโดยใช้ลูกกลิ้ง (two-roll mill) เพราะยางจะไม่พอร์มรอบลูกกลิ้ง (poor mill banding) ยางชนิดนี้จึงใช้บดผสม (blend) กับยางไม่มีขั้วชนิดอื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอิน



รูปที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของยางบิวทาไดอิน

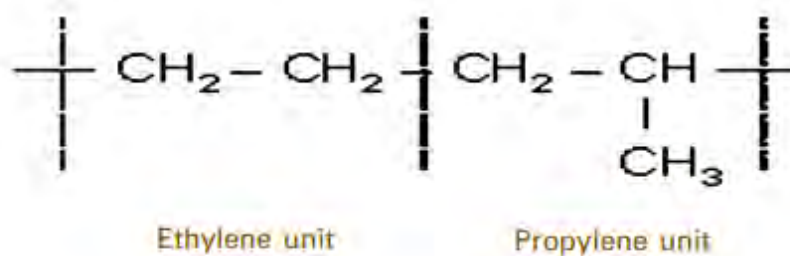
ยางบิวทาไดอินมีสมบัติพิเศษ คือ มีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูงมากแต่มีความคงทนต่อแรงดึง (tensile strength) ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามการผสมยางชนิดนี้กับยางธรรมชาติและ/หรือยาง SBR จะทำให้ยางคงรูปที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี ในทำนองเดียวกันสมบัติบางประการของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอินก็จะถูกปรับให้ดีขึ้น ได้แก่ ความต้านทานต่อการขัดถูดีขึ้น ยางมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและยางจะยังคงสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (good low temperature flexibility) ด้วยเหตุนี้กว่า 90% ของยางบิวทาไดอินจึงถูกใช้ร่วมกับยางธรรมชาติและยาง SBR ในการผลิตดอกยาง (tread) ของยางรถยนต์เพราะนอกจากจะทำให้ดอกยางมีความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้นแล้ว ความร้อนที่สะสมที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งาน

ก็ต่ำลง ยางจะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดในบริเวณร่อง (resistance to groove cracking) สูงขึ้น นอกจากนี้ยางผสมที่ได้จากการเติมยางบิวทาไดอีนจะทนต่อการเสื่อมเมื่อทำให้คงรูปเกินจุดสูงสุด (reversion resistance on overcure) ในระหว่างกระบวนการผลิต และที่สำคัญยางชนิดนี้ยังช่วยให้ยางล้อรถมีสมบัติการต้านการหมุน (rolling resistance) ลดลง ทำให้ลดการสิ้นเปลืองน้ำมันขณะขับเคลื่อนรถ อย่างไรก็ตามการเติมยางบิวทาไดอีนลงไปปริมาณมากเกินไปจะทำให้การเกาะถนนของล้อเสียไป โดยเฉพาะในถนนที่เปียก ด้วยเหตุนี้จึงต้องผสมยางบิวทาไดอีนในการผลิตโครงยาง (carcass) แก้มยาง (sidewall) และยางบริเวณโครงลวด (bead compound)

ยางบิวทาไดอีนยังถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความทนต่อการสึกหรอหรือทนต่อการขีดถูที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า ยางสายพานลำเลียง นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตยางกันกระแทก สายพานส่งกำลัง (transmission belt) ยางกันสะเทือน (shock absorber pads) เป็นต้น

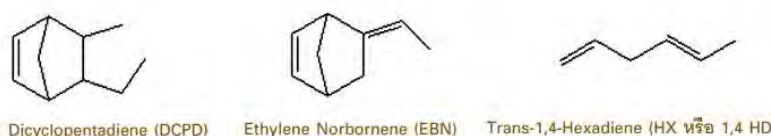
7) ยางเอทิลโพรพิลีนไดอีนหรือยาง EPDM (ethylene-propylene diene rubber)

ในระยะแรกเริ่มที่ได้มีการสังเคราะห์โพลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคโพลิเมอไรเซชันระหว่างโมโนเมอร์ของเอทิลีน (ethylene) กับโพรพิลีน (propylene) จะได้โพลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) เรียกว่า ยางอีพีเอ็ม (EPM) แต่เนื่องจากในโมเลกุลไม่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว (ไม่มีพันธะคู่) ดังนั้นการทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เพอร์ออกไซด์ (peroxide) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาชนิดใหม่โดยการเติมโมโนเมอร์ตัวที่สาม คือ ไดอีน (diene) ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ทำให้ได้ยางที่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในสายโมเลกุล จึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน ยางชนิดนี้ คือ ยางอีพีดีเอ็ม (EPDM)



รูปที่ 2.9 สูตรโครงสร้างของยางอีพีดีเอ็ม

ยางอีพีดีเอ็มมีหลายเกรดแต่ละเกรดแตกต่างกันที่สัดส่วนของเอทิลีนและโพรพิลีน รวมถึงปริมาณของไดอีน โดยทั่วไปยางชนิดนี้จะมีเอทิลีนอยู่ 45-85 % โมล และปริมาณของไดอีนอยู่ในช่วง 3-11 % โมล ชนิดของไดอีนที่ใช้อย่างกว้างขวางมี 3 ชนิด คือ Dicyclopentadiene (DCPD) Ethylidene Norbornene (ENB) และtrans-1,4-hexadiene (1,4 HD) โดยชนิดที่ใช้มากที่สุด คือ ENB เพราะจะทำให้โมเลกุลของยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanization)



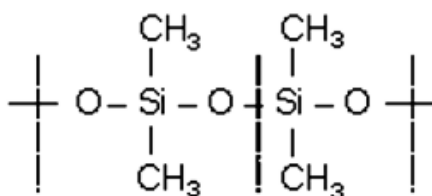
รูปที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของไดอินที่มีอยู่ในยางอีพีดีเอ็ม

จากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลจะเห็นว่ายางอีพีเอ็มและยางอีพีดีเอ็มเป็นยางไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่ทนต่อน้ำมันหรือสารละลายที่ไม่มีขั้ว และเนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ในสายโมเลกุลเป็นแบบไม่มีรูปแบบ (random) ทำให้ได้โพลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous) อย่างชนิดนี้จึงไม่ตกผลึกส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำและต้องอาศัยสารเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วย อย่างไรก็ตามในยางที่มีสัดส่วนของเอทิลีนสูงจะมีสมบัติตกผลึกได้บ้างจึงส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงในสภาพยังไม่คงรูปสูง (high green strength) สามารถที่จะเติมน้ำมันและสารตัวเติมได้มากซึ่งเป็นจุดเด่นของยางชนิดนี้ เพราะในบางครั้งอาจเติมสารตัวเติมได้มากถึง 2 เท่าของปริมาณยางที่ใช้ แต่ข้อเสียของยางที่มีปริมาณเอทิลีนสูง คือ การบดผสมยางที่มีอนุภาคน้ำมันต่ำ จะทำได้ยากและสมบัติของยางที่มีอนุภาคน้ำมันต่ำจะไม่ดี เพราะการตกผลึกของยางจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออนุภาคน้ำมันต่ำลง

ยาง EPDM มีพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยมาก ดังนั้นจึงทนต่อการเสื่อมสภาพจาก ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดี นอกจากนี้ยังทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสารเคมี กรด และด่าง ได้ดีอีกด้วย ยางชนิดนี้ส่วนมากจึงนิยมใช้ในการผลิตยางชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง แก้มยางรถยนต์ (sidewall) ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ (radiator hose) เป็นต้น ยาง EPDM ยังถูกใช้ในการผลิตท่อของเครื่องซักผ้า ฉนวนหุ้มสายเคเบิล และใช้ผสมกับพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพลาสติก เช่น เพิ่มความเหนียวและความทนต่อแรงกระแทก (impact resistance)

8) ยางซิลิโคน (silicone rubber, Q)

แกนสายโซ่หลัก (main chain) ของยางซิลิโคนประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนเหมือนยางชนิดอื่นๆ แต่จะประกอบด้วย อะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ยางซิลิโคนมีหลายเกรด แต่เกรดที่ใช้กันมากที่สุดจะเป็นโพลิเมอร์ของ dimethyl siloxane



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของยางซิลิโคน

ยางซิลิโคนเป็นยางที่มีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลต่ำ ส่วนใหญ่จะไม่อยู่ในรูปของแข็ง แต่จะอยู่ในรูปของเหลวที่มีความยืดหยุ่นสูงมาก และค่าความหนืดก็ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ยางซิลิโคนจะมีสมบัติความยืดหยุ่นดีจำเป็นต้องทำการ คงรูปโดยกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์

เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะระหว่าง Si-O สูงกว่า C-C และไม่มีพันธะคู่อยู่ใน โมเลกุล ยางซิลิโคนจึงทนต่อสภาพอากาศ โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดีกว่าที่เป็นพวก ไฮโดรคาร์บอน ยางชนิดนี้จึงเป็นยางพิเศษที่สามารถใช้งานได้ในที่อุณหภูมิสูงๆมาก (และต่ำมากๆ) อย่างไรก็ตามยางซิลิโคนมีค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) และความทนต่อแรงกระแทก (impact resistance) ต่ำมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเติมแรง เช่น ซิลิกาเข้าช่วย ยางซิลิโคนมีความเป็นฉนวนที่ดีมาก มีอัตราการซึมผ่านของ ก๊าซและของเหลวสูง (ประมาณ 100 เท่าของยางบิวไทล์) แต่ว่ายางชนิดนี้ไม่ทนต่อกรดและ ด่าง สารเคมีจำพวกเอสเทอร์ คีโตน และอีเทอร์

การใช้งานของยางซิลิโคนจะถูกจำกัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้อย่างชนิดอื่นๆได้ เพราะยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตยางที่เป็นชิ้นส่วนของเครื่องบินและรถยนต์ ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล และใช้ในงานทางการแพทย์ เกษีกรรมรวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับ อาหาร

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติของยางคงรูประหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์

สมบัติ	ชนิดของยาง							
	NR	IR	SBR	BR	NBR	CR	IIR	EPDM
ความทนต่อแรงดึง (ไม่มีสารเสริมแรง)	1	2	5	6	5	3	4	5
ความทนต่อแรงดึง (มีสารเสริมแรง)	1	2	2	4	2	2	3	3
การยืดตัวสูงสุด	1	1	2	3	2	2	2	3
ความต้านทานต่อการขัดถู (มีสารเสริมแรง)	4	4	3	1	2	3	4	3
ความทนต่อการฉีกขาด	2	2	3	5	3	2	3	3
การกระด้างตัว	2	2	3	1	3	3	6	3
ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ	2	2	3	2	3	3	2	2
ความทนต่อความร้อน	5	5	4	4	3	3	3	2
ความทนต่อการเกิดออกซิเดชัน	4	4	3	2	3	2	2	1
ความทนต่อแสง UV	4	4	3	3	3	2	2	1
ความทนต่อโอโซนและสภาพอากาศ	4	4	4	3	3	2	2	1
ความทนต่อน้ำมัน	6	6	5	6	1	2	6	4
ความทนต่อน้ำมันเชื้อเพลิง	6	6	6	6	2	3	6	5
ความทนต่อกรด	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนต่อด่าง	3	3	3	3	4	2	2	1
ความทนต่อการติดไฟ	6	6	6	6	6	2	6	6
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า	1	1	2	2	5	4	2	2
การซึมผ่านของก๊าซ	5	5	4	4	2	3	1	4

*1 = ดีที่สุด

6 = ด้อยที่สุด

2.4.2 ทฤษฎียางซิลิโคน

ยางซิลิโคน (Q) เป็นอิลาสโตเมอร์อินทรีย์สังเคราะห์ที่แกนสายโซ่หลักไม่ได้ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนเหมือนยางชนิดอื่นๆ แต่จะประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน(O) เหมือนกับพันธะที่พบในผลึกควอตซ์ แก้ว และทราย ยางซิลิโคนได้รับการพัฒนาขึ้นจากการวิจัยเพื่อหาวัสดุทนความร้อนสำหรับมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเดิม และในปี ค.ศ. 1943 ได้มีการพัฒนายางซิลิโคนเกรดแรกในเชิงพาณิชย์ขึ้นโดย บริษัทดาวเคมีคอล จำกัด

โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นโพลีไซลอกเซน (polysiloxane) ยางซิลิโคนมีหลายเกรด ยางแต่ละเกรดจะแตกต่างกันที่หมู่ R ที่เกาะอยู่บนสายโซ่หลัก เมื่อแทนที่หมู่ R ด้วยหมู่อื่นๆ ก็จะได้ยางซิลิโคนเกรดต่างๆ ดังแสดงในตาราง แต่ยางซิลิโคนเกรดที่มีการใช้งานมากที่สุด คือ ไดเมทิลซิลิโคน (MQ) ซึ่งมีหมู่ R เป็นหมู่เมทิลเท่านั้น

ตารางที่ 2.3 ยางซิลิโคนเกรดต่างๆ แบ่งตามมาตรฐาน ASTM D1418

เกรด	หมู่แทนที่ (R)	การใช้งาน
MQ	หมู่เมทิล (CH ₃) เท่านั้น	เป็นเกรดที่มีการใช้งานมากที่สุด
VMQ	หมู่ไวนิล (CH ₂ = CH ₂) และหมู่เมทิล (CH ₃)	ใช้งานทั่วไป มีค่าการยุบตัวถาวรหลังกด (compression set) ดี
FMQ	หมู่ฟลูออรีน (F) และหมู่เมทิล(CH ₃)	ทนต่อน้ำมันและสารเคมีได้ดี
PMQ	หมู่ฟีนิล(C ₆ H ₅) และหมู่เมทิล(CH ₃)	ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ทนต่อความร้อนและรังสี
FVMQ	หมู่ฟลูออรีน (F) หมู่ไวนิล (CH ₂ =CH ₂) และหมู่เมทิล(CH ₃)	ทนต่อน้ำมันและสารเคมีได้ดี และใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างจาก 190°C ถึง -62°C
PVMQ	หมู่ฟีนิล (C ₆ H ₅) หมู่ไวนิล (CH ₂ =CH ₂) และหมู่เมทิล(CH ₃)	ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ทนต่อความร้อนและรังสี

โพลีไซลอกเซนมีมุมพันธะ ความยาวพันธะ และพลังงานพันธะที่สูงกว่าโพลิเมอร์ชนิดอื่นๆโดยทั่วไป กล่าวคือ มุมของพันธะ Si-O ในสายโซ่หลักเท่ากับ 130°C ความยาวพันธะเท่ากับ 1.63 และพลังงานพันธะเท่ากับ 88-117 กิโลแคลอรีต่อโมล (kcal-mole) ในขณะที่พันธะ C - C มีมุมพันธะ ความยาวพันธะ และพลังงานพันธะในสายโซ่หลักเท่ากับ 112°C , 1.54 และ 83-85 กิโลแคลอรีต่อโมล (kcal-mole)ตามลำดับ ด้วยปัจจัยเหล่านี้ ทำให้โมเลกุลของโพลีไซลอกเซน

อยู่ห่างกันและสามารถเคลื่อนไหวได้ง่าย อีกทั้งการเปลี่ยนรูปร่างของโมเลกุล (conformation) ที่เกิดจากการหมุนรอบพันธะเดี่ยวก็ทำได้ง่ายกว่าจึงส่งผลให้ยางซิลิโคนมีความยืดหยุ่นสูง นอกจากนี้ อะตอมของซิลิกอนยังมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของคาร์บอน จึงทำให้ยางซิลิโคนมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free space) สูง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนไหวได้ง่าย ด้วยเหตุนี้ ยางซิลิโคนจึงมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T) ต่ำกว่า คือประมาณ -127°C (Fitzpatrick 1999 : 428)

2.4.2.1 สมบัติทั่วไปของยางซิลิโคน

สมบัติเชิงกล (mechanical properties) เนื่องจากยางซิลิโคนมีความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการขีดสี และความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำมาก ดังนั้น หากต้องการนำยางซิลิโคนไปใช้ในงานเชิงวิศวกรรม จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมแรง (เช่น ซิลิกา) ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่างๆ ให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยางซิลิโคนมีความทนต่อความร้อนสูงมาก ดังนั้น สมบัติเชิงกลของยางซิลิโคนจึงเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยตามระดับของอุณหภูมิ ด้วยเหตุนี้เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิสูงมากๆ ยางซิลิโคนจึงอาจจะมีสมบัติเชิงกลที่สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ได้

ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของยางซิลิโคน

สมบัติ	
ความแข็ง (Shore A)	10 - 90
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	≤ 9.65
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	100 - 1200
ความทนต่อการฉีกขาด (Die B) (N/mm)	≤ 48
การกระเด็ง (Bashore resilience) (%)	10 - 70
อุณหภูมิการใช้งาน $^{\circ}\text{C}$	-100 ถึง -315

ความทนต่อการเสื่อมสภาพ (ageing resistance) เนื่องจากยางซิลิโคนไม่มีพันธะคู่ อยู่ในโมเลกุลและพันธะ Si-O ที่มีอยู่ในสายโซ่หลักของยางซิลิโคนก็มีค่าพลังงานพันธะสูงกว่าพันธะ C - C ดังนั้น ยางซิลิโคนจึงทนต่อสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดีกว่ายางที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นพันธะ C - C อย่างไรก็ตาม ยางซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อสัมผัสกรดหรือด่างเข้มข้น

ความยืดหยุ่น (flexibility) ยางซิลิโคนเกรดทั่วไปมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T) ที่ต่ำ ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูง การเติมหมู่ฟีนิลเข้าไปในโมเลกุลจะช่วยให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายยิ่งขึ้น (T ต่ำลง) ซึ่งจะทำให้ยางซิลิโคนเกรดพิเศษ ได้แก่ ยาง PMQ และ ยาง PVMQ ยังคงมีความยืดหยุ่นสูงและสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ได้

ความทนต่อน้ำมันและสารเคมี (oil and chemical resistance) ยางซิลิโคนเกรดทั่วไปสามารถทนน้ำมันได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อกรด ด่าง น้ำมันเชื้อเพลิง เอสเธอร์ คีโตน อย่างไรก็ตาม

ตาม สมบัติความทนต่อน้ำมันและสารเคมีของยางซิลิโคนจะสูงขึ้นหากเติมอะตอมของฟลูออรีนเข้าไป โมเลกุล ซึ่งจะทำให้ได้ยางซิลิโคนเกรดพิเศษ ได้แก่ ยา FMQ และ FVMQ ทนต่อน้ำมัน น้ำมันเชื้อเพลิง และตัวทำละลายอื่นๆ ได้อย่างดีเยี่ยม ในขณะที่สมบัติอื่นๆ ก็ยังคงเหมือนยางซิลิโคนเกรดธรรมดา (ยกเว้นสมบัติความทนต่อความร้อนจะต่ำกว่ายางซิลิโคนเกรดธรรมดาเล็กน้อย)

การซึมผ่านของก๊าซ (gas permeability) เนื่องจากยางซิลิโคนมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล ดังนั้น ก๊าซจึงสามารถซึมผ่านยางซิลิโคนได้เร็ว โดยความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น สมบัติของก๊าซ อุณหภูมิและผลต่างของความดัน เนื่องจากที่อุณหภูมิ 25°C ยางซิลิโคนมีความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูงกว่ายางบิวทิลถึงเกือบ 400 เท่า ยางซิลิโคนจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานที่ต้องการให้ก๊าซแพร่ผ่านได้มาก เช่น ก๊าซออกซิเจน เพื่อใช้ในการแพทย์

สมบัติทางไฟฟ้า (electrical properties) ยางซิลิโคนมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม บางเกรดมีความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (volume resistivity) ต่ำถึง 0.004 โอห์ม-เซนติเมตร (ohm-cm) และมีค่าความแข็งแรงไดอิเล็กทริก (dielectric strength) เท่ากับ 500 โวลต์ต่อมิล (volts per mil)

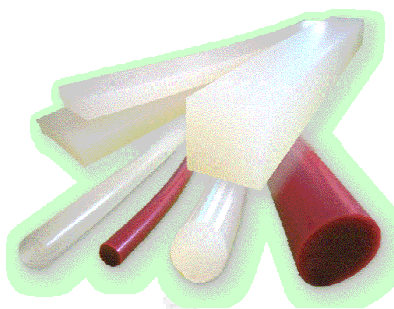
ความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสี (radiation resistance) ยางซิลิโคนมีความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากรังสีค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะยางเกรดPVMQ

สมบัติเชิงพื้นผิว (surface properties) ยางซิลิโคนมีพื้นผิวเกาะติดยาก และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงทำให้มีสารหรือวัสดุอื่นมาเกาะติดได้ยาก แม้กระทั่งวัสดุที่เหนียวติด ซึ่งสมบัติข้อนี้ทำให้สามารถนำยางซิลิโคนไปใช้ประโยชน์ได้มาก เช่น สารเคลือบผิว

2.4.2.2 ประเภทของยางซิลิโคน

ยางซิลิโคนที่วัลคาไนซ์ด้วยความร้อน (heat cured silicone rubber) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามสถานะและกระบวนการผลิต โดยที่ยางซิลิโคนทั้ง 2 ประเภทนี้มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน

1) ยางซิลิโคนแข็ง (high consistency silicone rubber ; HCR) คือคอมพาวด์ของยางซิลิโคนที่อยู่ในรูปของแข็ง เตรียมได้โดยการนำยางซิลิโคนไปผสมกับสารเคมีต่างๆ และสารเพอร์ออกไซด์ เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงบางส่วนขึ้น และจะหยุดปฏิกิริยาก่อนที่จะเกิดการวัลคาไนซ์สมบูรณ์ นำยางซิลิโคนที่ได้มาทำเป็นแผ่นเพื่อความสะดวกในการขนส่งและเก็บรักษา เมื่อต้องการทำผลิตภัณฑ์ก็นำแผ่นยางซิลิโคนมาขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเ็นเดอร์ (calender) เครื่องเอ็กชทรูด (extruder) หรือขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (ซึ่งเป็นแม่พิมพ์แบบฉีด แบบกดอัด หรือแบบกึ่งฉีด) และให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์เพิ่ม



รูปที่ 2.12 ยางซิลิโคนแข็ง

2) ยางซิลิโคนเหลว (liquid silicone rubber ; LSR) คือ ยางซิลิโคนในรูปของเหลวใส มีความหนืดต่ำ ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งจะมีตัวเร่งแพลทินัลดผสมอยู่ ส่วนที่สองจะมีเมทิลไฮโดรเจนซิลอกเซน (methylhydrogensiloxane) เป็นสารที่ทำให้ยางวัลคาไนซ์และมีแอลกอฮอล์เป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยาเมื่อต้องการทำผลิตภัณฑ์ก็จะนำยางเหลวทั้งสองส่วนมาผสมกันในเครื่องฉีด (injection molding) เมื่อเกิดการผสมกัน ยางก็จะเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ



รูปที่ 2.13 ยางซิลิโคนเหลว

2.4.2.3 การตรวจสอบแม่พิมพ์ยาง

1) การกำหนดอุณหภูมิ ในขั้นตอนนี้กล่าวถึงการใช้แม่พิมพ์ยางในการฉีดเทียมนอุณหภูมิของน้ำเทียมนที่ จะทำการฉีดจะต้องมีอุณหภูมิที่พอดีกับการฉีดแต่ละครั้ง อุณหภูมิของเทียมนจะต้องทำการหลอมละลายก่อนทุกครั้งก่อนฉีดกำหนดอุณหภูมิในการหลอม เท่ากับ 100 องศา และอุณหภูมิในการฉีดที่จะใช้อยู่อุณหภูมิในการฉีดที่จะจะอยู่อุณหภูมิ 70-75 องศาเท่านั้นการที่อุณหภูมิในการฉีดเกิน 70-75 องศาการเย็นตัวของเทียมนจะช้า รูปทรงของเทียมนจะได้รูปทรงหรือเกิดการล้นออกจากแม่พิมพ์

2) การไล่ฟองอากาศ เพื่อใช้เป็นทางระบายลมออกจากพิมพ์ยางในขณะที่ทำการฉีด เทียนจะเข้าไปเป็นตัวแบบและดันให้ลมอยู่ที่ภายในได้ระบายออกมาตามทางระบายลม เพราะถ้าหากว่าเราไม่ทำทางระบายลมแล้ว จะทำให้ฉีดขึ้นเข้าไปในตัวแบบได้ไม่เต็ม เนื่องจากมีลมตกค้างอยู่ภายในนั่นเอง

2.4.2.4 ข้อดีและข้อเสียของยางซิลิโคน

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - ไม่หดตัว จึงทำให้หล่อชิ้นงานที่มีขนาดแม่นยำเหมือนต้นแบบ จึงนิยมใช้กับต้นแบบที่ทำจากคอมพิวเตอร์ - เหมาะกับงานทรงซับซ้อน - ผ่ายางง่าย - นำต้นแบบเทียนออกได้ทันทีโดยไม่เสียหาย - สามารถผลิตซ้ำได้หลายครั้ง - ไม่จำเป็นต้องฉีดสเปรย์หรือทาแป้ง - เหมาะกับการผลิตซ้ำในงานที่มีรายละเอียดมาก - ใช้ได้กับต้นแบบทุกประเภท 	<ul style="list-style-type: none"> - ความแข็งแรงต่อการฉีกระดับปานกลาง - รายละเอียดสูง - จำเป็นต้องกรีดยางเพื่อไล่ลม - ราคาสูง - เผาได้ยากต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก

2.4.2.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทำแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส

- 1) เครื่องดูดอากาศ
- 2) เครื่องชั่ง
- 3) ตู้อุ่น
- 4) เทอร์โมมิเตอร์
- 5) กรอบสำหรับทำพิมพ์ยาง
- 6) นาฬิกา
- 7) แก้วน้ำ-ไม้
- 8) แอลกอฮอล์-สำลี



รูปที่ 2.14 เครื่องดูดอากาศ
ใช้สำหรับดูดฟองอากาศที่มีในยางซิลิโคนใส



รูปที่ 2.15 เครื่องชั่ง
ใช้สำหรับชั่งหรือตวงยางซิลิโคนใสและเพอร์ออกไซด์ในอัตราส่วน 50 : 5



รูปที่ 2.16 ตู้เย็น
ตู้เย็นจะช่วยให้ยางซิลิโคนใสมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น ปรับค่าความเย็นที่ 0°C , 5°C , 10°C



รูปที่ 2.17 เทอร์โมมิเตอร์

เทอร์โมมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ สามารถซื้อได้ตามร้านวัสดุอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.18 กรอบสำหรับทำพิมพ์ยาง

กรอบสำหรับทำพิมพ์ยาง เป็นกรอบที่ใช้เฉพาะในการทำซิลิโคนใส สามารถซื้อได้ที่ร้านขายอุปกรณ์ที่ใช้ในงาน Jewelry



รูปที่ 2.19 นาฬิกา

นาฬิกา ใช้สำหรับจับเวลาในขณะดำเนินงาน



รูปที่ 2.20 แก้วน้ำ-ไม้
แก้วน้ำใช้สำหรับใส่ยางซิลิโคนใส ส่วนไม้ใช้สำหรับ



รูปที่ 2.21 แอลกอฮอล์-สำลี
แอลกอฮอล์ใช้สำหรับทำความสะอาดบล็อก

2.4.2.6 วัสดุที่ใช้สำหรับทำแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส



รูปที่ 2.22 ยางซิลิโคนใส - ตัวเร่ง
ยางซิลิโคนใส ชนิด Silastic T-4 ใช้สำหรับทำแม่พิมพ์ซิลิโคนใส
ตัวเร่ง ชนิดเพอร์ออกไซด์ เพื่อช่วยให้ยางซิลิโคนมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น

2.4.3 ทฤษฎีระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ (R-O-O-R)

แม้ว่าระบบเพอร์ออกไซด์จะสามารถใช้ได้กับยางส่วนใหญ่ (ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) แต่เนื่องจากระบบการคงรูปเพอร์ออกไซด์มีต้นทุนสูงกว่าระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัต (เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการฉีกขาด ฯลฯ) ที่ด้อยกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยกำมะถัน นอกจากนี้ เพอร์ออกไซด์ยังจัดเป็นสารเคมีค่อนข้างอันตราย ทำให้การขนย้ายและเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ด้วยเหตุนี้ ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จึงนิยมใช้ในการคงรูปยางที่ไม่มีพันธะคู่ (เช่น EPM EVA CPE หรือ Q เป็นต้น) หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น (เช่น HNBR และ EPDM) สำหรับยางไดอีนอื่นๆ ที่มีพันธะคู่อยู่มากก็จะนิยมใช้ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันมากกว่า ยกเว้นในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดี หรือมีค่าการเสีयरูปลหลังการกดอัดต่ำเท่านั้น

2.4.3.1 ข้อดีของระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์

ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์มีข้อดีเหนือระบบการขึ้นรูปด้วยกำมะถัน

- 1) การคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการผสมของสารเคมีต่าง ๆ
- 2) การใช้เพอร์ออกไซด์ในการคงรูปไม่ทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนสี โดยเฉพาะยางสีที่ต้องสัมผัสกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) โดยตรง
- 3) สามารถใช้เพอร์ออกไซด์ในการคงรูปร่วม (co vulcanization) ระหว่างยางกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ได้ง่าย
- 4) ยางที่ได้จากการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จะมีสมบัติการเสีयरูปลหลังการกดอัด (โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง) ที่ดีและมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยกำมะถัน เพราะพันธะ C-C ที่เกิดจากการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จะมีความแข็งแรงสูงกว่าพันธะ C-S และพันธะ S-S ที่เกิดจากการคงรูปด้วยกำมะถัน ตามลำดับ (พลังงานพันธะของ C-C C-S และ S-S มีค่าประมาณ 344 279 และ 206 kJ/mol ตามลำดับ)

2.4.3.2 ข้อเสียของระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์

แม้ว่าระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์จะมีข้อดีหลายประการ แต่การใช้เพอร์ออกไซด์ เป็นสารทำให้ยางคงรูปก็ก่อให้เกิดผลเสียหลายข้อเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ยางคงรูปที่ได้จากการใช้เพอร์ออกไซด์บางชนิดโดยเฉพาะไดคิวมีลเพอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) และบิวทิลคิวเพอร์ออกไซด์ (tert.-butylcumyl peroxide, BCUP) อาจมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ของอะเซโทฟีโนน (acetophenone) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาคงรูป ดังนั้นสำหรับยางที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี (เช่น ยางซิลิโคน) จึงต้องมีการกำจัดสารที่เกิดขึ้นเหล่านี้โดยการนำยางที่คงรูปแล้วไปผ่านการอบที่อุณหภูมิสูงอีกครั้ง เรียกขั้นตอนนี้ว่า “post curing” ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเพอร์ออกไซด์ชนิดใหม่ เช่น บิวทิลเพอร์ออกไซด์เมทิลเฮกเซน (2,5 - bis (tert.butylperoxy)-2,5-dimethylhexane) ที่ทำให้เกิดกลิ่นเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การทำ post

curing เพื่อกำจัดสารเคมีที่เกิดจากการสลายตัวของเพอร์ออกไซด์ก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นเพราะสารเคมีเหล่านี้อาจเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของยางซึ่งอาจส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีอายุการใช้งานลดลงนอกจากข้อดีต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ระบบการคงรูปเพอร์ออกไซด์ยังมีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่อีกหลายประการ ดังนี้

1) ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ไม่เหมาะสำหรับใช้ในการคงรูปยางที่ใช้ยางอากาศร้อน (hot air) เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน รวมถึงเทคนิคการคงรูปด้วยคลื่นพลังงานที่มีความถี่สูงมากๆ (ultrahigh frequency ,UHF) หรือที่เรียกว่าคลื่นไมโครเวฟ เพราะในอากาศมีออกซิเจนที่สามารถไปออกซิไดซ์อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของเพอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (R-O-O-H) ซึ่งไฮโดรเพอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนและจะส่งผลทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพแทนที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางเคมี (ไฮโดรเพอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพของยาง) ในกรณีนี้จำเป็นต้องคงรูปยางในสถานะที่มีออกซิเจน ควรใช้ไดคลอโรเบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ (2,4 dichlorobenzoylperoxide) เป็นสารทำให้ยางคงรูปเพราะมีเพียงเพอร์ออกไซด์ชนิดนี้เท่านั้นที่ไม่ทำให้เกิดไฮโดรเพอร์ออกไซด์

2) ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ไม่เหมาะสำหรับใช้ในการคงรูปยางบิวทิล (IIR) เพราะเมื่อเพอร์ออกไซด์แตกตัวจะทำให้ยางบิวทิลเกิดการเสื่อมสภาพแทนที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางเคมี อย่างไรก็ตาม ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์สามารถใช้ได้กับยางฮาโลบิวทิล (X-IIR)

3) เนื่องจากเพอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของการผสมของเคมียาง ผู้ออกสูตรจึงจำเป็นต้องเลือกใช้สารเคมีอื่นๆ ด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะน้ำมัน สารทำให้ยางนิ่ม และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ตัวอย่างเช่น เพอร์ออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากทั้งออกซิเจน (antioxidants) และโอโซน (antiozonants) ทำให้สารป้องกันการเสื่อมสภาพดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง หากจำเป็นต้องคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ควรใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจนในกลุ่มควิโนลีน (quinoline) เพราะสารเคมีในกลุ่มนี้ได้รับผลกระทบจากเพอร์ออกไซด์น้อยที่สุดและควรใช้พาราฟิน (paraffin wax) ในการป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซนแทนการใช้สารเคมีชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ เพอร์ออกไซด์ยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำมันหรือสารทำให้ยางนิ่มชนิดอื่นๆ ได้อีก โดยเฉพาะน้ำมันอะโรมาติกซึ่งจะได้รับผลกระทบจากเพอร์ออกไซด์มากที่สุดในขณะที่น้ำมันพาราฟินนี้ได้รับผลกระทบน้อยที่สุด

2.4.3.3 ชนิดของเพอร์ออกไซด์

เพอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้เป็นสารเชื่อมโยงในยางส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ในกลุ่มไดอัลคิลเพอร์ออกไซด์ (dialkyl peroxide) สารเพอร์ออกไซด์ที่ใช้กันมากที่สุด ได้แก่ ไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ (DCP) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็งหรือของเหลวที่มีความบริสุทธิ์ตั้งแต่ 90-99% แต่เนื่องจากเพอร์ออกไซด์ชนิดนี้มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีค่อนข้างสูง บางครั้งจึงมีการนำเอาเพอร์ออกไซด์ชนิดนี้ไปผสมกับตัวพาที่เฉื่อย (inert carrier) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตหรืออาจผสมกับพอลิเมอร์บางชนิดเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ออกไซด์เกรดที่มีความบริสุทธิ์อยู่เพียง 40-50%

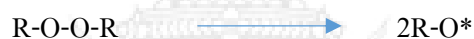
ตารางที่ 2.6 เพอร์ออกไซด์อินทรีย์ (organic peroxide) ที่นิยมใช้ในการคงรูปยาง

ชื่อทางเคมีและสูตร	ชื่อทางการค้าและผู้ผลิต	รูปแบบ	ความบริสุทธิ์ %	หมายเหตุ
เบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide)	Lucidol (Novadel)	ผงเปียกชื้น	80	เหมาะสำหรับยางซิลิโคนเท่านั้นและผงที่อยู่ในสภาพแห้งอาจจะเปิดได้ง่าย
	Lucidol B-70 (Novadel)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวใน Phthalate plasticizer	70	
	Lucidol S-50 (Novadel)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวในน้ำมันซิลิโคน	50	
ไดคลอโรเบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ (2,4-dichlorobenzoyl peroxide)	Perkadox SD (Novadol)	ผงเปียกชื้น	50	เหมาะสำหรับยางซิลิโคนเท่านั้นและผงที่อยู่ในสภาพแห้งอาจจะเปิดได้ง่าย
	Perkadox PDB-50 (Novadol)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวใน Phthalate plasticizer	50	
	Perkadox PDS-50 (Novadol)	กึ่งแข็งกึ่งเหลวในน้ำมัน ซิลิโคน	50	
ไดคิวมิลเพอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide)	Perkadox SB (Novadol)	ผง	95	เหมาะกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์โอเลฟินรวมถึงยางซิลิโคน
	Perkadox BC-40 (Novadol)	ผง	40	
	Perkadox BM-50 (Novadol)	สารละลายใน phthalate plasticizer	50	
	Dicup (Hercules)	ผง	96	
	Dicup 40C	ผง	40	
บิวทิลเพอร์ออกไซด์	Varox(Vanderbilt)	ผง	50	เหมาะกับยาง

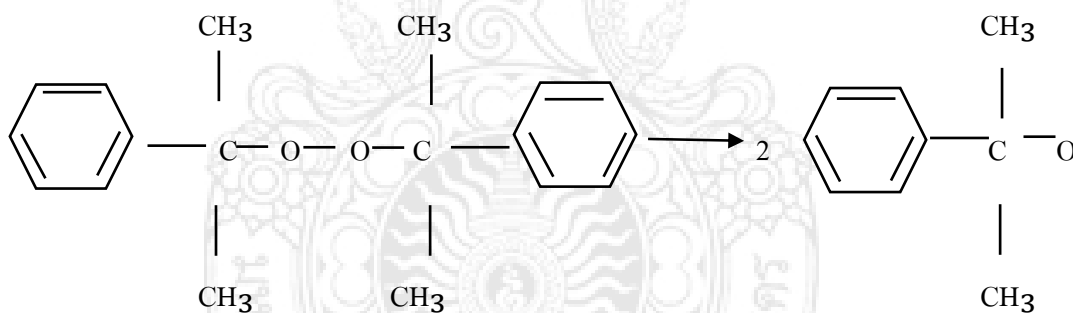
เมทิลเฮกเซน (2,5-Di-(t-butylperoxy)2,5-dimethylhexane)	Luperco 101-XL (Wallace&Tiernan)	ผง	45	ธรรมชาติและ ยางสังเคราะห์ โอเลฟินรวมถึง ยางซิลิโคน
บิวทิลเพอร์ออกไซด์ ไอโซโพรพิลเบนซีน (Di(t-butyl Peroxy)-diisopropylbenen)	Vulcup (Hercules)	ผง	85	เหมาะกับยาง ธรรมชาติและ ยางสังเคราะห์ โอเลฟินรวมถึง ยางซิลิโคน

2.4.3.4 กลไกการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์

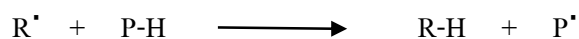
เมื่อเพอร์ออกไซด์ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน แสงแดด หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต เพอร์ออกไซด์ก็จะเกิดการสลายตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ ดังแสดงในสมการข้างล่าง



เช่น ไดคิวมีลเพอร์ออกไซด์ (DCP) เมื่อเกิดการสลายตัวจะได้อนุมูลอิสระของอัลคอกซี 2 ตัว



สำหรับยางที่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลบางชนิด เช่น ยางธรรมชาติ อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับยางที่ตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็นอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ (polymer radical) ซึ่งเมื่ออนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ 2 ตัวมาทำปฏิกิริยารวมกันก็จะได้เป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น



ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเพอร์ออกไซด์ไม่สามารถใช้ในการคงรูปร่างบิวไทล์ (UR) ได้ ทั้งนี้ เนื่องจากอนุมูลอิสระของคาร์บอนแบบตติยภูมิ (tertiary carbon radicals) ที่เกิดขึ้นนั้นแทนที่จะเข้าทำปฏิกิริยารวมกัน กลับเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่เรียกว่า “ β -scission” แทนจึงทำให้ยังเกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากยางบิวไทล์แล้ว ยังมีพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆอีกบางชนิด ที่ไม่สามารถใช้เพอร์ออกไซด์ในการคงรูปได้ เช่น ยางอีพิกโล-โรโหดริน (ECO - CO) พอลิบิวทีน (PB) พอลิไอโซบิวทีน (IM) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น

2.4.3.5 อัตราเร็วในการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์

การสลายตัวของเพอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเพอร์ออกไซด์ก็จะสลายตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระได้เร็วขึ้น ทำให้ยังเกิดการคงรูปได้เร็วโดยทั่วไป อัตราเร็วของการสลายตัวของอนุมูลอิสระใดๆ ของเพอร์ออกไซด์สามารถดูได้จากค่าครึ่งชีวิต (half life) ของเพอร์ออกไซด์ชนิดนั้นๆ ซึ่งค่าครึ่งชีวิตของสารที่อุณหภูมิใดๆ จะบ่งบอกถึงระยะเวลาที่สารเกิดการสลายตัวไปครึ่งหนึ่งของปริมาณที่มีอยู่เดิม ณ อุณหภูมินั้นๆ ด้วยเหตุนี้จากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าครึ่งชีวิตของเพอร์ออกไซด์กับอุณหภูมิ ผู้ผลิตสามารถคำนวณหาระยะเวลาการคงรูปอย่างให้สมบูรณ์อย่างคร่าวๆ ได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องทดสอบลักษณะการคงรูป (curemeter) เหมือนเช่นในระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน

แม้ว่าระยะเวลาในการคงรูปจะสามารถคำนวณได้จากค่าครึ่งชีวิตของเพอร์ออกไซด์อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการเติมสารกระตุ้นร่วม (co-activator หรือ co-agent) ลงไป อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปจะเพิ่มสูงขึ้นมาก ในกรณีนี้ การทดสอบลักษณะการขึ้นรูปด้วยเครื่องทดสอบ เช่น ODR (Oscillating Disc Rheometer) หรือ MDR (Moving Die Rheometer) จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพราะว่าประสิทธิภาพในการกระตุ้นปฏิกิริยาของสารกระตุ้นร่วมแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน สารกระตุ้นร่วมบางชนิด เช่น ซิงก์ไดเมทาคริเลต (zinc dimethacrylate, ZDMA) นอกจากจะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการคงรูปแล้ว สารกระตุ้นร่วมเหล่านี้ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้อีกด้วย โดยการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นเรียกว่าการเชื่อมโยงแบบไอออนิก (ionic crosslinks) ดังนั้น ในระบบที่คงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ที่มีสารกระตุ้นร่วมดังกล่าวอยู่ด้วยจึงมีพันธะการเชื่อมโยงทั้งที่เป็นแบบโคเวเลนต์ (C - C) และแบบไอออนิก (O - Zn - O) ยางคงรูปที่ได้จึงมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น และเนื่องจากพันธะ O-Zn-O มีความยาวและความยืดหยุ่นสูงกว่าพันธะ C - C ดังนั้น ยางคงรูปที่ได้จึงมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดีขึ้น (โดยเฉพาะสมบัติความต้านทานต่อการล่าตัว) นอกจากนี้ เนื่องจากพันธะ O - Zn - O มีความแข็งแรงของพันธะค่อนข้างสูง ($\sim 285/\text{mol}$) เมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของพันธะ S - S ($\sim 206/\text{mol}$) ดังนั้น ยางคงรูปที่ได้จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูง

ตัวอย่างที่สำคัญอื่นๆ ของสารกระตุ้นร่วม ได้แก่ ไทรอัลลิลไซยานูเรต ไทรอัลลิลไอโซไซยานูเรต (triallyl-socyanurate, TALC) ไทรอัลลิลฟอสเฟต (triallylphosphate, TAP) ไทรอัลลิลไทรเมลลิต (triallyltrimellitate, TAM) ไดอัลลิลฟทาเลต (diallylphthalate, DAP) เอทิลีนไกลคอล

ไดเมทาโครเลต (ethyleneglycol dimethacrylate, EDMA) ไตรเมทิลอลโพรเพนไตรเมทาโครเลต (trimethylolpropane trimethacrylate, TPAT) เป็นต้น ในบางกรณีอาจใช้กำมะถันในปริมาณเล็กน้อยเป็นสารกระตุ้นร่วมก็ได้ ซึ่งยางคงรูปที่ได้จะมีกลิ่นค่อนข้างแรงแต่จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น การเลือกใช้สารกระตุ้นร่วมจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง เช่น ถ้าเป็นยางซิลิโคนก็ไม่จำเป็นต้องใช้สารกระตุ้นร่วม แต่ถ้าเป็นยาง EVA หรือ CPE ก็จำเป็นต้องใช้สารกระตุ้นร่วมที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น สารประกอบในกลุ่มไตรอัลลิล (แม้จะมีราคาแพงมากก็ตาม) และสำหรับยางชนิดอื่นๆ เช่น NBR หรือ BR ฯลฯ ก็อาจใช้สารประกอบในกลุ่มอะโครเลตหรือเมทาโครเลต เช่น ซิงก์ไดอะโครเลต (ZDA) และซิงก์ไดเมทาโครเลต (ZDMA) ซึ่งมีราคาถูกกว่าแทนได้ เกลือโลหะของกรดอะโครลิกและกรดเมทาโครลิกเหล่านี้มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงสามารถใช้เป็นสารกระตุ้นร่วมได้ทั้งยางที่อิมตัวและไม่อิมตัว แต่เกลือเหล่านี้จะแตกต่างจากสารกระตุ้นร่วมอื่นๆ คือ ยางคงรูปที่ได้จะมีค่าความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงสูงมากเป็นพิเศษ ในกรณีที่ต้องการหน่วยอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา คงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ก็สามารถเติมไนโตรโซไดฟีนีลเอมีน (Nitrosodiphenylamine) ลงไปในปริมาณเล็กน้อย แต่เนื่องจากสารเคมีชนิดนี้มีความเป็นพิษสูงจึงไม่แนะนำให้ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ปัจจุบันได้มีการผลิตสารหน่วงปฏิกิริยา คงรูปภายใต้ชื่อการค้าที่ว่า “Saret” สารหน่วงชนิดนี้มีความปลอดภัยในการใช้งานสูงเพราะในระหว่างการหน่วงปฏิกิริยา สารหน่วงชนิดนี้จะไม่ปล่อยสารประกอบไนโตรโซออกมาจึงไม่จัดเป็นสารที่ก่อให้เกิดโลกมะเร็ง

2.4.3.6 ปริมาณการใช้เพอร์ออกไซด์

โดยทั่วไป ปริมาณของเพอร์ออกไซด์ที่แนะนำให้ใช้มักจะไม่เกิน 2.5 phr แต่ส่วนใหญ่จะใช้ในปริมาณค่อนข้างน้อย (<1 phr) เพราะการใช้เพอร์ออกไซด์ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ยางแข็งกรอบและสูญเสียสมบัติความยืดหยุ่น อีกทั้งยังต้องประสบกับปัญหาสารเคมี (ที่เป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยา) ตกค้างอีกด้วย

ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของเพอร์ออกไซด์ที่ใช้ โดยทั่วไป ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ไม่จำเป็นต้องใช้สารกระตุ้นปฏิกิริยาหรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนในกรณีของการคงรูปด้วยระบบกำมะถัน แต่ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงจะสูงขึ้นอย่างมากเมื่อมีการใช้สารกระตุ้นร่วมดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว เพราะสารกระตุ้นร่วมก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องมากมายหลังจากที่เพอร์ออกไซด์เริ่มเกิดการสลายตัว ทำให้ปฏิกิริยา คงรูปเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เมื่อเพิ่มปริมาณของเพอร์ออกไซด์ ยางคงรูปที่ได้จะมีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดต่ำลง ในขณะที่ค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่ง และก็เริ่มลดลง อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคงรูปส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 160-190°C (~ 320-380°F) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการคงรูปก็ขึ้นอยู่กับชนิดของเพอร์ออกไซด์ที่ใช้ เช่น DCP มีอุณหภูมิการคงรูปสูงสุดไม่เกิน 170°C เป็น

ต้น หากเพิ่มระยะเวลาในการอบคงรูป (ที่อุณหภูมิคงที่) ยางคงรูปที่ได้จะมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำลงแต่จะมีค่ามอดูลัสที่สูงขึ้น

2.4.3.7 การเก็บรักษา

เนื่องจากอัตราการสลายตัวของเพอร์ออกไซด์ขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ ดังนั้น จึงควรเก็บรักษาเพอร์ออกไซด์ไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 38°C ($\sim 100\text{F}$) และต้องเก็บรักษาให้ห่างจากแหล่งของเปลวไฟต่างๆ เพราะเพอร์ออกไซด์ติดไฟง่ายและเมื่อติดไฟแล้วก็จะดับได้ยากอีกด้วย นอกจากนี้ ยังต้องระวังปัญหาเรื่องไฟฟ้าสถิตที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการขนส่งอีกด้วย

2.4.4 เครื่องดูดอากาศ

เครื่องดูดอากาศ เป็นเครื่องจักรที่มีลักษณะเป็นห้องหรือโดมที่สามารถผลึกแน่นกับพื้น โดยมีช่องทางที่ต่อกับเครื่องปั๊มอากาศ ทำการดูดอากาศภายในห้องหรือโดมนั้นจนภายในมีสภาพเกือบเป็นสุญญากาศ ในการดูดอากาศจะนำสิ่งที่จะนำมาดูดอากาศเข้าไปในห้องหรือโดม จากนั้นจะทำการดูดอากาศภายในห้องหรือโดมนั้นออก โดยไม่ให้มีฟองอากาศแทรกตัวอยู่ภายในเลย เครื่องดูดอากาศนี้ยังมีระบบสันสะเทือน ที่ห้องดูดอากาศ เพื่อให้ฟองอากาศที่แทรกตัวอยู่ขึ้นมาจากผิวหน้าและบับออกไป การดูดอากาศเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เพราะการกวนส่วนผสมด้วยมือหรือเครื่องก็ตาม จะมีอากาศแทรกตัวอยู่ตามเนื้อสารที่ผสม



รูปที่ 2.23 เครื่องดูดอากาศ

2.4.4.1 ข้อควรระวัง การดูดอากาศยางซิลิโคนใส

การดูดอากาศไม่สามารถจัดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กๆ ออกจนหมดได้ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เวลาดูดอากาศนานเกินไป เพราะจะทำให้ยางเสียคุณสมบัติและความแข็งเปลี่ยนไป จนอาจจะไม่แข็งตัวได้

2.' สรุป

ในการดำเนินโครงการ การลดระยะเวลาผลิตแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส โดยเร่งการแข็งตัว ด้วยความเย็น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้หลักการและทฤษฎีที่สำคัญต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพราะในการทดลองจะต้องอาศัยความรู้ เพื่อให้ดำเนินงานเป็นไปอย่างถูกต้องเหมาะสม และเป็นเครื่องมือในการลดหรือแก้ไขปัญหาข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการทดลอง ดังนั้น การศึกษาข้อมูลและทฤษฎีก่อนดำเนินโครงการจะช่วยให้สามารถดำเนินงานโครงการอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

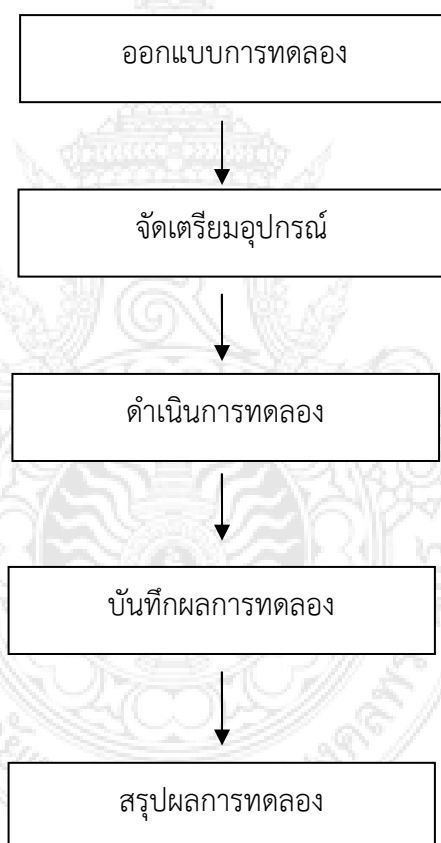


บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

3.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานในการทดลองครั้งนี้ โดยนำทฤษฎีที่ได้ศึกษามาประยุกต์ใช้ในการทดลอง เริ่มตั้งแต่การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่สำคัญในการทำยางซิลิโคนใส ขั้นตอนการทำยางซิลิโคนใส โดยใช้ความเย็นเป็นตัวเร่งในการแข็งตัวของยางซิลิโคนใส วัดค่าความแข็งของยางซิลิโคนใสและบันทึกผลการทดลอง

3.2 แผนการดำเนินการ



แผนภูมิที่ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการ

3.3. การออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบตารางการเก็บข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระยะเวลาในการเร่งการแข็งตัวด้วยอุณหภูมิต่ำเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 2 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง ในการทดลองแต่ละช่วงเวลาคงทดลอง 3 ครั้ง จะได้ชิ้นงานทั้งหมด 9 ชิ้นตามการทดลอง ตารางที่ 3.1 การเก็บข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ	เวลา	ชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (shore A)
10 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	
	3 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	
	4 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	

ในการออกแบบตารางการเก็บข้อมูลการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระยะเวลาในการเร่งการแข็งตัวด้วยอุณหภูมิต่ำเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 2 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง ในการทดลองแต่ละช่วงเวลาคงทดลอง 3 ครั้ง จะได้ชิ้นงานทั้งหมด 9 ชิ้นตามการทดลอง ตารางที่ 3.2 การเก็บข้อมูลการทดลองครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ	เวลา	ชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (shore A)
5 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	
	3 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	
	4 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	

ในการออกแบบตารางการเก็บข้อมูลการทดลองครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส โดยกำหนดระยะเวลาในการเร่งการแข็งตัวด้วยอุณหภูมิต่ำเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 2 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง ในการทดลองแต่ละช่วงเวลาคงทดลอง 3 ครั้ง จะได้ชิ้นงานทั้งหมด 9 ชิ้นตามการทดลอง

ตารางที่ 3.3 การเก็บข้อมูลการทดลองครั้งที่ 3 ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (shore A)
0 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	
	3 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	
	4 ชั่วโมง	1	
		2	
		3	

3.4 ดำเนินการทดลอง

การทำยางซิลิโคนใส ถือเป็นวิธีการหนึ่งที่สำคัญในการทำแม่พิมพ์ยาง เพราะการทำยางซิลิโคนใส่ง่ายต่อการผ่าพิมพ์ สามารถมองเห็นชั้นงานด้านใน เก็บรายละเอียดชั้นงานได้ดีกว่ายางทั่วไป แต่ยางซิลิโคนใสใช้ระยะเวลาในการแข็งตัวที่อุณหภูมิห้องนานพอสมควร จึงจำเป็นต้องศึกษาหาอุณหภูมิความเย็นมาเป็นตัวเร่ง เพื่อให้ยางซิลิโคนใสแข็งตัวได้เร็วขึ้น โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เตรียมวัสดุอุปกรณ์ให้พร้อม นำสำลีชุบน้ำแอลกอฮอล์ เช็ดทำความสะอาดกรอบสำหรับทำพิมพ์ยางให้สะอาด



รูปที่ 3.1 การทำความสะอาดกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง

2. ประกอบกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง ให้ได้ขนาดตามที่ต้องการโดยใช้น็อตเป็นตัวล็อก แผ่นประกบทั้ง 4 มุม



รูปที่ 3.2 การประกอบกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง

3. เตรียมยางซิลิโคนใสและตัวเร่ง ไปตวงบนตาชั่ง ในอัตราส่วน 50 : 5 โดยใช้แก้วเป็นภาชนะในการใส่ซิลิโคนใสกับตัวเร่ง



รูปที่ 3.3 การตวงยางซิลิโคนใสกับตัวเร่ง

4. จากนั้นกวนยางซิลิโคนใสในแก้วให้เข้ากัน ประมาณ 3-5 นาที จะเห็นว่าเนื้อสารข้นควรทำให้สารทั้งสองผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ในขั้นตอนนี้สามารถเกิดฟองอากาศได้มากซึ่งต้องขจัดออกโดยการดูดอากาศ



รูปที่ 3.4 การกวนซิลิโคนใสกับตัวเร่ง

5. นำยางซิลิโคนใสที่เตรียมไว้มาเทลงในกรอบที่เตรียมเอาไว้จนหมด



รูปที่ 3.5 การเทซิลิโคนใส

6. หลังจากนั้นนำเข้าเครื่องดูดอากาศ ระยะเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดอากาศของเครื่องดูดอากาศ ให้ดูจากฟองที่ขยายตัวแลยุบตัวจนหมด จึงนำมาทำขั้นตอนต่อไป (การดูดอากาศไม่สามารถขจัดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กๆ ออกจนหมดได้ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่ต้องใช้เวลาดูดอากาศนานเกินไป เพราะจะทำให้ยางเสียคุณสมบัติและความแข็งเปลี่ยนไป จนอาจไม่แข็งตัวได้)



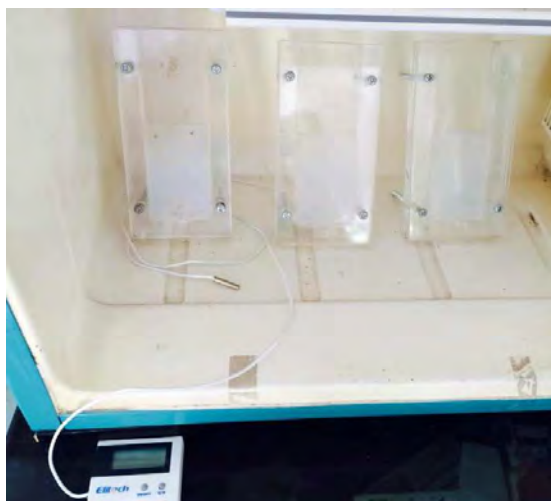
รูปที่ 3.6 การดูดอากาศ

7. นำไปพักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องปกติ 32°C ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ยางซิลิโคนใส มีการจับตัวกัน



รูปที่ 3.7 การนำยางซิลิโคนพักทิ้งไว้ในอุณหภูมิปกติ

8. จากนั้นนำไปแช่ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10°C , 5°C , 0°C ตามลำดับ ใช้ระยะเวลาในการแช่ 2 ชั่วโมง , 3 ชั่วโมง , 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิและช่วงเวลาจะทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 3.8 การแช่ยางซิลิโคนใสในตู้เย็น

9. เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใสออกจากตู้เย็นเพื่อแกะกรอบสำหรับทำแม่พิมพ์ยาง



รูปที่ 3.9 การแกะกรอบทำแม่พิมพ์ยาง

10. นำยางซิลิโคนใสที่ได้ วัดค่าความแข็ง (Shore A)

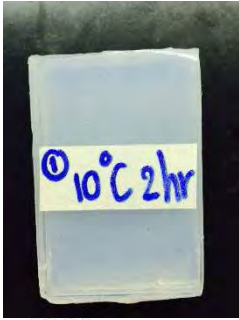
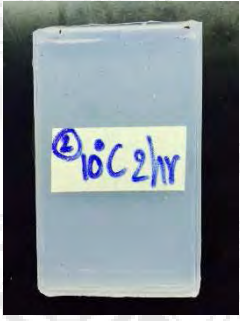



รูปที่ 3.10 การวัดค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส

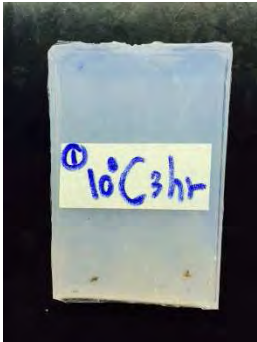




3.5 บันทึกผลการทดลอง




ตารางที่ 3.4 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 10°C เวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
10° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	42.5 ± 0.4
10° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	43.1 ± 0.4
10° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	43.6 ± 0.5



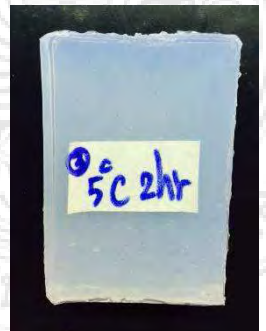
ตารางที่ 3.5 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 10°C เวลา 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
10° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	43.9 ± 0.4
10° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	43.4 ± 0.4
10° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	47.0 ± 0.5


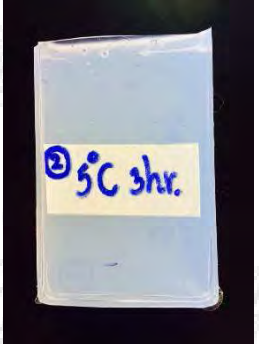
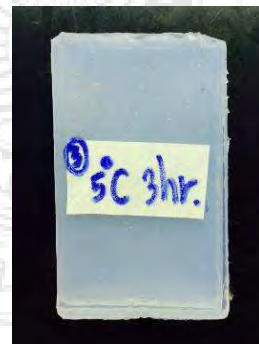
ตารางที่ 3.6 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 10°C เวลา 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
10° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	46.6 ± 0.2
10° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	43.8 ± 0.4
10° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	42.1 ± 0.5




ตารางที่ 3.7 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 5°C เวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
5° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	40.7 ± 0.5
5° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	41.2 ± 0.4
5° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	40.2 ± 0.5

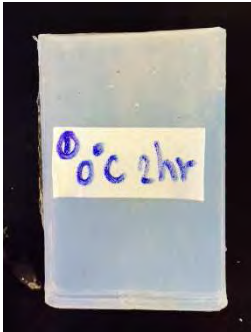


ตารางที่ 3.8 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 5°C เวลา 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
5° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	43.1 ± 0.5
5° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	45.9 ± 0.2
5° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	42.0 ± 0.2



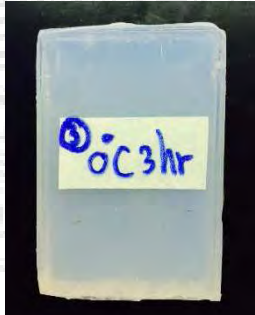
ตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิอุณหภูมิต่ำ 5°C เวลา 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
5° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	45.0 ± 0.4
5° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	43.2 ± 0.3
5° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	40.5 ± 0.5

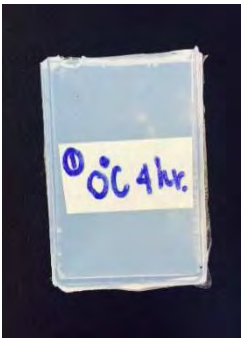
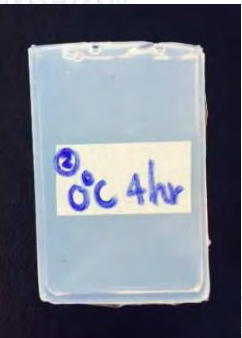
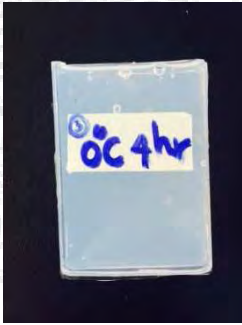
ตารางที่ 3.10 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิ อุณหภูมิต่ำ 0°C เวลา 2 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
0° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	40.9 ± 0.5
0° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	44.6 ± 0.2
0° C	2 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	44.0 ± 0.0

ตารางที่ 3.11 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิ อุณหภูมิต่ำ 0°C เวลา 3 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
0° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	42.5 ± 0.0
0° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	43.7 ± 0.3
0° C	3 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	42.9 ± 0.5

ตารางที่ 3.12 แสดงผลการทดลองอุณหภูมิต่ำ 0°C เวลา 4 ชั่วโมง

อุณหภูมิ	เวลา	ชั้นงาน	ค่าความแข็ง (Shore A)
0° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 1 	41.6 ± 0.2
0° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 2 	43.3 ± 0.3
0° C	4 ชั่วโมง	ชั้นที่ 3 	42.2 ± 0.3

3.6 สรุปผลการทดลอง

การลดเวลาการผลิตแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใสโดยเร่งการแข็งตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิต่ำที่ 10°C, 5°C, 0°C โดยในแต่ละอุณหภูมิจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 2 ชั่วโมง, 3 ชั่วโมง, 4 ชั่วโมง และนำไปทดสอบค่าความแข็งสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.13 แสดงผลสรุปของผลการทดลอง

อุณหภูมิ	เวลา	ชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (shore A)
10 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	1	42.5 ± 0.4
		2	43.1 ± 0.4
		3	43.36 ± 0.5
	3 ชั่วโมง	1	43.9 ± 0.4
		2	43.4 ± 0.4
		3	47.0 ± 0.5
	4 ชั่วโมง	1	46.6 ± 0.2
		2	43.8 ± 0.4
		3	42.1 ± 0.5
5 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	1	40.7 ± 0.5
		2	41.2 ± 0.5
		3	40.2 ± 0.5
	3 ชั่วโมง	1	43.1 ± 0.5
		2	45.9 ± 0.2
		3	42.0 ± 0.2
	4 ชั่วโมง	1	45.0 ± 0.4
		2	43.2 ± 0.3
		3	40.5 ± 0.5
0 องศาเซลเซียส	2 ชั่วโมง	1	40.9 ± 0.5
		2	44.6 ± 0.2
		3	44.0 ± 0
	3 ชั่วโมง	1	42.5 ± 0
		2	43.7 ± 0.3
		3	42.9 ± 0.5
	4 ชั่วโมง	1	41.6 ± 0.2
		2	43.3 ± 0.3
		3	42.2 ± 0.3

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

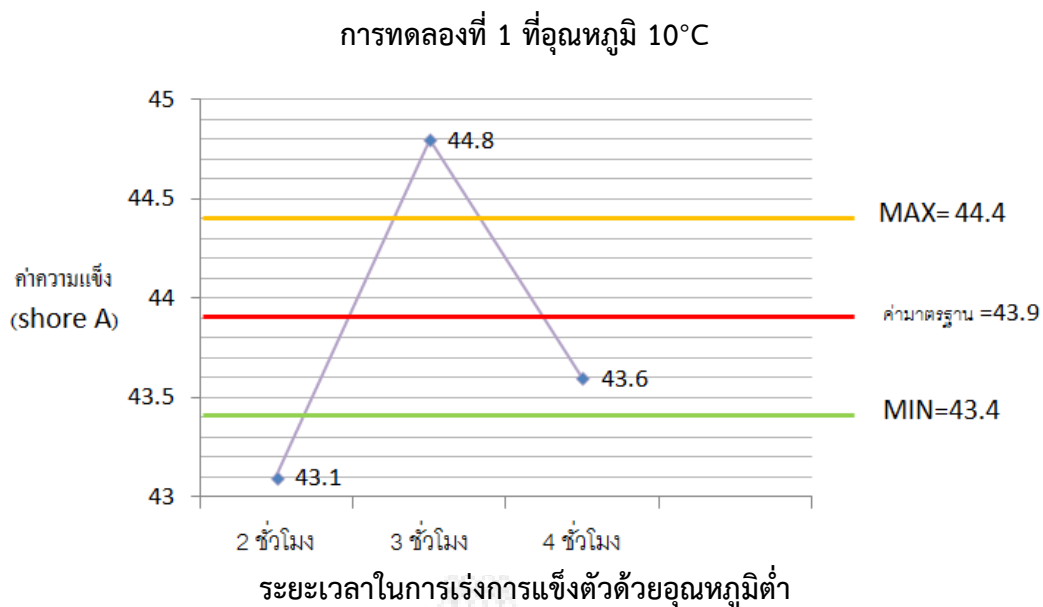
4.1 บทนำ

ภายหลังจากเก็บข้อมูล ได้มีการบันทึกค่าความแข็งของยางซิลิโคนใสของแต่ละการทดลอง ดังนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส จุดมุ่งหมายเพื่อ หาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใสที่ใช้ความเย็นเป็นตัวเร่งการแข็งตัวที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งของยางซิลิโคนใสที่แข็งตัวด้วยอุณหภูมิห้องปกติ และสรุปผลเพื่อหาอุณหภูมิที่ช่วยลดระยะเวลาในการทำงานได้มากที่สุด

4.2 การวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 10°C

อุณหภูมิ	เวลา	ครั้งที่	ค่าความแข็ง (Shore A)	ค่าเฉลี่ย (Shore A)
10°C	2 ชั่วโมง	1	42.5 ± 0.4	43.1
		2	43.1 ± 0.4	
		3	43.6 ± 0.5	
	3 ชั่วโมง	1	43.9 ± 0.4	44.8
		2	43.4 ± 0.4	
		3	47.0 ± 0.5	
	4 ชั่วโมง	1	46.6 ± 0.2	43.6
		2	43.8 ± 0.4	
		3	42.1 ± 0.5	



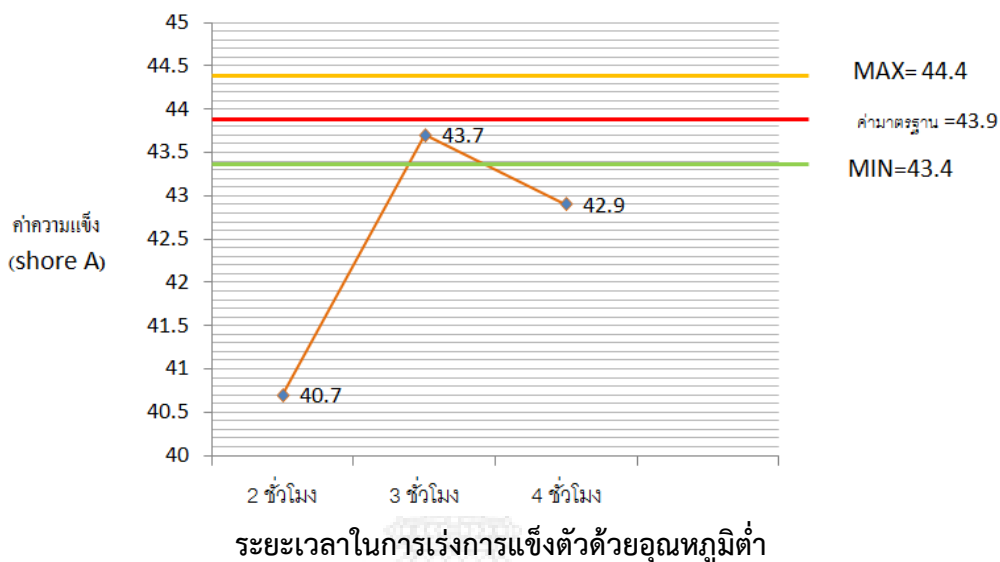
แผนภูมิที่ 4.1 แสดงการหาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 10°C

จากแผนภูมิที่ 4.1 จากการทดสอบค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 10°C พบว่า ยางซิลิโคนใสที่ใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 43.1 Shore A, 3 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 44.8 Shore A, 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 43.6 Shore A

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 5°C

อุณหภูมิ	เวลา	ครั้งที่	ค่าความแข็ง (Shore A)	ค่าเฉลี่ย (Shore A)
5°C	2 ชั่วโมง	1	40.7 ± 0.5	40.7
		2	41.2 ± 0.4	
		3	40.2 ± 0.5	
	3 ชั่วโมง	1	43.1 ± 0.5	43.7
		2	45.9 ± 0.2	
		3	42.0 ± 0.2	
	4 ชั่วโมง	1	45.0 ± 0.4	42.9
		2	43.2 ± 0.3	
		3	40.5 ± 0.5	

การทดสอบที่ 1 ที่อุณหภูมิ 5°C

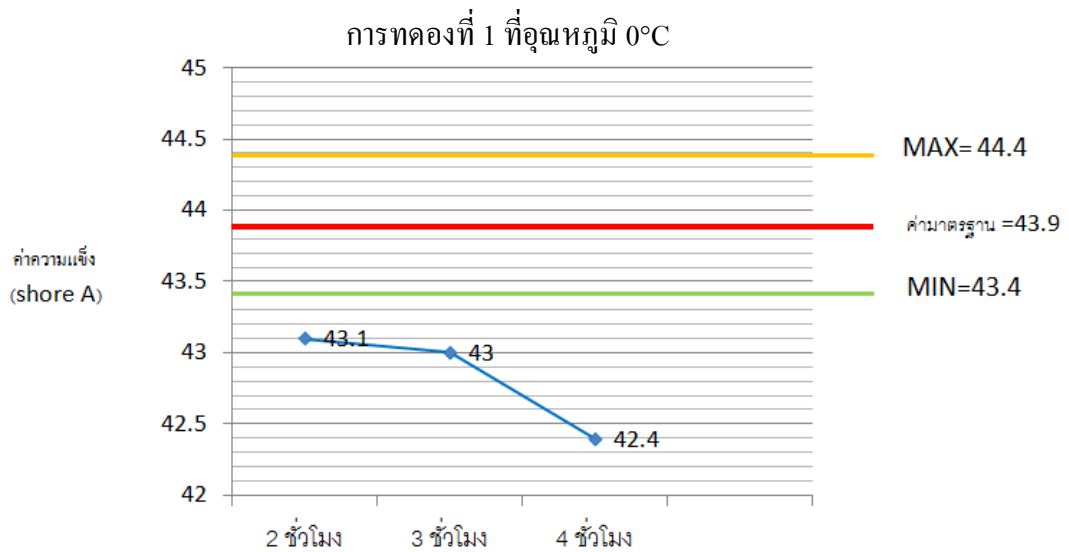


แผนภูมิที่ 4.2 แสดงการหาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 5°C

จากแผนภูมิที่ 4.2 จากการทดสอบค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 10°C พบว่า ยางซิลิโคนใสที่ใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 40.7 Shore A, 3 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 43.7 Shore A, 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 42.9 Shore A

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 0°C

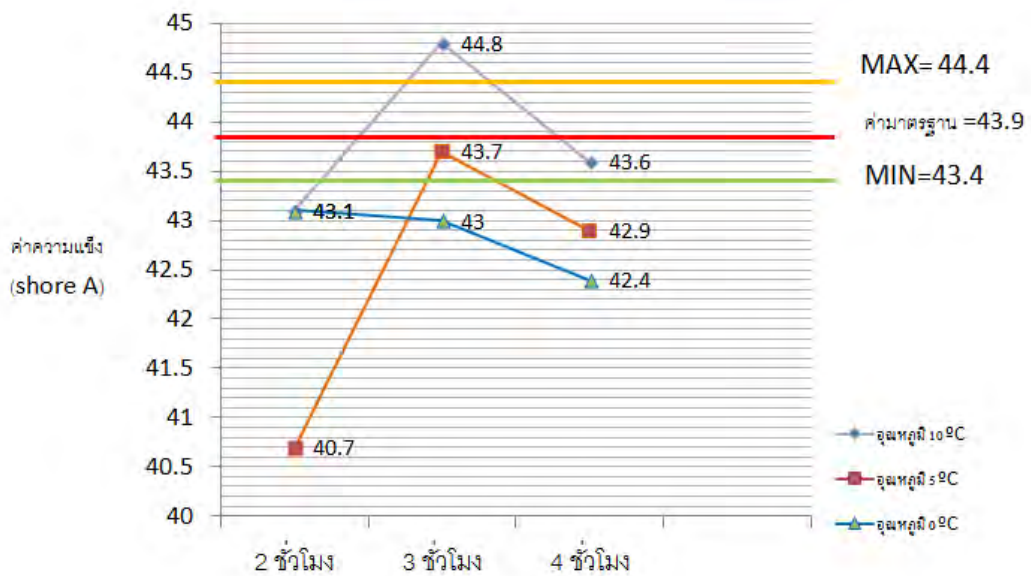
อุณหภูมิ	เวลา	ครั้งที่	ค่าความแข็ง (Shore A)	ค่าเฉลี่ย (Shore A)
0°C	2 ชั่วโมง	1	40.9 ± 0.5	43.1
		2	44.6 ± 0.2	
		3	44.0 ± 0.0	
	3 ชั่วโมง	1	42.5 ± 0.0	43.0
		2	43.7 ± 0.3	
		3	42.9 ± 0.5	
	4 ชั่วโมง	1	41.6 ± 0.2	42.4
		2	43.3 ± 0.3	
		3	42.2 ± 0.3	



ระยะเวลาในการเร่งการแข็งตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ

แผนภูมิที่ 4.3 แสดงการหาค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 0°C

จากแผนภูมิที่ 4.3 จากการทดสอบค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 0°C พบว่า ยางซิลิโคนใสที่ใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 43.1 Shore A, 3 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 43.0 Shore A, 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ยคิดเป็น 42.4 Shore A



แผนภูมิที่ 4.4 แสดงค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส ที่อุณหภูมิ 10°C, 5°C, 0°C

4.3 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากการตรวจสอบค่าความแข็งของยางซิลิโคนใส เพื่อหาอุณหภูมิที่ที่ยางซิลิโคนใสมีการแข็งตัวได้ดีและลดระยะเวลาในการทำงานได้จริงจากการทดลองการทำยางซิลิโคนใสพบว่า ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งมาตรฐานมากที่สุด อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 10°C ระยะเวลาในการแข็งตัวที่ 4 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเท่ากับ 43.6 (Shore A) และช่วงอุณหภูมิที่ 5°C ระยะเวลาในการแข็งตัว 3 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเท่ากับ 43.7 (Shore A)



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึง การสรุปโครงการ การลดเวลาการผลิตแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส โดยเร่งการแข็งตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิต่ำมีส่วนช่วยให้ยางซิลิโคนใสมีการแข็งตัวที่เร็วขึ้น จึงสามารถลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานและคุณภาพของชิ้นงานยังคงมีประสิทธิภาพคงเดิม

5.2 สรุปผลที่ได้จากโครงการ

5.2.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองโครงการ การลดระยะเวลาการผลิตแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส โดยเร่งการแข็งตัวด้วยอุณหภูมิต่ำ จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิต่ำที่ 5°C ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัว 3 ชั่วโมง มีค่าความแข็งเฉลี่ย 43.7 (Shore A) ที่ใกล้เคียงกับค่าความแข็งมาตรฐานมากที่สุด เพราะค่าความแข็งมาตรฐานอยู่ที่ 43.9 (Shore A) ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัว 10 ชั่วโมง จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิต่ำที่ 5°C ใช้ระยะเวลาในการแข็งตัว 3 ชั่วโมง รวมกับเวลาที่น่าไปพักในอุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง คิดเป็น 40% และสามารถลดระยะเวลาในการแข็งตัวได้ถึง 6 ชั่วโมง คิดเป็น 60% จากการแข็งตัวของยางซิลิโคนใสที่อุณหภูมิห้องปกติ

5.2.2 สรุปตามวัตถุประสงค์

จากการศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการทำแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส รวมไปถึงการลดระยะเวลาในการทำแม่พิมพ์ยางซิลิโคนใส ผลการทดลองตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ คืออุณหภูมิต่ำสามารถช่วยในการเร่งการแข็งตัวของยางซิลิโคนใสได้ดี และสามารถลดระยะเวลาได้ถึง 60% ของระยะเวลาที่ยางซิลิโคนใสแข็งตัวด้วยอุณหภูมิห้องปกติ แต่ยางยังคงมีคุณสมบัติที่คงเดิมไม่เปลี่ยนแปลงได้ สามารถใช้งานได้จริง

5.3 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

1. ชิ้นงานเกิดฟองอากาศและเกิดความหนืดที่เร็วกว่าปกติ เนื่องจากการดูดอากาศนานเกินไป จึงทำให้ยางเสียคุณสมบัติ อาจทำให้ยางเสียได้
2. ชิ้นงานมีเศษผงติดอยู่ด้านใน เกิดจากการทำความสะอาดไม่เรียบร้อย ไม่ตรวจสอบอุปกรณ์ให้ดี ก่อนปฏิบัติงาน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การดูดอากาศไม่สามารถขจัดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กๆ ออกจนหมดได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เวลาในการดูดอากาศนานเกินไป เพราะจะทำให้ยางเสียคุณสมบัติ และค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงไปจนอาจทำให้ยางเสียได้
2. ควรทำความสะอาดอุปกรณ์ทุกครั้งก่อนทำแม่พิมพ์ยาง โดยการนำสำลีชุบน้ำแอลกอฮอล์ เช็ดอุปกรณ์ให้สะอาดไม่ให้มีฝุ่นหลงเหลืออยู่ภายใน

บรรณานุกรม

1. ดร.พงษ์ธร แซ่อู่,2551 “ชนิดของยางและการใช้งาน” ,วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย,ปีที่ 5, ฉบับที่ 2 หน้า 1-8
2. ผศ.ดร.นิตยา รัตนโสมม,2551 “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง”,วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย,ปีที่ 8, ฉบับที่ 2 หน้า 3-7

