

การศึกษาล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยการขึ้นรูป
แบบผสมมือและการรีไซเคิลผลิตภัณฑ์จากเศษขยะล้อยาง

STUDY OF POLYURETHANE RUBBER WHEELS BY USING
HAND MIXING PROCESS AND RECYCLED PRODUCTS
FROM WHEEL WASTE

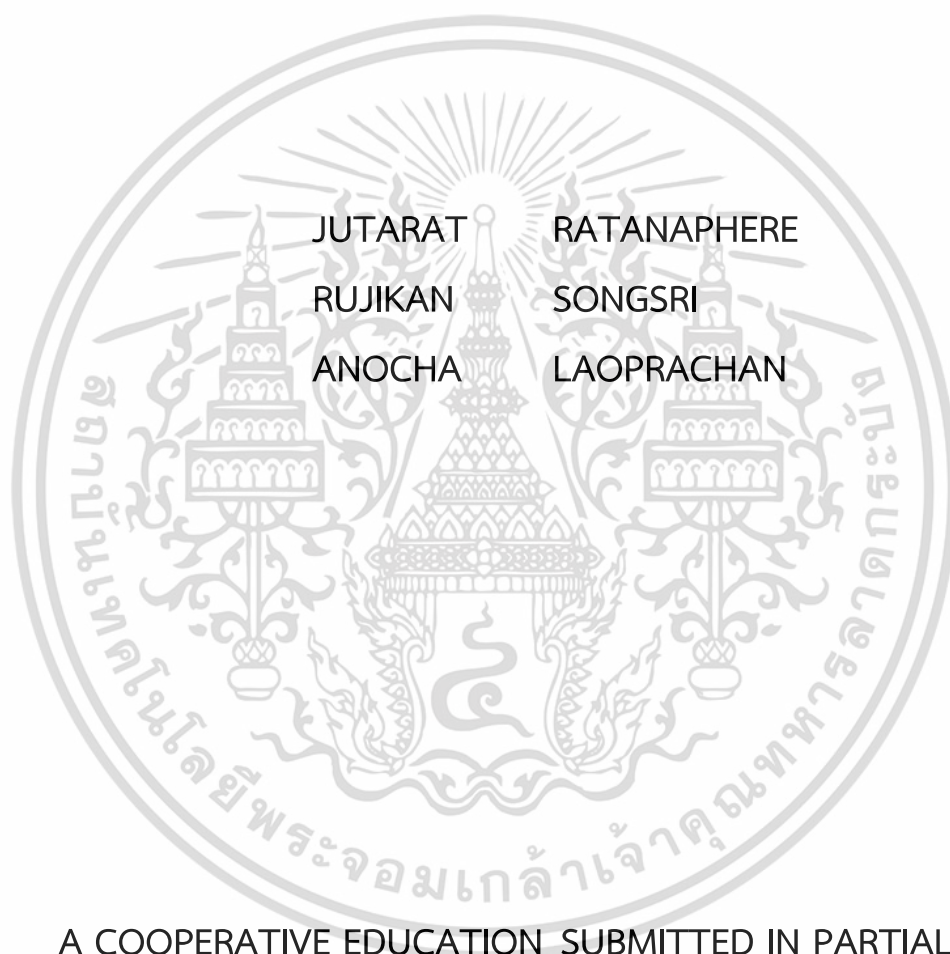


สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2565
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF POLYURETHANE RUBBER WHEELS BY USING
HAND MIXING PROCESS AND RECYCLED PRODUCTS
FROM WHEEL WASTE



A COOPERATIVE EDUCATION SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




หัวข้อสหกิจศึกษา การศึกษาล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยการขึ้นรูปแบบผสมมือและการรีไซเคิลผลิตภัณฑ์จากเศษขยะล้อยาง

Study of polyurethane rubber wheels by using hand mixing process and recycled products from wheel waste

ชื่อนักศึกษา นางสาวจุฑารัตน์ รัตนะแพร รหัสนักศึกษา 62050267
นางสาวรุจิภาญจน์ ส่งศรี รหัสนักศึกษา 62050323
นายอโนชา เหล่าพระจันทร์ รหัสนักศึกษา 62050354

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2565
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
ศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย กรรมการ	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อสหกิจศึกษา	การศึกษาล้อย่างพอลิยูรีเทนด้วยการขึ้นรูปแบบผสมมือและการรีไซเคิลผลิตภัณฑ์จากเศษขยะล้อย่าง		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจุฑารัตน์ รัตนะแพร	รหัสนักศึกษา	62050267
	นางสาวรุจิภาญจน์ ส่งศรี	รหัสนักศึกษา	62050323
	นายอโนชา เหล่าพระจันทร์	รหัสนักศึกษา	62050354
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2565		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด		

บทคัดย่อ

สหกิจศึกษานี้แบ่งงานเป็น 2 ตอน ตอนแรกเป็นการศึกษาวิธีการขึ้นรูปล้อย่างพอลิยูรีเทนโดยวิธีการผสมมือแทนการขึ้นรูปแบบ RIM ที่ต้องใช้สารปริมาณมากในการขึ้นรูป ยากต่อการพัฒนาสูตรและการผลิตจำนวนน้อย ทำการเตรียมตัวอย่างโดยการผสมพรีพอลิเมอร์ปนรวมกับตัวขยายสายโซ่แล้วนำไปเทลงแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นนำไปเข้าระบบสุญญากาศ จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล จากการทดลองพบว่า ระยะเวลาการบ่มกวนที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อความเข้ากันได้ การอุ่นพรีพอลิเมอร์ในเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยกำจัดความชื้นและปรับความหนืดให้เหมาะสม การใช้ระบบสุญญากาศมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการกำจัดฟองที่เกิดขึ้น สัดส่วนของพรีพอลิเมอร์ต่อตัวขยายสายโซ่มีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของล้อย่างที่ได้ การเพิ่มสัดส่วนตัวขยายสายโซ่จะทำให้ล้อย่างแข็งขึ้น และมีความสามารถในการแต่งตัวดีขึ้น ในตอนที่สองเป็นการใช้ประโยชน์จากเศษล้อย่างเสีย การแยกแกลนล้อยอกจากพอลิยูรีเทนโดยใช้แรงเชิงกลสามารถทำได้โดยการตำหนิและกดอัดล้อย่างในทิศทางและจำนวนครั้งที่เหมาะสม แกลนล้อยพลาสติกที่แยกจากพอลิยูรีเทนแล้วสามารถนำไปรีไซเคิลโดยการบดย่อยและฉีดขึ้นรูปเป็นแกลนล้อยใหม่ได้

คำสำคัญ : พอลิยูรีเทน, การผสมมือ, แกลนล้อยรีไซเคิล, เศษล้อย่างเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Study of polyurethane rubber wheels by using hand mixing process and recycled products from wheel waste		
Students	Miss Jutarat Ratanaphere	Student ID 62050267	
	Miss Rujikan Songsri	Student ID 62050323	
	Mr. Anocha Laoprachan	Student ID 62050354	
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2022		
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Ittipol Jangchud		

Abstract

This cooperative study can be divided into two parts. In the first part, hand-mixing method was studied for developing new polyurethane (PU) formulas and small-scale PU rubber wheel production instead of RIM (Reaction Injection Molding). PU wheel samples were prepared by hand-mixing prepolymer with chain extender. The mixed liquid was poured into the mold at 80 °C in the vacuum system. Then the wheel samples were tested for properties. It was found that appropriate mixing time was required to mix the raw materials in order to achieve homogeneous mixture. Preheating the raw materials at a high temperature would eliminate the moisture and adjust the viscosity of raw materials. Vacuum system was a necessity for the hand-mixing system to get rid of the air bubbles. Optimum ratio of the prepolymer and chain extender was also important for good properties of PU wheels. As the chain extender ratio was increased, the harder PU wheels with higher % rebound were achieved.

In the second part, a method to utilize PU wheel waste was studied. The plastic core of PU wheels could be separated out by cutting and hydrolic-pressing the wheel. After PU rubber was separated out, the PP core could be recycled and re-injected into new PP cores.

Keywords: Polyurethane, Hand mixing, Recycled wheel core, Scrap wheels

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเพื่อการศึกษาและวิจัยในวงกว้าง การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

สหกิจศึกษานี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต ที่ได้สละเวลาอันมีค่าแก่ผู้ศึกษา เพื่อให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดจนตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนสหกิจศึกษานี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คณะผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณคณะผู้บริหารและพนักงานทุกท่านของบริษัท บราโว เอเซีย จำกัด ที่ให้ความร่วมมือและให้ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานสหกิจศึกษานี้จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย คณะกรรมการสอบสหกิจศึกษา ที่ช่วยให้คำแนะนำจนสหกิจเล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนในการทำสหกิจศึกษาจนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งในและนอกห้องเรียน และให้คำแนะนำต่างๆตั้งแต่ผู้ศึกษาได้เข้ามาศึกษาในสาขาเคมีอุตสาหกรรมจนกระทั่งทำสหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

ขอขอบคุณบิดา มารดา วงศาคณาญาติ ที่คอยเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันในการใช้ชีวิต ตลอดจนคอยสนับสนุนการเรียนและการทำสหกิจศึกษาในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ นักศึกษาสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ทุกคนที่คอยดูแลให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาในหลายๆ เรื่อง และขอขอบคุณศิลปินที่รักที่คอยเป็นกำลังใจเป็นบุคคลที่คอยสร้างรอยยิ้มให้ในทุกวัน อีกทั้งยังมอบเสียงเพลงอันไพเราะปลอบโยนหัวใจให้เสมอมา บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้ ผู้ศึกษาต้องขอบคุณเป็นอย่างสูง

จุฑารัตน์ รัตนะแพร

รุจิภาณูจน์ ส่งศรี

อโนชา เหล่าพระจันทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 พอลิยูรีเทน	6
2.1.1 สมบัติทั่วไปของพอลิยูรีเทน	6
2.2 พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์.....	8
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์.....	8
2.2.2 กระบวนการผลิตพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์.....	11
2.2.3 ไดไอโซไซยาเนต	13
2.2.4 แมคโครไดออล	15
2.2.5 ตัวขยายสายโซ่.....	17
2.3 ปัญหาของกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน.....	19
2.3.1 ปัญหาโดยทั่วไปของการผลิตพอลิยูรีเทน	19
2.3.2 ปัจจัยที่สำคัญในการลดปัญหา	20
2.4 การหล่อพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ด้วยมือ.....	20
2.4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ ก่อน ระหว่าง และหลังการบ่ม	21
2.4.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูป	21
2.5 การใช้ประโยชน์จากเศษพอลิยูรีเทน	25
2.5.1 การบดและนำมาใช้ใหม่.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นไปใช้ประโยชน์หากมีการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นกรณีเห็นได้ชัดแต่สิ่งใดก็ตามและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

2.5.2 การไฟโรไลซิส.....	25
2.5.3 การนำกลับมาใช้เป็นพลังงาน.....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	29
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	33
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.4 วิธีการทดลอง.....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	41
4.1 การศึกษาการขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการผสมมือ.....	41
4.2 การใช้ประโยชน์จากล้อยางเสีย	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก.....	54
ภาคผนวก ก ข้อมูลของสารที่นำมาขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทน	55
ภาคผนวก ข ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของตัวขยายสายโซ่ไดออล.....	18
2.2 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตแบบกลุ่มและการผลิตแบบต่อเนื่อง	22
3.1 สมบัติบางประการของพรีพอลิเมอร์ ADIPRENE® LF 753D.....	35
3.2 สมบัติบางประการของตัวขยายสายโซ่ที่ใช้ในการทดลอง	35
3.3 ตารางแผนการดำเนินงาน.....	40
4.1 สูตรที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างล้อยาง	44
4.2 ทดสอบการแยกแแกนล้อยางจากล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยการตัดและกดอัด	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การทำปฏิกิริยาระหว่างไดไฮโดรไซยาเนตและพอลิเอทิลีน	1
1.2 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ	1
1.3 ล้อสเก็ทพอลิเอทิลีนจากบริษัท บราว เอเซีย จำกัด	2
1.4 ตัวอย่างจุดบกพร่องที่พบบนล้อยางพอลิเอทิลีนและเศษตัดแต่ง	3
2.1 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเอทิลีน	6
2.2 โครงสร้างทั่วไปของพอลิเอทิลีน	7
2.3 โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์	8
2.4 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์ที่มีส่วนแข็งและส่วนนิ่มสลับกัน	9
2.5 พันธะไฮโดรเจนในพอลิเอทิลีน	10
2.6 แผนผังการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนแบบสองขั้นตอน	12
2.7 การกระจายตัวของส่วนนิ่มและส่วนแข็งบนสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ของพอลิเอทิลีน	13
2.8 ตัวอย่างของอะโรมาติกและอะลิฟาติกไดไฮโดรไซยาเนตที่ใช้ทั่วไป	14
2.9 ตัวอย่างแมคโครไดออลที่ใช้กันทั่วไปในการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนอีลาสโตเมอร์	16
2.10 ตัวอย่างของตัวขยายสายโซ่ไดเอมีน	18
2.11 รูปแบบการผสม	24
2.12 ผลิตภัณฑ์เคมีที่เป็นไปได้จากการรีไซเคิลวัตถุดิบทางเทอร์โมเคมี	26
3.1 แผนการดำเนินงานการพัฒนาล้อยางพอลิเอทิลีนโดยศึกษาเวลาบ่มกวนระหว่างพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่	30
3.2 แผนการดำเนินงานการพัฒนาล้อยางพอลิเอทิลีนโดยศึกษาความแตกต่างของการใช้ระบบสุญญากาศ	31
3.3 แผนการดำเนินงานการพัฒนาล้อยางพอลิเอทิลีนโดยศึกษาอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่ที่ปริมาณต่างกัน	32
3.4 การออกแบบวิธีแยกแกนล้อ	33
3.5 การนำแกนล้อมารีไซเคิลใหม่	34
3.6 บีมสุญญากาศ	36
3.6 เครื่องบดแกนล้อ	37
3.8 ปีนเป่าลมร้อน	37
3.9 โถดูดความชื้น	37
3.10 แม่พิมพ์ขึ้นรูปล้อ	37
3.11 เครื่องคัดแยกแก้ว	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

3.12 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์.....	38
3.13 ส่วนและใบพัดปั่นกวาน	38
3.14 เครื่องอบให้ความร้อนสารและแม่พิมพ์.....	38
4.1 ล้อที่ถูกรูขึ้นรูปโดยใช้เวลาการปั่นกวานที่ต่างกันจากซ้ายไปขวา (5, 15, 30 และ 45 วินาที)...	41
4.2 ล้อที่ขึ้นรูปโดยผ่านระบบสุญญากาศ (ซ้าย) ล้อที่ขึ้นรูปโดยไม่ผ่านระบบสุญญากาศ (ขวา)...	43
4.3 ล้อที่ขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนต่างกัน PU-1, PU-2 และ PU-3 ตามลำดับ	44
4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่ที่ส่งผลต่อเวลาการเกิดเจล	44
4.5 ผลทดสอบความแข็งของล้อพอลิยูรีเทนสูตรต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบเวลาต่างกัน	45
4.6 ผลทดสอบความกระด้างของล้อพอลิยูรีเทนสูตรต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบเวลาต่างกัน.....	46
4.7 ผลทดสอบการหดตัวของล้อพอลิยูรีเทนสูตรต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบเวลาต่างกัน.....	47
4.8 ตัวอย่างจุดบกพร่องของล้อยาง.....	48
4.9 แกนที่ถูกทดสอบด้วยแรง 4.2 6.2 และ 9.2 กิโลกรัม	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
cPs	Centipoise
DEG	Diethylene glycol
MDI	4,4-Methylene diphenyl diisocyanate
MCEDA	Lonzacure
MEK	Methyl Ethyl Ketone
MEG	Monoethylene glycol
MOCA	3,3'-Dichloro-4,4' diaminodiphenylmethane
NMP	N-Methyl-2-pyrrolidone
pMDI	Polymeric methylene diphenyl diisocyanate
PTMO	Polytetrahydrofuran
PTMEG	Polytetramethylene ether glycol
TDI	2,4-Toluene diisocyanate
TMDI	2,2,4-Trimethyl-1,6-hexamethylene diisocyanate

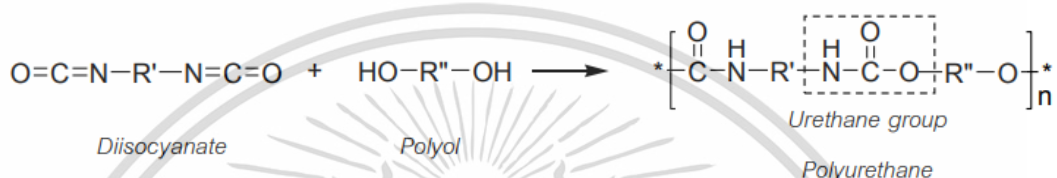
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) กับพอลิโออล (Polyol) เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ได้เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาวที่มีหมู่ยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตและพอลิโออล [1]

หมู่ไฮโดรคาร์บอนของไดไอโซไซยาเนต (R') และของพอลิโออล (R'') สามารถเลือกใช้ได้หลายชนิด ความยาวของสายโซ่ที่ต่างกัน ทำให้ได้พอลิยูรีเทนที่มีสมบัติในหลายลักษณะ เช่น สารเคลือบยูรีเทน (Urethane coatings) ยางนึ่ม ยางแข็ง โฟมนึ่ม โฟมแข็ง ฯลฯ ซึ่งพอลิยูรีเทนส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต (Thermoset) คือ ไม่สามารถหลอมเหลวและขึ้นรูปใหม่ได้



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนชนิดต่าง ๆ [2]

โดยทั่วไปแล้วพอลิยูรีเทนมีสมบัติเด่น คือ ความทนทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ได้ดีมาก ทนทานต่อการกระแทก (Impact) และแรงฉีกขาด (Tear resistance) ทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) มีความยืดหยุ่น (Resilience) สูง โดยมีความทนทานได้เท่ากับโลหะในขณะที่สามารถยืดหยุ่นได้เหมือนยาง ทนทานต่อการเสื่อมสภาพ จากดินฟ้าอากาศ ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากมีโครงสร้างไม่อิมิตัวน้อยมาก และทนทานต่อน้ำมันที่ไม่ซึมได้ดี มีช่วงการใช้งานที่กว้างตั้งแต่ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนถึงมากกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่มีข้อเสีย คือ พอลิยูรีเทนติดไฟง่ายและเกิดควัน

หนาแน่นมาก เมื่อเกิดการเผาไหม้จะปล่อยก๊าซพิษออกมาด้วย เช่น ไอโซไซยาไนด์ ไฮโดรเจน-ไซยาไนด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

จากสมบัติเด่นที่กล่าวมาทำให้พอลิยูรีเทนมีความนิยมเป็นอย่างมาก สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เพียงแค่ปรับเปลี่ยนสูตรให้ตรงกับความต้องการ ปัจจุบันพอลิยูรีเทนถือครองส่วนแบ่งตลาดที่ใหญ่ที่สุดในอุตสาหกรรมพลาสติกและอุตสาหกรรมสารเคลือบ กาว สารกันรั่ว และอีลาสโตเมอร์ แม้ว่าข้อดีเฉพาะตัวของพอลิยูรีเทนจะมีมาก แต่พอลิยูรีเทนมักจะแข่งขันกับพอลิเมอร์ต้นทุนต่ำ ปัจจัยที่มีความสำคัญ คือ เวลาในการผลิต ต้นทุนของเครื่องมือ และการรีไซเคิลของเสียที่เกิดจากการตัดแต่งผลิตภัณฑ์ [3]



รูปที่ 1.3 ล้อสเก็ทพอลิยูรีเทนจากบริษัท บราโว เอเชีย จำกัด [4]

บริษัท บราโว เอเชีย จำกัด เป็นบริษัทที่ผลิตล้อสเก็ทพอลิยูรีเทน ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยผลิตภัณฑ์หลักคือ ล้อสเก็ทพอลิยูรีเทนสำหรับการใช้งานทางด้านกีฬา ในแต่ละรอบของกระบวนการผลิต พบล้อยางที่มีจุดบกพร่อง (Defects) เช่น ฟองอากาศ ผิวเสีย คราบซิลิโคน ฯลฯ ทำให้ล้อยางเหล่านี้กลายเป็นของเสีย (Nonconformity product, NC) ซึ่งไม่สามารถจำหน่ายหรือนำมาหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ เนื่องจากล้อยางเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมเซต (Thermoset) จึงเกิดเป็นขยะล้อยาง รวมถึงเศษที่เกิดจากการตัดตกแต่งล้อยาง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งขยะล้อยางเหล่านี้จำเป็นต้องมีการกำจัดที่ถูกต้อง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 ตัวอย่างจุดบกพร่องที่พบบนล้อยางพอลิยูรีเทนและเศษตัดตกแต่ง

การขึ้นรูปพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิคฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding, RIM) อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไอโซไซยาเนตและพอลิออล โดยสารเคมีทั้ง 2 ถูกเก็บแยกถังและใช้แรงดันจากปั๊มปล่อยสารให้ผสมกันบริเวณทางเข้ากระบวนการนี้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความแข็งแรง มีขนาดใหญ่แต่น้ำหนักเบา ชิ้นงานมีพื้นผิวเรียบ ใช้กำลังคนในการผลิตน้อย คุณภาพของชิ้นงานสม่ำเสมอ แต่ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือรอบเวลาช้าเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตขึ้นรูปแบบอื่น ๆ เครื่องมือที่ใช้มีราคาสูง ต้องขึ้นรูปในปริมาณที่มาก ส่งผลให้เกิดของเสียจำนวนมาก และต้องดำเนินการต่อเนื่อง ทำให้ยากต่อการพัฒนาสูตร จึงได้จัดทำวิจัยขึ้นเพื่อให้สามารถขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยการผสมมือ ที่สามารถขึ้นรูปในปริมาณน้อย อีกทั้งสามารถพัฒนาสูตรได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้สารจำนวนมาก

สหกิจศึกษานี้เป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบริษัท บราโว เอเซีย จำกัด มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษากระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยการผสมมือ (Hand mixing) โดยไม่ให้เกิดฟอง เพื่อขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนในปริมาณน้อย ลดต้นทุนในการผลิต ประหยัดเวลา และต้องการที่จะตอบโจทย์กับบริษัทในประเทศ ที่ต้องการล้อยางพอลิยูรีเทนในจำนวนที่น้อย ให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding, RIM) นอกจากนี้ยังมีความต้องการที่จะศึกษาการนำล้อยางเสียและเศษขยะล้อยางที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตมาใช้ประโยชน์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับล้อยางเสียที่ไม่สามารถนำไปจำหน่ายได้ และเศษขยะล้อยางที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีก ตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือการหมุนเวียนใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการสร้างระบบการผลิตใหม่ (Re-process) ผ่านการออกแบบใหม่ (Re-design) การสร้างคุณค่าใหม่ (Added value) การสร้างนวัตกรรมใหม่ (Innovation) การสร้างความร่วมมือ (Collaboration) เพิ่มขึ้น และการใช้ซ้ำ (Reuse) ถือเป็น การสร้างคุณค่าที่ดีขึ้นและสร้างความยั่งยืนให้กับสิ่งแวดล้อม [5]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบผสมมือ (Hand mixing) ให้ได้ล้อยที่มีความแข็ง 75 Shore D
- 2) ศึกษาการนำขยะจากล้อยางที่ไม่สามารถนำออกจำหน่ายได้ มาทำการแยกเพื่อนำแกนไปบด หลอมขึ้นรูปใหม่ เพื่อลดต้นทุนการผลิตแกนล้อย และเป็นการใช้ประโยชน์จากขยะของเสีย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ตอนที่ 1 ศึกษาการขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการผสมมือ

- 1) ทบทวนทฤษฎีและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไม่ให้เกิดฟองด้วยวิธีสุญญากาศ
- 3) ศึกษาแนวเปรียบเทียบวิธีการขึ้นรูปแบบผสมมือ (Hand mixing) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางกายภาพ
- 4) ทำการขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนตามสูตร
- 5) ทดสอบสมบัติทางกายภาพของล้อยางพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้
 - สังเกตฟองอากาศบนล้อยางพอลิยูรีเทน
- 6) ทดสอบสมบัติเชิงกลของล้อยางพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้
 - ความแข็ง (Hardness, Shore D) ASTM D2240
 - ความกระเด็ง (Rebound resilience) DIN 53512
 - การหดตัว (Shrink test)

ตอนที่ 2 การใช้ประโยชน์จากล้อยางเสีย

2.1 การแยกแกนล้อยออกจากล้อยางพอลิยูรีเทน

- ทดลองการแยกแกนล้อยออกจากล้อยางพอลิยูรีเทนโดยการกดอัดที่มีการตัดลักษณะต่างกัน
- ทำการกดอัดล้อยางพอลิยูรีเทนในลักษณะต่าง ๆ เพื่อให้ได้แกนล้อยนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 การนำแกนล้อยอัดมารีไซเคิลเพื่อนำมาผลิตเป็นแกนล้อยใหม่อีกครั้ง

- นำแกนล้อยอัดมาบดย่อยเพื่อให้มีขนาดเล็กลงสามารถนำไปรีไซเคิลได้
- ทำการแยกเศษแกนล้อยออกจากเศษล้อยางพอลิยูรีเทนโดยการแช่น้ำแยกโดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารนำเศษแกนล้อยที่ผ่านการแยกไปหลอมขึ้นรูปแกนใหม่ มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทดสอบสมบัติเชิงกลของแกนล้อยที่เตรียมได้ โดยการทดสอบแรงกระแทก (Impact test) ใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการขึ้นรูปล้อพอลิยูรีเทนโดยการผสมมือ
- 2) มีวิธีที่เหมาะสมที่จะแปรรูปล้อของเสียทำให้เกิดมูลค่าหรือมีประโยชน์ใช้สอย
- 3) ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มาจกเศษขยะล้อยางหรือเศษที่เหลือจากกระบวนการผลิตสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษขยะล้อยางได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิยูรีเทน

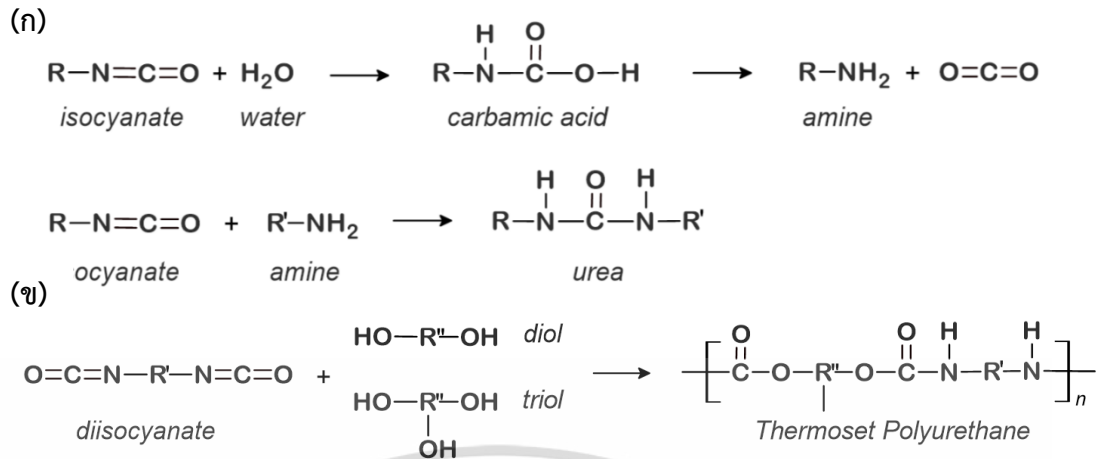
พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) คือพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง เพื่อใช้ทดแทนยางธรรมชาติและยังใช้ในการผลิตกระดาษ ผ้าที่มีความทนทาน เคลือบผิวเครื่องบิน เคลือบโลหะ ไม้และอิฐ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของสารเคมี โดยเริ่มจากเพียงแค่ว่าปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนตกับพอลิเอสเทอร์ไดออล เนื่องจากความง่ายในการผลิตและมีสมบัติที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายจึงทำให้ปริมาณการใช้งานพอลิยูรีเทนในปัจจุบันมีแนวโน้มที่สูงขึ้น

2.1.1 สมบัติทั่วไปของพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวที่สามารถเตรียมให้มีลักษณะแข็งเหนียวจนกระทั่งนุ่มฟูแบบฟองน้ำ เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization) ระหว่างไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) กับพอลิออล (Polyol) ในระบบตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาวที่มีหมู่ยูรีเทน โดยพันธะยูรีเทน (Urethane linkage) จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาของหมู่ไอโซไซยาเนต ($-N=C=O$) กับหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิออล ($-OH$) ซึ่งจะไปเพิ่มปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่ พอลิยูรีเทนแบบแข็งโดยทั่วไปได้มาจากการใช้พอลิออลที่มีสายโซ่สั้น เชื่อมขวางกันได้ดี และมีส่วนที่เป็นอะโรมาติกในโครงสร้าง สำหรับปฏิกิริยาการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทนเมื่อไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อเกิดเป็นพันธะยูเรียและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังรูปที่ 2.1 (ก) จะได้พอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นโฟม เนื่องจากการเติมน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ปุดอยู่ในเนื้อสาร เกิดโครงสร้างรูพรุนของโฟมจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ หากใช้เฉพาะไดไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับไดออลจะได้พอลิยูรีเทนที่มีลักษณะเป็นเทอร์โมพลาสติก สำหรับเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทนสามารถเกิดขึ้นได้โดยการเติมสารที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 หมู่ฟังก์ชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) [6]

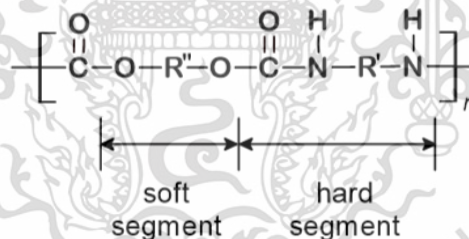
ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทนและความแตกต่างของชนิดพอลิยูรีเทนนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิลของไดไอโซไซยาเนต (R') และของพอลิออล (R'') อย่างไรก็ตามชนิดของพอลิยูรีเทนอาจไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่ไฮดรอกซิลเพียงอย่างเดียว แต่อาจขึ้นอยู่กับลักษณะหน่วยซ้ำของพอลิยูรีเทนด้วย [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน (ก) ระหว่างไอโซไซยาเนตและน้ำ (ข) ระหว่างไดไอโซไซยาเนตและพอลิแอล

ลักษณะโครงสร้างของพอลิยูรีเทนนอกจากหมู่ไฮโดรคาร์บอนเป็นหน่วยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของพอลิยูรีเทนแต่ละชนิด ลักษณะโครงสร้างของหมู่ไฮโดรคาร์บอนยังสามารถใช้เป็นกลุ่มที่สามารถบ่งบอกแนวโน้มสมบัติของพอลิยูรีเทนได้ จากโครงสร้างพื้นฐานของหน่วยซ้ำจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่นิ่มและส่วนที่แข็ง ซึ่งส่วนที่นิ่ม (Soft segment) จะเป็นกลุ่มในสไตรีนไดโอล สำหรับส่วนแข็ง (Hard segment) จะเป็นส่วนที่อยู่ในกลุ่มไดไอโซไซยาเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน

การที่พอลิยูรีเทนสามารถแสดงลักษณะพฤติกรรมได้เช่นนี้ เป็นเพราะ $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$ ที่อยู่ในสไตรีนไดโอล มีความยืดหยุ่นได้ ส่วน $-\text{NH}-\text{CO}-$ ในไดไอโซไซยาเนต มีความแข็งแรงที่สูงกว่า นอกจากมุมพันธะที่มีความยืดหยุ่นต่ำกว่า ยังมีผลจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ฟังก์ชันของส่วนนี้ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามลักษณะความนิ่มและความแข็งมีความแตกต่างกันได้ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของหมู่ไฮโดรคาร์บอนทั้งสองกลุ่ม และการผสมผสานของส่วนที่แข็งและส่วนที่นิ่มนี้ทำให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานที่หลากหลายเช่นกัน

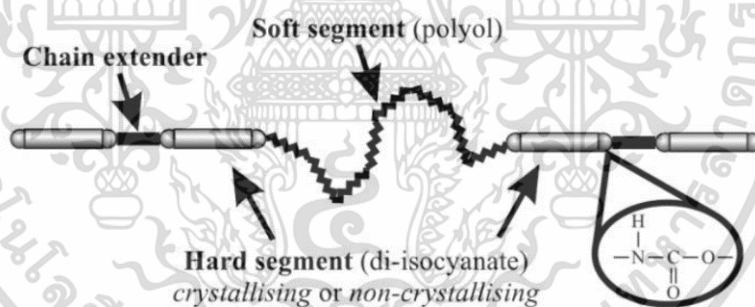
พอลิยูรีเทนสามารถทำให้มีสมบัติที่หลากหลาย ซึ่งเกิดจากปริมาณสัดส่วนระหว่างไดโอลและไดไอโซไซยาเนตในโมเลกุล การมีปริมาณกลุ่มไดไอโซไซยาเนตสูงส่งผลให้พอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูง และการใช้พอลิออลที่มีโครงสร้างต่างกันส่งผลให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติต่างกันด้วย ถ้าใช้พอลิออลที่เป็นพอลิเอสเทอร์จะได้พอลิเอสเทอร์ยูรีเทน (Polyester urethane, AU) ถ้าใช้พอลิออลจำพวกพอลิอีเทอร์ก็จะได้พอลิอีเทอร์ยูรีเทน (Polyether urethane, EU) ซึ่งให้ความยืดหยุ่นและให้ความกระด้าง (Rebound) กับผลิตภัณฑ์ได้ดี จึงเหมาะแก่การนำไปขึ้นรูปเป็นล้อยู่กัน การใช้พอลิออลที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว (เช่น พันธะคู่) ทำให้สามารถเชื่อมโยงอย่างพอลิยูรีเทนได้ด้วยกำมะถันหรือสารประกอบเปอร์ออกไซด์ ยางพอลิยูรีเทนแต่ละเกรดมีความแตกต่างกันทั้งกระบวนการขึ้นรูป การเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล

2.2 พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์

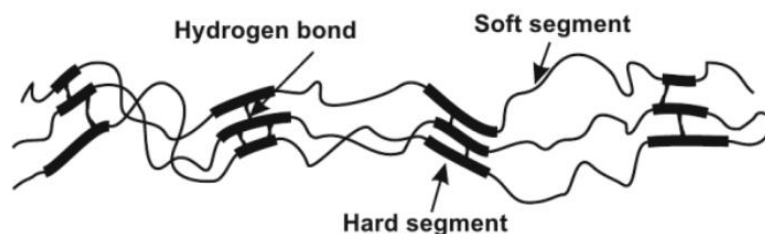
พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ (Polyurethane elastomer) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานเนต (อะโรมาติกหรืออะลิฟาติก) ไดออลสายยาว (Macrodiol) และไดออลมวลโมเลกุลต่ำที่ทำหน้าที่เป็นตัวขยายสายโซ่ (Chain extender diol) หรือไดเอมีน (Diamine) ผลจากการสังเคราะห์จะได้พอลิเมอร์ที่เป็นลักษณะโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ของลำดับแมคโครไดออล ซึ่งเรียกว่าส่วนที่นิ่ม และลำดับไดไอโซไซยานเนต-ตัวขยายสายโซ่ (Chain extender) เรียกว่าส่วนที่แข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างหน่วยซ้ำของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ [7]

ส่วนที่แข็งเกิดจากส่วนขยายสายโซ่กับไดไอโซไซยานเนตที่สลับกัน โดยการเชื่อมขวางผ่านกลุ่มยูรีเทน จะช่วยในการตกผลึกจึงส่งเสริมการแยกเฟสระหว่างส่วนที่นิ่มและส่วนที่แข็ง เนื่องจากความแข็งตามธรรมชาติและการเกิดพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นส่วนที่แข็งจึงสัมพันธ์กับโดเมนแข็ง (Hard domain) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinks) และเป็นอนุภาคสารตัวเติม (Filler) ภายในส่วนที่นิ่ม ในขณะที่ส่วนนิ่มสร้างมาจากพอลิออลซึ่งทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์หลักของยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [7-10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่มีส่วนแข็งและส่วนนิ่มสลับกัน [7]

จากความไม่เข้ากัน (ความมีขั้วและลักษณะทางเคมีที่ต่างกัน) ระหว่างส่วนที่แข็งและส่วนที่นิ่ม จึงเกิดการแยกเฟสในพอลิยูรีเทนเป็นส่วนใหญ่ ระดับของการแยกเฟสและการสร้างโดเมนขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของส่วนที่แข็งและส่วนที่นิ่ม รวมไปถึงชนิดของไดไอโซไซยานาตและพอลิออลที่ใช้ เพื่อผลิตพรีพอลิเมอร์ (Prepolymer) ประเภทของตัวขยายสายโซ่ และน้ำหนักโมเลกุลของส่วนที่นิ่ม นอกจากนี้ยังได้รับอิทธิพลจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างการเชื่อมของยูรีเทนจากกระบวนการผลิตและสภาวะของการเกิดปฏิกิริยา

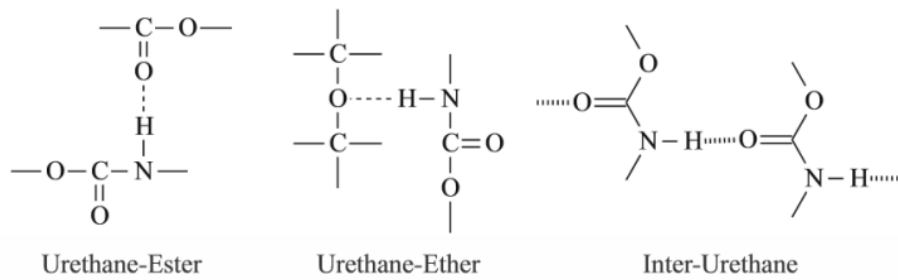
โดยปกติการแยกไมโครเฟสจะไม่สมบูรณ์ และเฟสของส่วนที่นิ่มและส่วนที่แข็งจะมีส่วนอื่น ๆ ร่วมอยู่ด้วย ขนาดโดเมนโดยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นจาก 10 นาโนเมตรเป็น 20 นาโนเมตร เมื่อมีปริมาณส่วนที่แข็งเพิ่มขึ้น รูปร่างของโดเมนที่แข็งสามารถอยู่ในรูปแบบของทรงกลม 5-20 นาโนเมตร หรือลักษณะเข็มที่มีความหนา 5 นาโนเมตรและความยาว 50-300 นาโนเมตร พฤติกรรมการแยกเฟสของพอลิยูรีเทนศึกษาได้จากการใช้เทคนิคการจำแนกต่าง ๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscopy), การวัดการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และนิวตรอนที่มุมเล็ก ๆ (Small angle X-ray and neutron scattering), การวิเคราะห์เชิงไดนามิกส์ (Dynamic mechanical analysis), และเทคนิคการวัดความเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential scanning calorimetry) [11-21]

โครงสร้างพอลิเมอร์ที่แบ่งเป็นส่วน ๆ ทั้งส่วนที่นิ่มและส่วนที่แข็ง ขึ้นอยู่กับสภาวะของปฏิกิริยา ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ส่วนที่นิ่มมักจะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำกว่าอุณหภูมิการใช้งานของพอลิยูรีเทน ซึ่งได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไดไอโซไซยานาต กับไกลคอลหมู่ใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (สูงกว่า 1000 ขึ้นไป) ในขณะที่ส่วนที่แข็งมักเป็นโมเลกุลอะโรมาติกที่ค่อนข้างแข็ง การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) จึงเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า การใช้งานของพอลิยูรีเทน ซึ่งได้มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไดไอโซไซยานาต กับไกลคอลที่มีสายโซ่โมเลกุลสั้น

หมู่ยูรีเทนจะเชื่อมโยงส่วนที่แข็งและส่วนที่นิ่มเข้าด้วยกันโดยใช้พันธะโควาเลนต์และพันธะไฮโดรเจน โดยจะจัดเรียงไว้ระหว่างสายโซ่ หมู่ยูรีเทนสามารถเชื่อมโยงตนเองผ่านพันธะไฮโดรเจนดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนเชิงเส้นได้ทั้งแบบขนานและไม่ขนาน ยูรีเทนสามารถสร้างชุดพันธะไฮโดรเจนที่ไม่มีที่สิ้นสุดได้อีกด้วย พันธะไฮโดรเจนมีผลอย่างมากต่อจลนศาสตร์ของการก่อตัวของหมู่ยูรีเทน การอบอ่อน (Annealing) จะช่วยให้พันธะไฮโดรเจนแข็งแรง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นและเพิ่มจุดหลอมเหลวของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ เนื่องจากจะทำให้การเชื่อมโยงของพอลิเมอร์ มีความสม่ำเสมอที่เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.5 พันธะไฮโดรเจนในพอลิยูรีเทน [22]

พฤติกรรมของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์จะมีความยืดหยุ่นสูง โดยมีแรงระหว่างโมเลกุลต่ำ และต้องมีการเชื่อมขวางเพื่อป้องกันการเลื่อนของสายโซ่ การเชื่อมขวางสามารถเป็นได้ทั้งทางเคมีและกายภาพ การเชื่อมขวางทางกายภาพสามารถเกิดได้ผ่านการสร้างพันธะไฮโดรเจนและการก่อดวงของโดเมนแข็ง ในขณะที่การเชื่อมขวางทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งการเชื่อมขวางทางเคมีไม่สามารถทำลายได้ด้วยความร้อน แต่เนื่องจากพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์มีการเชื่อมขวางทั้งเคมีและกายภาพ ดังนั้นการที่เชื่อมขวางทางกายภาพจะช่วยให้เกิดการหลอมหรือละลายได้

สมบัติของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ กล่าวคือ ธรรมชาติ และฟังก์ชันของแมโครโมโนเมอร์ (Macromonomer) ประเภทของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์โดยทั่วไป ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเทอร์โมเซต (Thermoset) โดยที่เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์สามารถแปรรูปด้วยความร้อนได้ ในขณะที่ยางเทอร์โมเซตถูกเชื่อมขวางและไม่สามารถแปรรูปด้วยความร้อนได้

การที่จะทำให้พอลิเมอร์เป็นเทอร์โมพลาสติกได้ ต้องเลี่ยงการเชื่อมขวางโดยการดูดซับความชื้น รวมไปถึงองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องคำนวณเป็นจำนวนโมล (โมลของไดไอโซไซยานต : โมลของแมโครไดออล : โมลของตัวขยายสายโซ่) โดยถูกจำกัดด้วยปริมาณสารสัมพันธ์ คือ โมลของไดไอโซไซยานต = โมลของแมโครไดออล + โมลของตัวขยายสายโซ่ แต่การเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างมากอาจได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของจำนวนโมลของไดไอโซไซยานต : จำนวนโมลของแมโครไดออล ซึ่งจะเปลี่ยนส่วนของสายโซ่ส่วนที่แข็งในโคพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม สมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ไม่เพียงแต่ได้รับอิทธิพลจากสายโซ่ส่วนที่แข็งเท่านั้น แต่ยังมีความเฉพาะเนื่องมาจากไดไอโซไซยานตถูกกำจัดที่ปลายสายโซ่แต่ละด้านโดยการเชื่อมโยงของยูรีเทน ซึ่งหมู่ยูรีเทนอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับกลุ่มโมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงจึงส่งผลต่อสมบัติทางกลด้วย

การปรับเปลี่ยนสูตรทำให้สามารถผลิตวัสดุที่มีสมบัติตั้งแต่ยางที่มีลักษณะอ่อนนุ่มไปจนถึงยางที่แข็ง อย่างไรก็ตาม ยางทั่วไปจะมีการเชื่อมขวางแบบโควาเลนต์ แต่ในยางพอลิยูรีเทนจะเป็นการเชื่อมขวางทางกายภาพซึ่งจะทำให้ยางพอลิยูรีเทนสามารถหลอมเพื่อนำไปขึ้นรูปหรืออัดรีดได้

ข้อดีของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์สัมพันธ์กับความแข็งแรงที่สูง ทนต่อการเสียดสี และทนต่อสารเคมี มีสมบัติทางกลและความยืดหยุ่นที่ดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์เพื่อปรับโครงสร้างโดยการเปลี่ยนประเภทและอัตราส่วนขององค์ประกอบเริ่มต้นระหว่างกระบวนการ เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ

2.2.2 กระบวนการผลิตพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์นั้น ขึ้นอยู่กับวิธีการสังเคราะห์วิธีต่าง ๆ โดยสามารถจำแนกได้ตามตัวกลางในการเตรียม และลำดับของการเติมของสารตั้งต้น (การสังเคราะห์แบบขั้นตอนเดียว หรือแบบพรีพอลิเมอร์) ความแตกต่างของวัสดุที่เตรียมโดยพรีพอลิเมอร์ (Prepolymer synthesis routes) กับแบบขั้นตอนเดียว (One step synthesis routes)

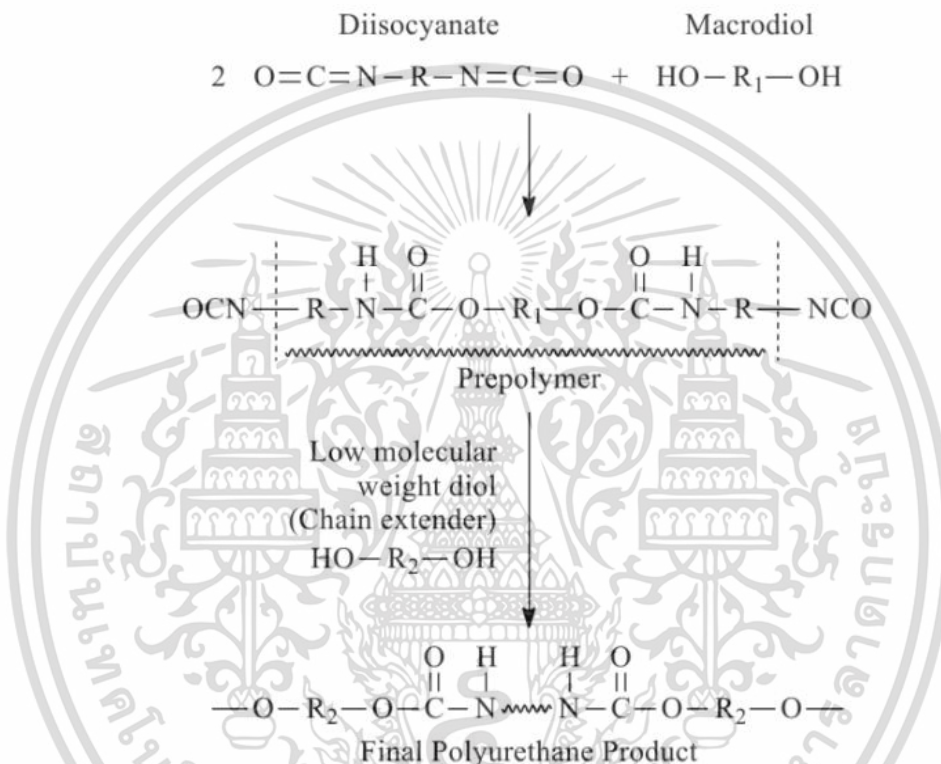
กระบวนการพอลิแอดดิชันแบบครั้งเดียว (One-shot polyaddition) สารรีเอเจนต์ทั้งหมด (แมคโครไดออล ไดไอโซไซยาเนต ตัวขยายสายโซ่) จะถูกเติมภายในครั้งเดียวระหว่างเริ่มต้นปฏิกิริยาเป็นเทคนิคที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม แต่เป็นกระบวนการที่ไม่มีการควบคุมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอของการจัดเรียงตัว อย่างไรก็ตามข้อดีของปฏิกิริยานี้คือ สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และสามารถผลิตซ้ำได้จำนวนมาก โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของส่วนไดออลและไอโซไซยาเนตใกล้เคียงกัน หากปฏิกิริยาของทั้งสองกลุ่มในไอโซไซยาเนตเท่ากัน อัตราส่วนของอัตราการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์จะมีค่าเป็น 2 เนื่องจากความเข้มข้นของหมู่ NCO ตัวที่สองจะมีความเข้มข้นเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นเดิม

เนื่องจากส่วนประกอบของไดไอโซไซยาเนตและแมคโครไดออลมักเข้ากันไม่ได้ในอุณหภูมิที่ต่ำ ดังนั้นปฏิกิริยามักจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวระหว่างเฟสทั้งสอง และความสมดุลของปริมาณสารสัมพันธ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ความเข้ากันไม่ได้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของโครงสร้าง ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวของส่วนที่แข็ง การแยกตัวระหว่างกระบวนการผลิต และความสามารถในการละลายในตัวทำละลายได้ต่ำซึ่งเป็นผลที่เกิดเช่นเดียวกับกระบวนการพรีพอลิเมอร์ แต่กระบวนการพรีพอลิเมอร์จะมีความสม่ำเสมอมากกว่า

การที่พอลิเมอร์ยังมีความสม่ำเสมอของผลึกที่เกิดจากกระบวนการผลิตขั้นตอนเดียวได้ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาของไกลคอลและไดไอโซไซยาเนต ทำให้องค์ประกอบมีความเป็นผลึกสูงและสายโซ่สามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงสามารถจัดเรียงผลึกได้ก่อนที่จะมีการขยายตัวของผลึกเพิ่มขึ้น บริเวณที่มีความเป็นผลึกจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวางช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงของยางแม้ว่าวัสดุจะถูกหล่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงแต่ยังคงต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของยาง

ในกระบวนการผลิตแบบช็อตเดียว (One-shot method) ปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปฏิกิริยาที่แตกต่างกันของหมู่ไอโซไซยาเนตและหมู่ไฮดรอกซิลที่แตกต่างกันของพอลิออลและตัวขยายสายโซ่ อาจส่งผลกระทบต่อการใช้งานของส่วนที่แข็งในสายโซ่หรือแม้แต่การสร้างโอลิโกเมอร์ระหว่างไดไอโซไซยาเนต-ตัวขยายสายโซ่ และได้ไอโซไซยาเนต-แมคโครไดออลโคพอลิเมอร์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางตรงกันข้าม การเกิดพอลิเอไมโรเซชันแบบสองขั้นตอน (Two-step polymerization) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ขั้นตอนแรกของปฏิกิริยา พรีพอลิเมอร์ถูกผลิตขึ้นผ่านปฏิกิริยาของการต่อสาย ส่วนนึ่งที่มีไดไอโซไซยาเนตและแมโครไดออล ตามด้วยการต่อสายโซ่โดยไดออลสายสั้นหรือไดเอมีน เพื่อสร้างส่วนแข็งและยังเป็นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลโดยรวมของพอลิเมอร์ วิธีการนี้จะทำให้เกิดสายโซ่ตรงของพอลิยูรีเทน เนื่องจากมีการควบคุมที่มากขึ้น มีปฏิกิริยาข้างเคียงน้อยและมีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ (Polydispersity index, PDI) ใกล้กับ 2 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ต้องการจากพอลิเมอร์ที่มีการเติบโตเป็นขั้น



รูปที่ 2.6 แผนผังการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนแบบสองขั้นตอน [22]

โครงสร้างหลักในอุดมคติของพอลิยูรีเทนคือบล็อกโคพอลิเมอร์แบบสลับ (Alternating block copolymer) สมบูรณ์ แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างส่วนนึ่งตลอดจนปฏิกิริยายูรีเทนเป็นไปตามสถิติการกระจายแบบฟลอรี (Flory distribution) เป็นสาเหตุที่ทำให้ส่วนแข็งของสายโซ่เกิดการก่อตัวที่ไม่สลับกันอย่างสมบูรณ์ และความยาวของบล็อกอาจแตกต่างกันไป การเชื่อมพันธะของส่วนแข็งและส่วนนึ่งในโครงสร้างพอลิยูรีเทนโคพอลิเมอร์ ทำได้โดยการเชื่อมส่วนที่เหลือของ NCO ตัวใดตัวหนึ่งขององค์ประกอบส่วนที่อ่อน (S) หรือแข็ง (H) กับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (OH) ขององค์ประกอบส่วนที่อ่อน (S) หรือแข็ง (H) ดังแสดงในรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1)	————— SHHSHHSHHSHH —————	8H - 4S ordered
(2)	————— HHHSSHHSHHHS —————	8H - 4S unordered
(3)	————— HHHHHHSSSHHS —————	8H - 4S unordered

รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของส่วนนิ่มและส่วนแข็งบนสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ของพอลิยูรีเทน [22]

จำนวนของหมู่ไอโซไซยาเนต (NCO) ที่เข้าทำปฏิกิริยาจะเท่ากับจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ทั้งหมดที่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นในทางทฤษฎีแล้ว มันใจได้ว่าการก่อตัวของความยาวโมเลกุลไม่มีที่สิ้นสุด โดยหลักแล้วโครงสร้างปกติของพอลิยูรีเทนจะปรากฏขึ้นเป็นลำดับของส่วนนิ่มและแข็งซ้ำกัน เป็นระยะ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (1) หรือโครงสร้างที่ผิดปกติดังรูปที่ 2.7 (2,3) ถ้าหากอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการรวมส่วนของแข็งและส่วนนิ่มบนสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ที่เพิ่มขึ้นนั้นเท่ากัน จะส่งผลให้มีการกระจายของส่วนแข็ง-ส่วนนิ่มที่มีลำดับต่อเนื่องกัน และถ้าหากอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งสองไม่เท่ากัน ในขั้นต้นของสายโซ่จะปรากฏลำดับของกระบวนการที่รวดเร็วก่อน แล้วค่อยตามมาด้วยพันธะของลำดับที่ก่อตัวขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่า

2.2.3 ไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate)

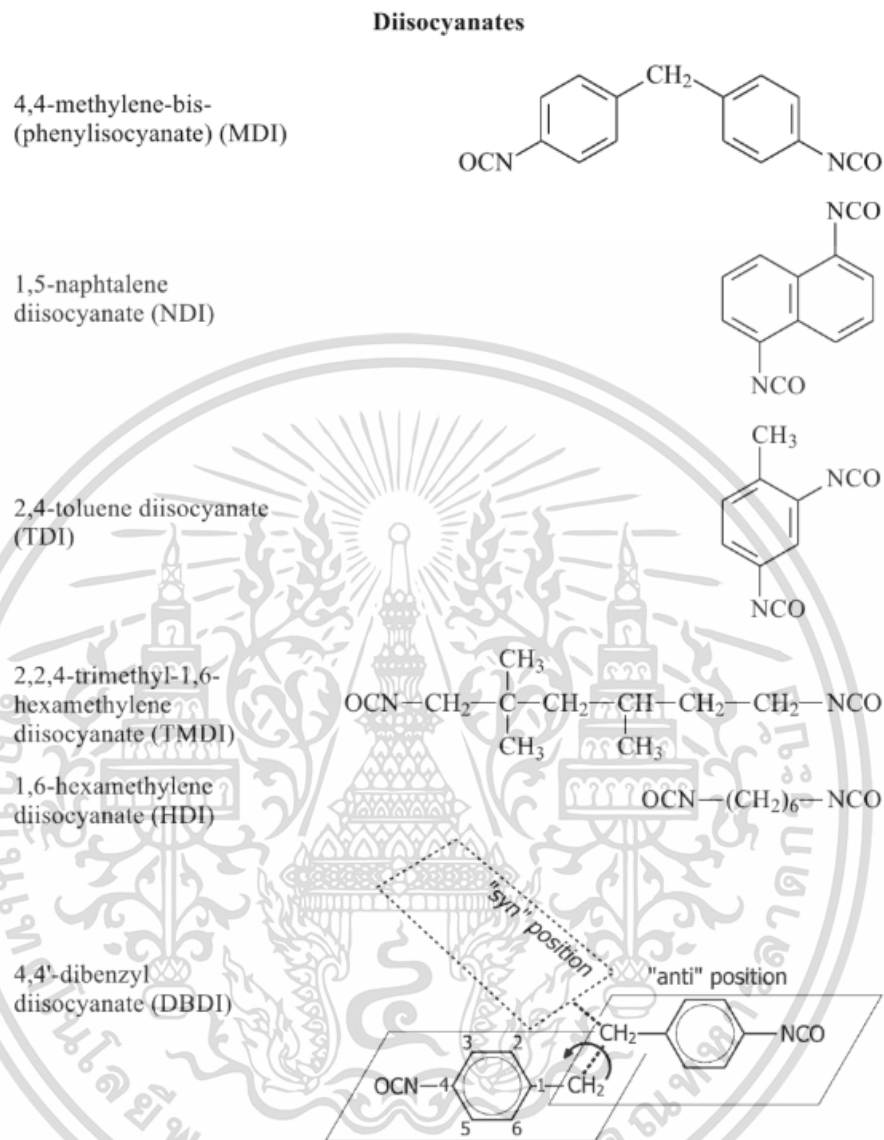
ไอโซไซยาเนตคือส่วนประกอบสำคัญอันดับแรกของพอลิยูรีเทน เป็นโมเลกุลที่มีไอโซไซยาเนต 2 หมู่ เรียกว่าไดไอโซไซยาเนต ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) เข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่มีกลุ่มแอลกอฮอล์ (ไฮดรอกซิล) เพื่อผลิตพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์

ส่วนแข็งของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์สามารถเป็นได้ทั้งอะโรมาติก (Aromatic) หรืออะลิฟาติก (Aliphatic) ซึ่งอะโรมาติกไอโซไซยาเนตจะมีความว่องไวปฏิกิริยามากกว่าอะลิฟาติกไอโซไซยาเนต สามารถนำไปใช้ได้ก็ต่อเมื่อมีความจำเพาะตรงกับปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์นั้น ๆ และมีสมบัติพิเศษที่ต้องการในผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่ทำจากอะลิฟาติกไอโซไซยาเนตจะมีความเสถียรต่อแสง ในขณะที่วัสดุที่ทำจากอะโรมาติกไอโซไซยาเนตจะเกิดการเสื่อมสลายด้วยแสง นอกจากนี้ความว่องไวต่อปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตอาจมีความแตกต่างกันอย่างมากแม้จะอยู่ในกลุ่มไดไอโซไซยาเนตเดียวกัน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปฏิกิริยา คือ โครงสร้าง หมู่แทนที่ และผลจากความเกะกะ ตัวอย่างเช่น ใน 2,4-โทลูอินไดไอโซไซยาเนต (TDI) หมู่ไอโซไซยาเนตตำแหน่งพาราจะมีปฏิกิริยาตอบสนองมากกว่าหมู่ไอโซไซยาเนตที่ตำแหน่งออร์โทถึง 25 เท่าและการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ไอโซไซยาเนตหมู่ที่สองสามารถเปลี่ยนแปลงได้จากปฏิกิริยาเริ่มต้น

อะโรมาติกไอโซไซยาเนตที่สำคัญที่สุดมี 2 ชนิดคือ 2,4-โทลิลีนไดไอโซไซยาเนต (TDI) และ 4,4-ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (MDI) TDI ประกอบด้วยส่วนผสมของ 2,4- และ 2,6-โทลูอินไดไอโซไซ-
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยานต์ไอโซเมอร์ ตัวอย่างไอโซไซยาเนตอื่นๆ ที่ใช้กันทั่วไปในงานพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [22-25]



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของอะโรมาติกและอะลิฟาติกไดไอโซไซยาเนตที่ใช้ทั่วไป [22]

อะโรมาติกไดไอโซไซยาเนตทั่วไป เช่น 4,4- ไดฟีนิลมีเทนไดไอโซไซยาเนต (MDI), 1,5-แนพทาไลน์ไดไอโซไซยาเนต (NDI) และ 2,4- โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (TDI) ซึ่งในรูปแบบเชิงพาณิชย์ที่มากที่สุดคือ ส่วนผสมของ 2,4- และ 2,6-โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต ไอโซเมอร์ (TDI) โดยมีอัตราส่วน 80:20

อะลิฟาติกไดไอโซไซยาเนตที่ใช้กันทั่วไป เช่น 2,2,4-ไตรเมทิล-1,6-เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (TMDI) และ 1,6-เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (HDI) ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นไอโซไซยาเนตในรูปแบบของแข็ง ตัวอย่างเช่น HDI เป็นไดไอโซไซยาเนตที่มีผลึกสูง ซึ่งก่อตัวเป็นโครงสร้างทรงกลมภายใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
สภาวิชาการที่สถาบันกลาง (อุณหภูมิต้องประมาณ 2-3 นาที) ซึ่งต่างจากส่วนแข็งที่มีพื้นฐานจากตัว
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายสายโซ่ 1,4-บิวเทนไดออลและไดโอะไซไซยานาตชนิด MDI โดยที่คู่ระหว่าง 1,4 บิวเทนไดออลและไดโอะไซไซยานาต HDI ให้ความยืดหยุ่นแก่โดเมนที่แข็ง ซึ่งส่งเสริมอัตราและขอบเขตของการแยกไมโครเฟส และอาจลดพฤติกรรมการเสีรูปของพลาสติกของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ การใช้อะลิฟาติกไดโอะไซไซยานาต เช่น HDI ยังช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนและความไม่เสถียรของแสงที่มักเกี่ยวข้องกับโดเมนที่แข็งของอะโรมาติก นอกจากนี้ความเป็นผลึกที่สูงใน HDI ยังช่วยลดความไวต่อการถูกไฮโดรไลซิส

ระดับของการแยกเฟสหรือการสร้างโดเมนของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ยังได้รับอิทธิพลอย่างมากจากความสมมาตรของไดโอะไซไซยานาตและการเลือกตัวขยายสายโซ่ ซึ่งมีอิทธิพลต่อระดับของอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่แข็ง ซึ่งไดโอะไซไซยานาตและตัวขยายสายโซ่ที่มีโครงสร้างที่สมมาตรมากขึ้นจะเพิ่มการก่อตัวของโครงสร้างที่มีการจัดระเบียบ ซึ่งนำไปสู่การแยกเฟสที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อะโรมาติกหรืออะลิฟาติกไดโอะไซไซยานาตมีผลอย่างมากต่อสมบัติของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ โครงสร้างที่แข็งของอะโรมาติกโดยทั่วไปมักจะผลิตอีลาสโตเมอร์ที่มีความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสสูง และเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน อย่างไรก็ตาม หน่วยอะโรมาติกจะไวต่อการถูกทำลายโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพและเป็นสีเหลืองโดยไม่ต้องใช้สารเพิ่มความคงตัว

2.2.4 แมคโครไดออล (Macrodiols)

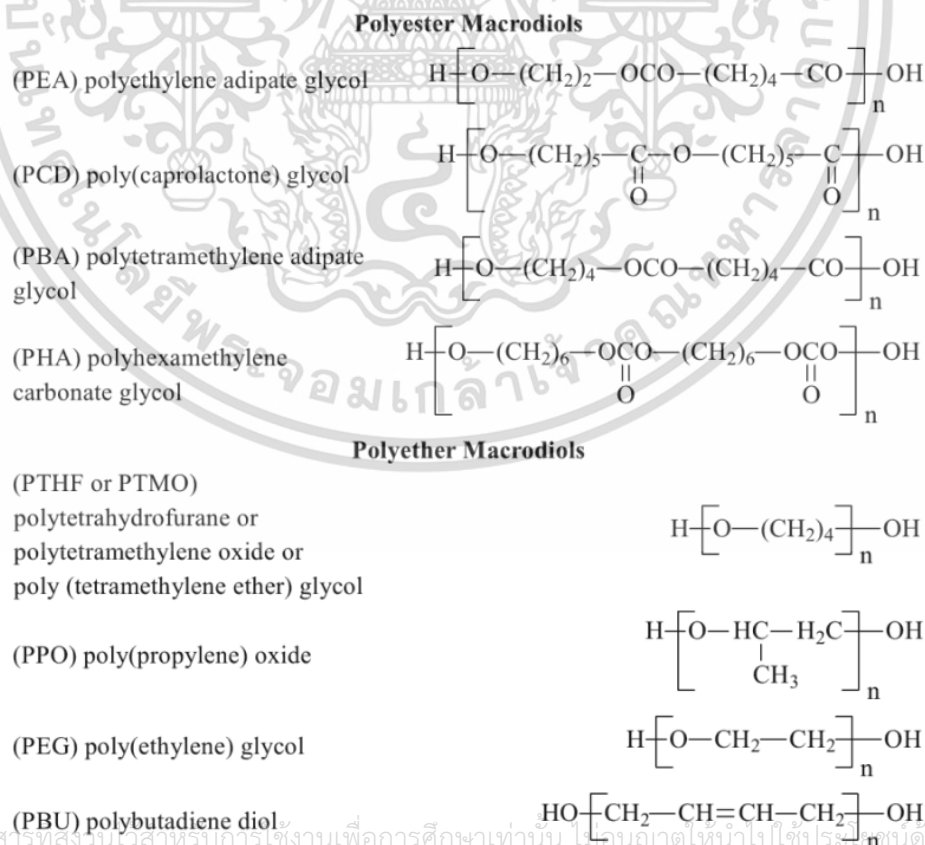
ไดออลสายยาวหรือแมคโครไดออล ซึ่งสร้างส่วนนี้ โดยทั่วไปคือพอลิเอสเทอร์หรือพอลิเอเทอร์ไดออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 500 ถึง 5,000 แม้ว่าในทางปฏิบัติน้ำหนักโมเลกุลจะถูกใช้ในช่วง 1,000 ถึง 2,000 เป็นหลัก

พอลิออลเกิดขึ้นจากการเติมโพรพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide : PO) เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene oxide : EO) ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเบสลงบนตัวริเริ่มที่มีไฮดรอกซิลหรือเอมีน หรือเกิดโดยปฏิกิริยาพอลิเอสเทอริฟิเคชัน (Polyesterification) ของกรดไดแอซิด (Di-acid) เช่น กรดอะดิปิกกับไกลคอล เช่น เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) หรือ ไดโพรพิลีนไกลคอล (Dipropylene glycol) พอลิออลที่ถูกขยายด้วย PO หรือ EO จะได้พอลิเอเทอร์พอลิออล (Polyether polyols) ส่วนพอลิออลที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเอสเทอริฟิเคชัน จะได้เป็นพอลิเอสเทอร์พอลิออล (Polyester polyols) การเลือกตัวขยายและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิออลมีผลอย่างมากต่อสถานะทางกายภาพและสมบัติของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ คุณสมบัติที่สำคัญของพอลิออลคือน้ำหนักโมเลกุลเปอร์เซ็นต์ของหมู่ไฮดรอกซิลปฏิกิริยา การทำงาน และความหนืด

พอลิออลในส่วนนี้ประกอบด้วย พอลิเอเทอร์ พอลิเอสเทอร์ และพอลิแอลคิลไกลคอล ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) ในช่วง -70 °C ถึง -30 °C แมคโครไดออลที่ใช้กันโดยทั่วไปในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ ได้แก่ พอลิแอลคิลไดออล เช่น พอลิไอโซบิวทิลีนไดออล (Polyisobutylene dioL), โพลิบิวตะไดอีน (Polybutadiene : PBU), หรือโอลิโก-บิวตะไดอีนไดออล (Oligo-butadiene diols) เช่นเดียวกับพอลิบิวตะไดอีนไดออล

ที่เติมไฮโดรเจนของพอลิবিวตะไดอิน ส่วนแมคโครไดโอลชนิดพอลิอีเทอร์ไดโอล ได้แก่ พอลิเตตระไฮโดรฟูแรน (Polytetrahydrofuran : PTHF or PTMO), พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol : PEG or PEO), พอลิโพรพิลีนออกไซด์ (Polypropylene oxide : PPO) หรือบล็อกผสมของ PEO-PPO-PEO และ PPO-THF พอลิเอสเทอร์พอลิโอล ได้แก่ พอลิเอทิลีนอะดิเปต (Polyethyleneadipate : PEA), พอลิবিวทิลีนอะดิเปต (Poly(butyleneadipate) : PBA) และในปัจจุบันจะใช้เป็นพอลิคาโพรแลกโตนไดโอล (Polycaprolactonediol : PCL or PCD), พอลิแอลคิลคาร์บอนเตพอลิโอล (Polyalkylcarbonate polyol) หรือบล็อกผสม เช่น พอลิคาร์บอนเตโคเอสเทอร์ไดโอล (Poly(carbonate-co-ester)diol), พอลิเฮกซะเมทิลีนคาร์บอนเตไดโอล (Poly(hexamethylene-carbonate)diol) เช่นเดียวกับ พอลิเฮกซะเมทิลีน-คาร์บอนเต-โค-คาโพรแลกโตนไดโอล (Poly(hexamethylene-carbonate-co-caprolactone)diol) และการผสมของบล็อกโคพอลิเมอร์ของบล็อกพอลิอีเทอร์และพอลิเอสเทอร์ เช่น PCL-b-PTHF-b-PCL ตัวอย่างของแมคโครไดโอลเหล่านี้ แสดงไว้ในรูปที่ 2.9

พันธะอีเทอร์ (C-O) ในพอลิอีเทอร์ของส่วนนี้ และพันธะเอสเทอร์ (CO-O) ในพอลิเอสเทอร์สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับส่วนเชื่อมของยูรีเทน (NH-CO) ที่อยู่ในโดเมนแข็ง การสร้างพันธะไฮโดรเจนนี้จะส่งผลต่อระดับของการแยกไมโครเฟส โดยที่พอลิเอสเทอร์มักเป็นตัวรับพันธะไฮโดรเจนที่เกิดความแข็งแรงกว่าพอลิอีเทอร์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นผลึกหรือความสม่ำเสมอของส่วนนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างแมโครไดออลที่ใช้กันทั่วไปในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ [22]

ระดับของการแยกเฟสได้รับอิทธิพลอย่างมากจากประเภทของส่วนนิ่มหรือแมโครไดออล พอลิเอสเทอร์พอลิออลแตกต่างจากพอลิอีเทอร์พอลิออลเนื่องจากไม่มีหมู่ปลายที่ไม่ทำปฏิกิริยา ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่มาจากพอลิเอสเทอร์พอลิออล การที่ขั้วสูงชันของหมู่เอสเทอร์คาร์บอนิลทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงขึ้นระหว่างส่วนนิ่มและส่วนแข็ง ดังนั้นพอลิเอสเทอร์พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ จึงเป็นวัสดุที่มีความร้อนและความแข็งแรงสูงกว่าพอลิอีเทอร์พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ รวมถึงมีความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ตัวทำละลาย และการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่า ส่วนพอลิอีเทอร์พอลิออลจะให้ความยืดหยุ่นที่สูงกว่า รวมถึงทนทานต่อการถูกไฮโดรไลซิสที่ดี

พอลิอีเทอร์มักจะมียุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าและมีแรงระหว่างสายโซ่ที่อ่อนแอกว่าพอลิเอสเทอร์ ซึ่งจะช่วยให้พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์มีสมบัติเชิงกลที่ลดลง สาเหตุเกิดจากการมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างพันธะของ NH กับ หมู่เอสเทอร์คาร์บอนิล (Ester carbonyl group) มากกว่าพันธะระหว่างยูรีเทน NH อีเทอร์ออกซิเจน (Ether oxygen) พอลิอีเทอร์ที่ใช้สังเคราะห์พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุดคือ PTMO ซึ่งจะให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างสายโซ่และความสามารถในการตกผลึกเมื่อมีการดึงยึด

พอลิเอสเทอร์พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ มีสมบัติของวัสดุที่ดี แต่มีความอ่อนไหวต่อการแตกขาดด้วยไฮโดรไลติกที่ตำแหน่งของการเชื่อมโยงของเอสเทอร์ ในขณะที่ยูรีเทนที่มีพอลิอีเทอร์จะมีความต้านทานต่อการฉีกขาดของสายโซ่จากการไฮโดรไลซิสค่อนข้างสูง

2.2.5 ตัวขยายสายโซ่ (Chain extenders)

ตัวขยายสายโซ่ทั่วไปคือ มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 400 g/mol เป็นสารตัวกลางที่มี 2 หมู่ฟังก์ชัน ออกแบบมาเพื่อทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮโซไซยานาตให้กลายเป็นส่วนหนึ่งของส่วนแข็งของสายโซ่ ซึ่งจะทำให้ยูรีเทนหรือยูเรียที่ได้มีความเป็นระเบียบและมีขั้วที่สูง นำไปสู่การจัดเรียงตัวและอาจเกิดการตกผลึก

ตัวขยายสายโซ่มีบทบาทสำคัญอย่างมาก หากไม่มีตัวขยายสายโซ่ พอลิยูรีเทนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาโดยตรงของไดไอโซไซยานาตกับพอลิออลมักจะมีสมบัติทางกายภาพที่ไม่ดี และไม่เกิดการแยกของไมโครเฟส การเพิ่มตัวขยายสายโซ่จะทำให้เกิดความยาวของส่วนแข็งที่เพิ่มขึ้น เพื่อเกิดการแยกของส่วนแข็ง ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น การเพิ่มขึ้นของมอดูลัส และการเพิ่มของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์

ตัวขยายสายโซ่ของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ อะโรมาติกไดออล (Aromatic diols) และอะโรมาติกไดเอมีน (Aromatic diamines) ตัวขยายสายโซ่อีกชนิดคือ อะลิฟาติกไดออล (Aliphatic diols) และอะลิฟาติกไดเอมีน (Aliphatic diamines) พอลิยูรีเทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อน เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อน ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

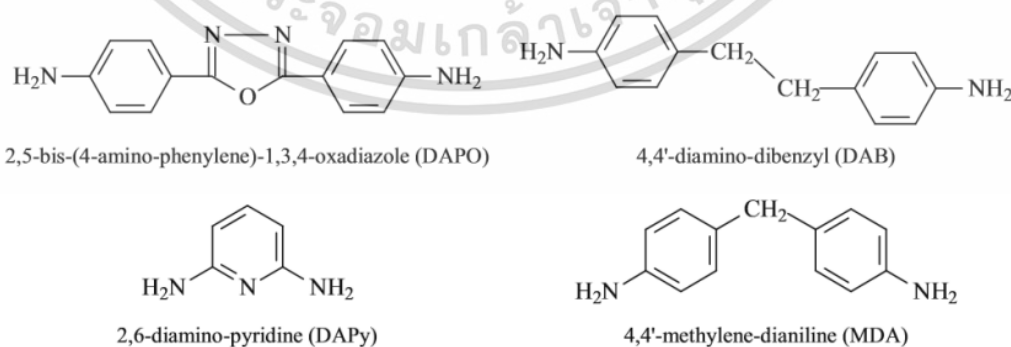
อีลาสโตเมอร์โดยทั่วไปที่มีตัวขยายสายโซ่เป็นอะลิฟาติกไดออลจะได้วัสดุที่มีความนิ่มกว่าอะโรมาติกไดออล นอกจากนี้ ตัวขยายสายโซ่ไดเอมีนจะว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าตัวขยายสายโซ่ไดออล และให้สมบัติที่เหนียวกว่า เนื่องมาจากส่วนแข็ง (การเชื่อมโยงยูเรีย) จะมีความหนาแน่นของพันธะไฮโดรเจนสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงขึ้นและความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตามยูเรียพอลิยูรีเทนที่เกิดจากตัวขยายสายโซ่ไดเอมีนมักจะละลายได้น้อยในตัวทำละลายทั่วไป ดังนั้นกระบวนการหลอมละลายจึงทำได้ยากกว่า นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron delocalization) ในตัวขยายสายโซ่อะโรมาติกจะทำให้ตัวขยายสายโซ่ชนิดนี้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาดังตัวขยายสายโซ่อะลิฟาติก ซึ่งต้องทำในปฏิกิริยาที่มีการควบคุมอย่างสูง

ตัวอย่างของตัวขยายสายโซ่ไดออล ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ได้แก่ 1,6-เฮกเซนไดออล (1,6-hexanediol : HG), เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol : EG), 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol : BDO, BD or BG), ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol : DEG), ไดอะเซทิลีนไดออล (Diacetylene diols) เช่น 2,4-hexadiyne-1,6-diol หรืออะโรมาติกไดออลบางชนิด เช่น 4,4'-(ethane-1,2-diyl)bis(benzenethiohexanol) [27-29]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของตัวขยายสายโซ่ไดออล [22]

(EG) (ethylene glycol)	$\text{HO}-(\text{CH}_2)_2-\text{OH}$
(BG or BDO) (butylene glycol)	$\text{HO}-(\text{CH}_2)_4-\text{OH}$
(DEG) (diethylene glycol)	$\text{HO}-(\text{CH}_2)_2-\text{O}-(\text{CH}_2)_2-\text{O}$

ตัวอย่างของตัวขยายสายโซ่ไดเอมีน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ได้แก่ 2,5-bis-(4-amino-phenylene-1,3,4-oxadiazole) (DAPO), 4,4'-diamino-dibenzyl (DAB), 2,6-diaminopyridine (DAPy) หรือ 4,4'-methylene-dianiline (MDA) [27-29]



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของตัวขยายสายโซ่ไดเอมีน [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของตัวขยายสายโซ่มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพเชิงกลของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างพอลิออลและตัวขยายสายโซ่ของพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากวัสดุที่แข็งเปราะไปเป็นยางอีลาสโตเมอร์ เป็นผลมาจากการแปรผันของความเข้มข้นของส่วนแข็ง

2.3 ปัญหาของกระบวนการผลิตพอลิยูรีเทน

ข้อบกพร่องที่พบเมื่อพอลิยูรีเทนผ่านกระบวนการผลิต มักมีปัญหที่เกิดขึ้นหนึ่งอย่างหรืออาจมากกว่านั้นต้องมีการตรวจสอบอย่างสมบูรณ์ ปัญหาที่เกิดขึ้นเกิดจากอากาศอาจมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลต่ออุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point) ซึ่งทำให้ความชื้นเกิดการควบแน่นบนตัวเสริมแรง หรืออีกสาเหตุอาจเกิดจากอุณหภูมิในกระบวนการผลิตที่ต่ำเกินไป ซึ่งสาเหตุเหล่านี้อาจทำให้เกิดข้อบกพร่องของตัวชิ้นงานสุดท้ายมากกว่า 1 อย่าง

2.3.1 ปัญหาโดยทั่วไปของการผลิตพอลิยูรีเทน

2.3.1.1 การสร้างช่องอากาศ

แม่พิมพ์ต้องได้รับการออกแบบเพื่อให้เกิดการหล่อเต็มแม่พิมพ์ ต้องมีช่องว่างของการระบายอากาศที่เหมาะสมเพื่อให้อากาศหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างอิสระและไม่ติดอยู่ในมุมใด ๆ

2.3.1.2 สิ่งปนเปื้อน

ความชื้นในวัตถุดิบหรือพรีพอลิเมอร์ก่อให้เกิดกลุ่มฟองอากาศที่ละเอียดมาก ไดออลมีแนวโน้มในการดูดซับความชื้นได้ดี การป้องกันความชื้นเหล่านี้ทำได้โดยจะต้องให้วัสดุอยู่ภายใต้ไนโตรเจนแห้งตลอดเวลา หากความชื้นถูกกำจัดที่อุณหภูมิสูงอย่างเหมาะสมจะทำให้ฟองอากาศลดลงอย่างมาก

2.3.1.3 การปลดปล่อยแม่พิมพ์

แม่พิมพ์ทั้งหมดต้องถูกปลดปล่อยด้วยสารปลดปล่อยแม่พิมพ์ที่เหมาะสม สารเหล่านี้ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม หากใส่ในปริมาณที่มากเกินไปบางส่วนอาจถูกล้างระหว่างการเท และทำให้เกิดข้อบกพร่องในพอลิยูรีเทน ถ้าใส่ในปริมาณที่น้อยเกินไปหรือไม่มีเลยจะทำให้ชิ้นส่วนแทบไม่สามารถถอดออกจากแม่พิมพ์ได้ หลังจากการขึ้นรูปหลายครั้งอาจมีการสะสมของสารปลดปล่อยอยู่ อาจไม่ต้องใช้สารเพิ่มสำหรับการขึ้นรูปทุกครั้ง

2.3.1.4 การคายความร้อนที่สูง

อุณหภูมิในการผสมที่สูงเกินไปจะมีผลสำคัญ 2 ประการคือ เกิดการคายความร้อนที่สูงเกินไปและเวลาสำหรับการฉีดขึ้นรูปจะสั้นเกินไป ซึ่งการคายความร้อนหรืออุณหภูมิในกระบวนการผลิตสูงเกินไปจะทำให้เกิดการหดตัวสูง อาจพบช่องว่างหรือรอยร้าวเล็ก ๆ ภายในชิ้นส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.5 การเชื่อมขวาง (Cure) ที่ไม่เพียงพอ

ชิ้นส่วนที่ขึ้นรูปแล้วสามารถถอดออกจากแม่พิมพ์ได้ทันทีที่มีความแข็งแรงเพียงพอไม่ให้เกิดหักจากการขึ้นรูป วัสดุควรผ่านการอบที่อุณหภูมิที่กำหนดปกติ 100 องศาเซลเซียส หากไม่ดำเนินการจะทำให้สมบัติทางกายภาพไม่สูงเท่าที่ควร

2.3.1.6 ระดับ NCO ต่ำ

โดยปกติผู้ผลิตพรีพอลิเมอร์จะกำหนดระดับ NCO แต่ค่าอาจลดลงได้หากวัสดุไม่เสถียรหรือหากเก็บไว้เป็นเวลานานที่อุณหภูมิสูง ผลที่ตามมาอาจทำให้ค่าความหนืดต่ำ ความต้านทานการฉีกขาดต่ำ หรือค่าความต้านทานแรงดึงต่ำ

2.3.1.7 การผสมที่ไม่ดี

การผสมของวัตถุดิบที่ไม่ถูกต้อง ส่งผลให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ส่งผลต่อความแข็งต่ำ สมบัติทางกล รวมถึงความเค้นภายใน (Internal stress) ในส่วนประกอบ

2.3.1.8 อัตราส่วนที่ไม่ถูกต้อง

ส่วนผสมที่อัตราส่วนผิดอาจเป็นผลมาจากระดับ NCO ในพรีพอลิเมอร์ต่ำเกินไป หากเก็บพรีพอลิเมอร์ไว้ที่อุณหภูมิสูงเกินไปเป็นระยะเวลาที่นาน ที่ปลายสายโซ่ของไอโซไซยาเนตจะทำปฏิกิริยากับตัวมันเองเพื่อสร้างสายโซ่หลายฟังก์ชัน ส่งผลให้ค่า NCO ในไอโซไซยาเนตมีค่าต่ำลง

2.3.1.9 อัตราส่วน

วัสดุที่มีอัตราส่วนที่ผิด อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุนอกเหนือจาก NCO ต่ำดังที่กล่าวในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งอาจรวมไปถึงการชั่งน้ำหนักหรือการคำนวณน้ำหนักในการใส่เพิ่มที่ไม่ถูกต้อง

2.3.1.10 อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม

เมื่ออุณหภูมิของส่วนผสมสูงเกินไปปฏิกิริยาจะเกิดเร็วขึ้น ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไม่สามารถเลี้ยงได้เนื่องจากค่าการนำความร้อนของพอลิยูรีเทนต่ำ รวมถึงส่งผลต่อความหนืดเริ่มต้นของส่วนผสมที่ต่ำลง และหากอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้ความหนืดของพรีพอลิเมอร์มีมาก ส่งผลให้การผสมทำได้ยากขึ้นโดยที่พรีพอลิเมอร์ที่ผสมจะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ยาก และมีแนวโน้มที่จะตกอากาศกับพื้นผิวของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ไม่ตรงกันกับพรีพอลิเมอร์และการคายความร้อนสูงสุดอาจทำให้เกิดการหดตัวได้ในแม่พิมพ์ปิด แรงดันภายในอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

2.3.2 ปัจจัยที่สำคัญในการลดปัญหา

1. วัตถุดิบทั้งหมดต้องเก็บให้แห้ง
2. เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดมีความเหมาะสม ทั้งขนาด และอุปกรณ์วัดและควบคุมอุณหภูมิ
3. การไหลของไนโตรเจน
4. ความสะอาดของแม่พิมพ์ และห้องทำงาน
5. การใช้วัสดุที่เหมาะสมกับงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การหล่อพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ด้วยมือ

นอกเหนือจากการขึ้นรูปแบบการฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (Reaction Injection Molding, RIM) ยังสามารถขึ้นรูปแบบหล่อได้ โดยพอลิยูรีเทนที่หล่อได้นั้นถูกทำให้เป็นพรีพอลิเมอร์โดยมีหมู่ไอโซไซยาเนตที่ส่วนปลายแอกทีฟกับสายโซ่พรีพอลิเมอร์ หมู่ไอโซไซยาเนตเหล่านี้ทำปฏิกิริยากับไดเอมีนหรือไดออล หรือสามารถเตรียมเป็นควอซีพรีพอลิเมอร์ (Quasiprepolymer) โดยการทำให้พรีพอลิเมอร์และขยายสายโซ่ในเวลาเดียวกัน เมื่อสายโซ่ยาวขึ้นความหนืดก็จะเพิ่มขึ้น และเมื่อถึงจุดหนึ่งพรีพอลิเมอร์ที่เป็นของเหลวจะกลายเป็นของแข็ง เมื่อให้ความร้อนเพิ่มเติมพันธะเคมีทางกายภาพ (พันธะไฮโดรเจน) จะสร้างความแข็งแรงเพิ่มเติมในพอลิยูรีเทนที่หล่อได้ สายโซ่จริงจะสลายเมื่อได้รับความร้อนก่อนที่พันธะเคมีทางกายภาพจะหลุดออกไป ดังนั้นจึงไม่สามารถเปลี่ยนรูปวัสดุได้หลังจากขยายสายโซ่เสร็จแล้ว

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ ก่อน ระหว่าง และหลังการบ่ม

กระบวนการบ่มพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับระดับของพอลิยูรีเทนที่มีความหนืดต่ำพอสมควรในขั้นต้น เพื่อให้พอลิยูรีเทนไหลเข้าสู่แม่พิมพ์และช่วยให้อากาศที่ติดอยู่ลอยขึ้นสู่พื้นผิวได้ เมื่อเติมเข้าสู่แม่พิมพ์และปล่อยให้อากาศระบายออกแล้ว ควรเพิ่มความหนืดอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันการรั่วไหลที่มากเกินไปผ่านเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting lines)

ความร้อนมีส่วนสำคัญในการบ่มพอลิยูรีเทน โดยตัวปฏิกิริยาเองจะปล่อยความร้อนออกมา ดังนั้นจึงต้องกำหนดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ โดยแม่พิมพ์ควรอยู่ที่อุณหภูมิสูงสุดที่พรีพอลิเมอร์จะบ่มถึงระบบที่ใช้ MDI จะปล่อยความร้อนได้เร็วกว่าระบบที่ใช้ TDI ดังนั้นแม่พิมพ์จึงต้องร้อนกว่าเมื่อใช้พรีพอลิเมอร์ที่เป็น TDI

นอกจากนี้ยังต้องสังเกตว่ามีการหดตัวเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง ยิ่งพอลิยูรีเทนแข็งตัวเต็มที่มากเท่าไร การหดตัวขั้นสุดท้ายก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ในระหว่างกระบวนการบ่มพอลิยูรีเทน จะเพิ่มความแข็งแรงในระดับหนึ่ง หลังจากผ่านไปหลายชั่วโมงพอลิยูรีเทนจะมีความแข็งแรงมากพอที่จะนำออกจากแม่พิมพ์ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย แต่ยังไม่ได้สมบัติทางกลที่สมบูรณ์ จำเป็นต้องให้ความร้อนเพิ่มเติมกับวัสดุที่อุณหภูมิ 80 ถึง 100 °C เป็นเวลา 16 ถึง 24 ชั่วโมงเพื่อให้ได้สมบัติทั้งหมดอย่างเต็มที่ และควรพักพอลิยูรีเทนไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ถึง 2 สัปดาห์เพื่อให้ได้สมบัติสูงสุดเพื่อพอลิยูรีเทนจะค่อย ๆ ดูดซับน้ำจากอากาศ ซึ่งจะช่วยในการสร้างพันธะที่แข็งแรงมากขึ้น

2.4.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูป

ความแตกต่างระหว่างข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการผลิตแบบกลุ่ม (Batch process) และการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 เครื่องผลิตแบบต่อเนื่องช่วยให้สามารถจ่ายชิ้นงานขนาดเล็กจำนวนมากได้ โดยสามารถหยุดการผลิตเป็นช่วงสั้น ๆ ระหว่างแต่ละเอกสารนี้ แม่พิมพ์ ปริมาณการไหลสูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดของถังป้อน นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการผลิตแบบกลุ่มและการผลิตแบบต่อเนื่อง [30]

การผลิตแบบกลุ่ม	การผลิตแบบต่อเนื่อง
ต้นทุนต่ำ	ราคาเครื่อง 40,000 ดอลลาร์สหรัฐ ขึ้นไป
สามารถเปลี่ยนระดับได้อย่างรวดเร็ว	เหมาะสำหรับการเดินเครื่องระยะยาว
การปรับเปลี่ยนเล็กน้อยต่อชุดง่าย	ถ้าเครื่องทำงานได้ดี คุณภาพจะสม่ำเสมอ
งานขนาดใหญ่ต้องใช้หลายชุด	เทต่อเนื่อง (ภายใต้ข้อจำกัดของเครื่อง)
กระบวนการด้วยตนเอง	กระบวนการสามารถทำงานได้อัตโนมัติ
ผู้ปฏิบัติงานสัมผัสกับสารเคมีมากขึ้น	สามารถเสร็จได้ด้วยตัวเองแบบสมบูรณ์

การหล่อพอลิยูรีเทนด้วยมือมีอยู่ 7 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่

1. การเตรียมแม่พิมพ์และการถอดแม่พิมพ์
2. ถ้าจำเป็นให้อุ่นพรีพอลิเมอร์และไล่แก๊สก่อน
3. การเพิ่มเม็ดสีและสารเติมแต่งอื่น ๆ ลงในพรีพอลิเมอร์
4. การเตรียมการปรม
5. ผสมพรีพอลิเมอร์และสารช่วยปรมเข้าด้วยกัน
6. เทลงแม่พิมพ์เพื่อที่จะเริ่มต้นการปรม
7. ตัดแต่งชิ้นงานและปรมในแม่พิมพ์ให้สมบูรณ์

2.4.2.1 เตรียมแม่พิมพ์

ต้องตรวจสอบความเสียหายของแม่พิมพ์ก่อนใช้งานและอุ่นให้เท่ากับอุณหภูมิสูงสุดที่การคายความร้อนจะไปถึงเมื่อพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ทำปฏิกิริยากัน หากจำเป็นจะมีการเคลือบน้ำยาถอดแบบบาง ๆ บนแม่พิมพ์เพื่อช่วยในกระบวนการถอดแบบ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแม่พิมพ์ต้องสอดคล้องกับการหดตัวของพอลิยูรีเทนหล่อ (ปกติ 1.0 ถึง 1.5%) พอลิยูรีเทนจะดูดซับความชื้นที่มีความชื้นสูงและจะขยายตัวที่อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient temperature) และความชื้น 100% การขยายตัวอาจอยู่ที่ +0.6%

2.4.2.2 อุ่นพรีพอลิเมอร์และไล่แก๊ส

พรีพอลิเมอร์ต้องถูกละลายเพื่อให้ของแข็งทั้งหมดกลายเป็นของเหลว (บางครั้งจะเห็นก้อนพรีพอลิเมอร์ที่ยังไม่ละลายอยู่ตรงกลางถึง) ต้องจำไว้ว่าความร้อนที่มากเกินไปอาจทำให้พรีพอลิเมอร์เสื่อมสภาพอย่างถาวรได้ เมื่อพรีพอลิเมอร์ที่อยู่ในถังที่นำไปละลายแล้ว สามารถรักษาให้อยู่ในสภาพนั้นได้โดยเก็บไว้ในที่อุ่นในโรงงาน สามารถชั่งน้ำหนักพรีพอลิเมอร์และอุ่นในไมโครเวฟหรือเตาอบทั่วไปให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ ควรไล่แก๊สออกภายใต้สุญญากาศสูงก่อนใช้งาน สิ่งนี้จะช่วยกำจัด

แก๊สและความชื้นในวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไล่แก๊สด้วยสุญญากาศควรทำสองรอบ รอบแรกคือพรีพอลิเมอร์ที่ได้มาจากผู้ผลิต รอบที่สองคือหลังจากผสมพรีพอลิเมอร์กับส่วนผสมทั้งหมด (สารช่วยบ่ม เม็ดสี ตัวขยายสายโซ่ และ สารตัวเติม) ปริมาตรของพรีพอลิเมอร์ในภาชนะผสมควรอยู่ที่ประมาณ 25 ถึง 30% ของปริมาตร ทั้งหมด ความหนืดของพอลิยูรีเทนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดที่ต่ำและการลดจุดเดือด ของพอลิยูรีเทนภายใต้สุญญากาศจะช่วยให้สารระเหยหลุดออกได้ง่ายขึ้น อาจใช้สารลดฟองชนิด ซิลิโคน หรืออาจใช้ตัวทำละลายเช่น MEK การทำสุญญากาศเพื่อไล่แก๊สควรดำเนินต่อไปจนกว่าฟอง จะหมด อาจจะมีฟองอากาศเล็ก ๆ ปรากฏขึ้นในพอลิเมอร์ และแก๊สที่ไหลเข้ามาควรจะแห้ง โดยปกติ จะใช้เวลาประมาณ 5 ถึง 10 นาทีที่สุญญากาศ 250 ถึง 280 ปาสกาล เวลาที่แน่นอนจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณ อุณหภูมิ คุณภาพ ระดับของสุญญากาศ และรูปร่างของภาชนะที่ใช้

2.4.2.3 เพิ่มเม็ดสีและสารเติมแต่งอื่น ๆ

หากต้องการสามารถเพิ่มเม็ดสีและสารเติมแต่งอื่น ๆ ควรทำให้กระจายตัวก่อนใช้ สาร ช่วยกระจายตัวโดยปกติจะเป็นพลาสติกไซเซเซอร์ (Plasticizers) ที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารที่ใช้ในการหล่อ ซึ่งมีทั้งแบบแห้งและแบบไม่ดูดความชื้น พลาสติกไซเซเซอร์ที่นิยมใช้มีอยู่สองกลุ่มหลัก เช่น กลุ่มเอสเทอร์ และกลุ่มไดออล ปริมาณของเม็ดสีที่ใช้ควรให้น้อยที่สุด โดยปกติจะอยู่ในช่วง 0.25 มากที่สุด 5%

2.4.2.4 เตรียมการบ่ม (Curative)

สารช่วยบ่มถูกใช้เพื่อขยายสายโซ่พรีพอลิเมอร์ไม่ว่าจะโดยการขยายตัวหรือโดยการเชื่อมขวาง สามารถเป็นของแข็งหรือของเหลวที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปพอลิยูรีเทน (Processing temperature) สารช่วยบ่มที่เป็นของแข็งเช่น MOCA หรือ MCEDA โดยปกติจะละลายภายใต้สภาวะควบคุมก่อน นำไปใช้งาน MOCA หากได้รับความร้อนถึง 140 °C จะเริ่มสลายตัวและปล่อยควันอันตรายออกมา

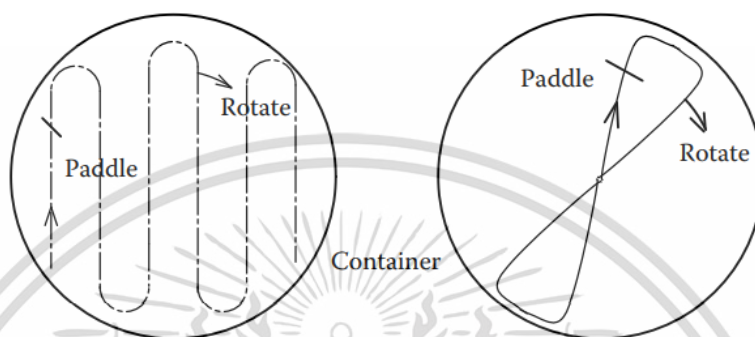
สารช่วยบ่มที่เป็นของแข็งอาจละลายในตัวทำละลายที่เป็นของเหลวเพื่อลดการจัดการ กับสารหลอมเหลวที่ร้อน ซึ่งตัวทำละลายอาจเป็นพลาสติกไซเซเซอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ใช้ เช่น พทาเลท (Phthalate) (เช่น Diisooctyl phthalate : DIOP) หรือเอสเทอร์ เช่น เบนโซเอต (Benzoate) (เช่น Benzoflex 9-88) สิ่งเหล่านี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นมึนลง แต่ไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยา ใด ๆ หากใช้ไดออลหรือไตรออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มันจะมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการบ่ม ส่งผลให้ ความแข็งแรงและสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไป

สารช่วยบ่มที่เป็นของเหลวบางครั้งจะดูดความชื้นได้มากและต้องระมัดระวังอย่างมาก เพื่อป้องกันการดูดซับความชื้นในอากาศ ต้องแทนที่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนแห้งและเก็บสารไว้ ภายใต้ความดันไนโตรเจนที่เป็นบวกเล็กน้อย

2.4.2.5 ผสมพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่

เมื่อผสมด้วยมือเครื่องกวนที่ใช้ควรทำจากวัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ วิธีการ ผสมควรเป็นแบบที่มีอากาศติดอยู่ในส่วนผสมน้อยที่สุด การกวนผสมสามารถกวนเป็นรูปแบบใดก็ได้ ไม่่ว่าการ トラบใดที่สารสามารถผสมได้อย่างสมบูรณ์ รูปแบบการผสมโดยหลัก ๆ แล้วใช้อยู่สองรูปแบบคือการ

กวนเป็นเลขแปดหรือการกวนแบบซิกแซกในภาชนะ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ต้องชูด้านข้าง ด้านล่าง และมุมของภาชนะเพื่อช่วยขจัดฟรีพอลิเมอร์ออกจากผนังและก้นภาชนะ หากใช้พลังงานในการผสมกับการผลิตแบบกลุ่มขนาดใหญ่หัวผสมต้องแช่อยู่พอลิเมอร์ที่กำลังผสมเสมอและปรับความเร็วเพื่อป้องกันการรวมตัวของอากาศส่วนเกิน หากมีอากาศเข้าไปในส่วนผสมและมีเวลาเพียงพออาจไล่แก๊สออกอีกครั้ง และควรต้องปรับเทคนิคการผสมเพื่อเพิ่มปริมาณอากาศให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้



รูปที่ 2.11 รูปแบบการผสม [30]

เวลาที่ใช้ในการผสมอาจแตกต่างกันไป ตั้งแต่อย่างน้อยกว่า 30 วินาที จนถึง 4-5 นาที เมื่อฟรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ผสมกันแล้ว ปฏิกริยาเคมีจะเริ่มขึ้นทันที ในการทำพอลิยูรีเทนที่แข็งแรงมาก เวลาที่ใช้ในการผสมจะสั้นมาก หลังจากผสมแล้ว ต้องเทลงในแม่พิมพ์และปล่อยให้อากาศที่ติดอยู่ระบายออกได้

2.4.2.6 หล่อลงในแม่พิมพ์

เมื่อฟรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ผสมเข้าด้วยกันแล้ว ปฏิกริยาการขยายสายโซ่ (การบ่ม) จะเริ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการผสมจะต้องตรวจสอบอย่างระมัดระวัง โดยจะต้องเพียงพอที่จะให้การผสมเสร็จสมบูรณ์ แต่จะต้องมีอายุหม้อหรือระยะเวลาที่สามารถคงอยู่ในสถานะของเหลวในระหว่างการผสม (Pot life) เหลือเพียงพอเพื่อให้สามารถเทลงในแม่พิมพ์ได้ในขณะที่พอลิยูรีเทนต้องมีความหนืดต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ควรเทลงในแม่พิมพ์ให้เต็มก่อนที่พอลิยูรีเทนจะก่อตัวเป็นเจล ในช่วงที่พอลิยูรีเทนยังเป็นของเหลวอยู่ ฟองอากาศที่แทรกเข้ามาจะค่อย ๆ ลอยขึ้นสู่พื้นผิว พอลิยูรีเทนมักจะกักอากาศได้ง่ายมาก การเทควรทำให้พอลิยูรีเทนไหลลงแม่พิมพ์ได้อย่างต่อเนื่อง อาจเพิ่มความสูงในการเทช้า ๆ เพื่อปรับปรุงการไหลของวัสดุเข้าสู่แม่พิมพ์ ฟองอากาศด้านบนผิวหน้าอาจใช้เปลวไฟแก๊สอ่อน ๆ หรือปืนลมร้อนเพื่อให้ฟองอากาศแตก แต่ต้องใช้ความร้อนให้น้อยที่สุด เคลื่อนไหวอยู่เสมอ เพื่อไม่ให้พื้นผิวเกิดความเสียหาย

เมื่อพอลิยูรีเทนแข็งพอที่จะเคลื่อนย้ายแม่พิมพ์แล้ว ควรวางวัสดุนั้นไว้ในเตาอบที่ร้อนถึงอุณหภูมิการบ่มเพื่อเริ่มต้นการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.7 ตัดแต่งชิ้นงานและบ่มในแม่พิมพ์ในเตาอบให้สมบูรณ์

หลังจากผสมส่วนผสมทั้งหมดแล้วปฏิกิริยาทางเคมีจะเริ่มขึ้น วัสดุจะมีความหนืดมากขึ้นและแข็งตัวในที่สุด แต่ยังไม่ได้สมบัติทางกายภาพที่สมบูรณ์ พอลิยูรีเทนที่ได้จะแตกหักได้ง่ายมาก ควรวางแม่พิมพ์ที่มีพอลิยูรีเทนในเตาอบที่ตั้งไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการหล่อ 5 ถึง 10 °C อุณหภูมิที่เหมาะสมคืออุณหภูมิสูงสุดที่ชิ้นงานจะขึ้นรูปได้ ซึ่งจะช่วยลดการหดตัวในแม่พิมพ์

พอลิยูรีเทนที่ได้จากการหล่อจะเก็บไว้ในเตาอบนานพอที่จะสร้างความแข็งแรงเพื่อที่จะถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือบิดเบี้ยว ในขั้นตอนนี้สามารถถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ แต่ต้องเอากลับเข้าไปอบเพื่อบ่มให้ครบตามระยะเวลาที่แนะนำ และต้องทิ้งพอลิยูรีเทนไว้ที่อุณหภูมิห้องอีก 1 ถึง 2 สัปดาห์เพื่อให้ได้สมบัติสูงสุด

การดำเนินการหลังการขึ้นรูป เช่น การทำความสะอาดในขั้นสุดท้าย การตัดแต่งให้ได้ขนาดที่ต้องการ สามารถตัดแต่งได้ทันทีหลังจากได้รับการบ่มเต็มที่แล้ว

2.5 การใช้ประโยชน์จากเศษยางพอลิยูรีเทน

2.5.1 การบดและนำมาใช้ใหม่

เป็นกระบวนการที่นำเศษพอลิยูรีเทนมาบดให้เป็นเม็ดเล็ก ๆ แล้วนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่

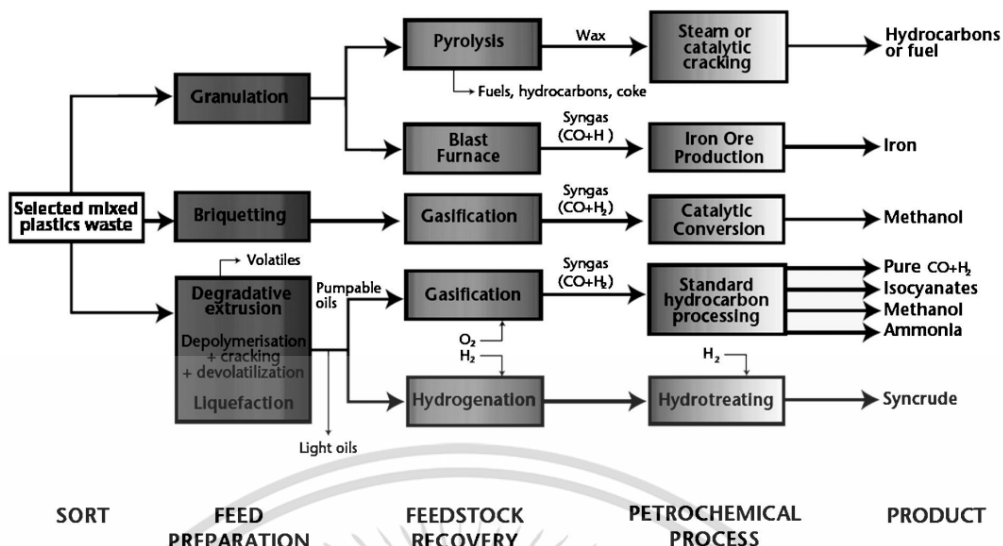
ขั้นตอนแรกที่สำคัญสำหรับการนำเศษพอลิยูรีเทนมาใช้ใหม่ คือการลดขนาดของเศษยางพอลิยูรีเทน ให้อยู่ในระดับที่สามารถนำไปแปรรูปใหม่ในขั้นตอนที่สองได้

ขั้นตอนที่สองอาจเป็นการนำพอลิยูรีเทนที่บดเป็นเม็ดขนาดเล็กมาผสมกับกาวแล้วทำการกดอัด หรือจะเป็นการนำพอลิยูรีเทนที่บดแล้วมาทำการอัดขึ้นรูป (Compression) ขั้นตอนการผสมพอลิยูรีเทนกับกาวเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็วที่สุดโดยการผสมเม็ดพอลิยูรีเทนที่ได้จากการบดมาผสมกับ MDI ที่อุณหภูมิ 100-200 °C และใช้แรงดัน 30-200 บาร์ ในการกดอัด ขั้นตอนการนำพอลิยูรีเทนที่ได้จากการบดมาทำการอัดขึ้นรูป ทำได้โดยนำมาขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 180 °C และใช้ความดัน 350 บาร์ เพื่อให้อนุภาคยางอัดรวมกันโดยไม่ใช้สารยึดเกาะ [32-37]

2.5.2 การไพโรไลซิส (Pyrolysis)

การไพโรไลซิสเป็นหนึ่งวิธีในการรีไซเคิลของเสียพอลิยูรีเทนโดยใช้สภาพแวดล้อมที่ปราศจากออกซิเจนและใช้ความร้อน เพื่อไพโรไลซิสพลาสติกให้เป็นก๊าซและส่วนผสมของโมโนเมอร์ที่เป็นประโยชน์ในอีกหลายอุตสาหกรรม ที่อุณหภูมิ 250 °C พอลิยูรีเทนจะเริ่มสูญเสียมวล ที่อุณหภูมิ 300 °C จะสูญเสียมวลไป 80% ส่วนอีก 20% ที่เหลือจะถูกย่อยสลายที่อุณหภูมิสูงถึง 500 °C [38-40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ผลิตภัณฑ์เคมีที่เป็นไปได้จากการรีไซเคิลวัสดุพลาสติกทางเทอร์โมเคมี [31]

2.5.3 การนำกลับมาใช้เป็นพลังงาน (Energy Recovery)

วิธีนี้จะเป็นการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นพลังงานโดยการนำเศษพอลิยูรีเทนไปเผา โดยพิจารณาจากบริบทของตัวเลือกการรีไซเคิลและการนำกลับมาใช้ใหม่ที่เพิ่มขึ้นสำหรับพลาสติก รวมถึงพอลิยูรีเทน เนื่องจาก 86% ของน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซเผาเป็นพลังงาน จึงมีความเป็นไปได้สูงสำหรับการทดแทนแหล่งพลังงานบางส่วนด้วยขยะพลาสติก ปัจจุบันเทคโนโลยีสมัยใหม่สามารถรับประกันได้ว่าการปล่อยมลพิษจากโรงงานเผาไหม้ของเสียจะได้รับการจัดการอย่างปลอดภัย เห็นได้ว่าวัสดุที่ประกอบด้วยลามิเนต พอลิยูรีเทน ไม้ หนัง หรือผ้า และวัสดุที่ทนไฟเป็นวัสดุที่นำมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิลยากมาก ดังนั้นการเผาเพื่อนำพลังงานกลับมาใช้ใหม่เป็นกุญแจสำคัญในการจัดการขยะพลาสติกอย่างเหมาะสมและคุ้มค่า [41-43]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hainian Wang และคณะ [43] ศึกษาเกี่ยวกับพื้นผิวถนนรูพรุนเป็นประเภทของผิวทางที่ใช้ประโยชน์จากเศษยางและในเวลาเดียวกันช่วยลดเสียงรบกวนจากการจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพที่ครอบคลุมของส่วนผสมของอนุภาคยางพอลิยูรีเทน (PRPM) ถูกเตรียมด้วยอนุภาคยางที่ต่างชนิดกัน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความครอบคลุมของประสิทธิภาพของ PRPM เช่น ประสิทธิภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ ประสิทธิภาพการต้านทานการลื่นไถลและอื่น ๆ อนุภาคยางและชนิดพอลิยูรีเทนที่แตกต่างกันทั้งสี่ชนิดถูกนำมาใช้เพื่อเตรียมส่วนผสมของอนุภาคยางพอลิยูรีเทน แม่พิมพ์รูปทรง Dog bone สำหรับออกแบบขึ้นรูปเอกสารนี้ตัวอย่างเองและขึ้นรูปตัวอย่างแบบแผ่นพื้น อุปกรณ์ถูกสร้างขึ้นจากตัวอย่างพื้น ใช้วิธีทดสอบที่ไม่ต่างกันเพื่อจัดการประเมินครอบคลุมประสิทธิภาพของส่วนผสม ผลการทดลองแสดงถึง PRPM มี

ความต้านทานการสึกกร่อนสูงและประสิทธิภาพการทำงานที่อุณหภูมิสูง ส่วนผสม F5 มีประสิทธิภาพต้านทานการเสื่อมสภาพและลดการเกิดเสียงได้ดีที่สุด การต้านทานการลื่นไถลของ PRPM ต่ำกว่าส่วนผสมของยางมะตอยทั่วไปเล็กน้อย แต่ยังพบได้ในความต้องการข้อกำหนดของถนน, PRPM มีการเชื่อมโยงระหว่างรูพรุนมากขึ้น จะพบว่ามีสมบัติการระบายน้ำที่ดีและคาดว่าจะลดเสียงรบกวนได้ PRPM F5 มีประสิทธิภาพที่ครอบคลุมมากกว่า ด้านการการลื่นไถลต่ำกว่าเล็กน้อยและได้ข้อสรุปว่า PRPM เป็นประเภทที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในอนาคต

R. Janardhan, K. Ramamurthy และ J. S. Anand [44] พอลิยูรีเทนถูกแยกส่วนและเศษส่วนที่แยกออกมานั้นมีลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกได้ด้วยวิธีการ Gel permeation chromatography (GPC) และค่าความหนืด ความหนืดที่แท้จริงของพอลิยูรีเทนในตัวทำละลาย ทั้ง 10 ชนิด แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแต่ละสารตามลำดับดังนี้ Mineral spirit < Acetone < Cyclohexane < Cyclohexanone < Xylene < Ethyl benzene < Toluene < Benzene < Methyl ethyl ketone < Tetrahydrofuran ความสัมพันธ์ของ Mark-Houwink แนะนำว่าตัวทำละลายผสม MEK : n-heptane (1:3) เป็นตัวทำละลายที่ไม่ดีมีค่าอยู่ที่ 0.52 และ tetrahydrofuran เป็นตัวทำละลายที่ดี มีค่าอยู่ที่ 0.78 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยถูกประมาณค่าโดยเทคนิคการคาดการณ์พื้นฐานของความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างค่าเฉลี่ยความหนืดของน้ำหนักโมเลกุลและค่าคงที่ของ Mark-Houwink น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยได้มาจากการศึกษาเรื่องความหนืดและถูกนำมาประเมินมุมที่ไม่ถูกรบกวนของสายโซ่

F.C. Aggenbacht [45] บทความนี้กล่าวถึงบทบาทของการหล่อขึ้นรูปแบบสูญญากาศในการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วและกระบวนการผลิตอย่างรวดเร็ว ความแม่นยำของส่วนประกอบที่สามารถทำซ้ำได้ โดยดูที่ปัจจัยที่ควบคุมได้ในกระบวนการหล่อขึ้นรูปและวัสดุประเภทต่างๆที่สามารถนำมาใช้งานได้ การตรวจสอบและดำเนินการ สามารถนำไปเปรียบเทียบการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วและราคาต้นทุนการผลิต การหล่อขึ้นรูปทำจากองค์ประกอบทั่ว ๆ ไปภายใต้สภาวะปฏิบัติการ และลักษณะการหล่อขึ้นรูปที่แตกต่างกัน วัดความแข็งแรง ความแข็งที่พื้นผิวเพื่อวางแผนกำหนดรูปแบบการดำเนินงานและความแม่นยำของกระบวนการ

Shan Cao, Shouhai Li และคณะ [46] ศึกษาเกี่ยวกับพันธะโควาเลนต์ที่ผันกลับได้โดยออกแบบพอลิยูรีเทนแบบเทอร์โมเซตระหว่างไอโซไซยาเนตกับโพรพิลไกลลิต (PG) เป็นพอลิฟีนอลแทนการใช้พอลิเออล และสังเคราะห์พอลิยูรีเทนเชื่อมขวางที่สามารถสมานตัวเองได้ภายใต้ความร้อน มีการตรวจสอบสมบัติเทอร์โมเซตและการรักษาตัวเองของพอลิยูรีเทน โดยการละลาย PG ใน PTHFT เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 100 °C ทำการเทลงในแม่พิมพ์และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง และทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการทดสอบการละลายของโครงสร้างพอลิยูรีเทนโดยการตีพอลิเมอเรชันที่อุณหภูมิประมาณ 120 °C ในสารละลาย DMA จะเห็นว่าพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิห้องจะดูดสารละลายเข้าไปได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 120 °C ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิจะส่งผลต่อการบวมตัวของพอลิเมอร์ด้วย พันธะยูรีเทนจะหลุดออกที่อุณหภูมิประมาณ 120 °C และปฏิกิริยาการผันกลับจะเกิดขึ้นในอุณหภูมินี้ และการผันกลับนี้ส่งผลให้พอลิยูรีเทนสามารถรักษาตัวเองได้ เทอร์โมเซตที่ผันกลับได้ที่ผ่านการได้รับความร้อนแล้วสามารถคงความต้านทานแรงดึงไว้ประมาณ 70% และมีการยึดตัวที่จุดขาด 86% พอลิยูรีเทนเทอร์โมเซตนี้สามารถใช้เป็นสารเคลือบหรือกาวได้

Dale Lee Handlin และคณะ [47] ได้ทำการจดสิทธิบัตรการหล่อพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่มีสารบ่มเป็นเอมีนที่มีขี้ตัว โดยไอโซไซยานาตส่วนเกินจะทำปฏิกิริยากับพอลิไดอินไดออกก่อนเพื่อสร้างพรีพอลิเมอร์ที่ส่วนปลายเป็นหมู่ไอโซไซยานาต จากนั้นพรีพอลิเมอร์นี้สามารถนำไปทำปฏิกิริยากับสารบ่มเอมีนได้ การทำปฏิกิริยากับสารช่วยบ่มสามารถเพิ่มส่วนประกอบไอโซไซยานาตเพื่อเพิ่มส่วนแข็งได้ TDI อีสระ ที่มีปริมาณความเข้มข้นของส่วนแข็ง 22% ผสมกับพรีพอลิเมอร์ที่ความเร็วสูงที่อุณหภูมิ 100 °C จากนั้นเติมตัวขยายสายโซ่แล้วผสมด้วยความเร็วเป็นเวลา 30-40 วินาที เวลาการเกิดเจลอยู่ที่ 2-3 นาที เทลจไนแม่มิมพ์ที่ถูกอัดด้วยความดัน 20,000 psi เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแม่พิมพ์อุณหภูมิ 105-115 °C จากนั้นวางแม่พิมพ์ลงในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 105-115 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากการบ่ม พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์แบบหล่อถูกเตรียมขึ้นโดยใช้ตัวเชื่อมขวางอะโรมาติกไดเอมีน โดยตัวอย่างที่ 1-3 ถูกบ่มด้วย Lonzacure M-CDEA ตัวอย่าง C1 ถูกบ่มด้วย Curne 442 ตัวอย่าง C2 ถูกบ่มด้วย Ethacure 300 และตัวอย่าง C3 ถูกบ่มด้วย Polacure 740M การทำปฏิกิริยาพรีพอลิเมอร์กับ DETDA นั้นเกิดปฏิกิริยาเร็วเกินไปจนไม่สามารถเตรียมตัวอย่างทดสอบได้ การหล่อพอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ที่มีสารบ่มเป็นเอมีนที่มีขี้ตัว ที่ใช้สารบ่ม Lonzacure M-CDEA แสดงสมบัติความแข็งและความเครียดสูงกว่าตัวอย่างที่ C1, C2 และ C3 ที่เป็นสารบ่มจำพวก MCBA และการใช้สารบ่ม Ethacure 300 และ Polacure 740M เข้ากันได้ไม่ดีนักทำให้เกิดการแยกเฟสในช่วงแรก ส่งผลให้พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ไม่ได้รับการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

สหกิจศึกษานี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยการผสมมือ (Hand mixing) ให้ได้ล้อยที่มีความแข็ง 75 Shore D นอกจากนี้ยังศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะจากล้อยางพอลิยูรีเทนมาทำการแยกส่วนแกนล้อยเพื่อนำส่วนที่สามารถหลอมขึ้นรูปใหม่ได้มาขึ้นรูปใหม่เพื่อลดต้นทุนการผลิตแกนล้อย โดยมีแผนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาการขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการผสมมือ

- ทำการขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนตามสูตร
- ทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็ง (Hardness) ความกระด้าง (Rebound resilience) การหดตัว (Shrink test)
- สังเกตสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ฟองอากาศ

ตอนที่ 2 การใช้ประโยชน์จากเศษล้อยางเสีย

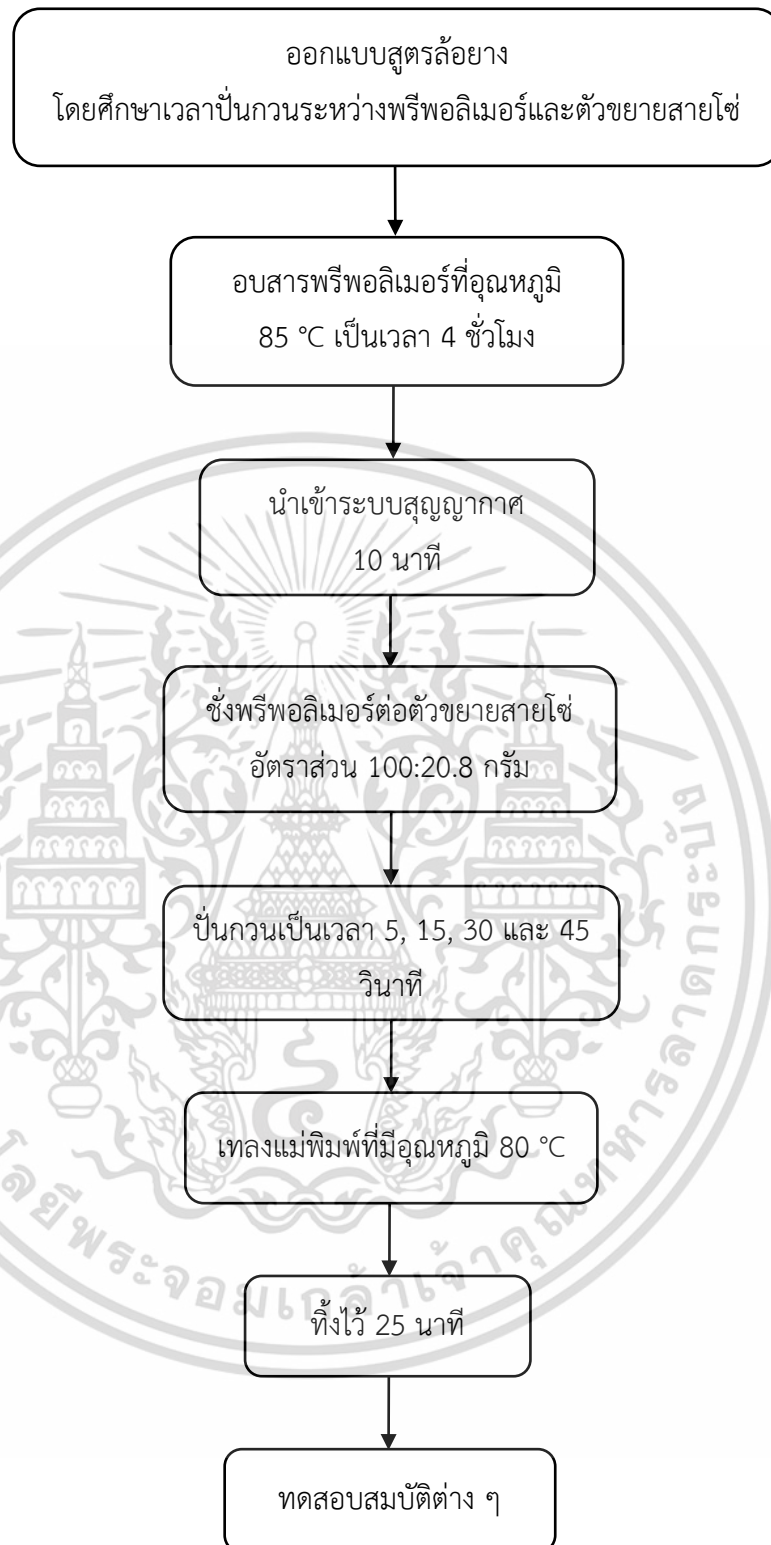
2.1 การแยกแกนล้อยออกจากล้อยางพอลิยูรีเทน

- แยกแกนล้อยออกจากล้อยางพอลิยูรีเทนโดยการกดที่มีการตัดลักษณะต่างกัน
- ทำการอัดล้อยางพอลิยูรีเทนในลักษณะต่าง ๆ

2.2 การนำแกนล้อยอัดมารีไซเคิลเพื่อนำมาผลิตเป็นแกนล้อยใหม่อีกครั้ง

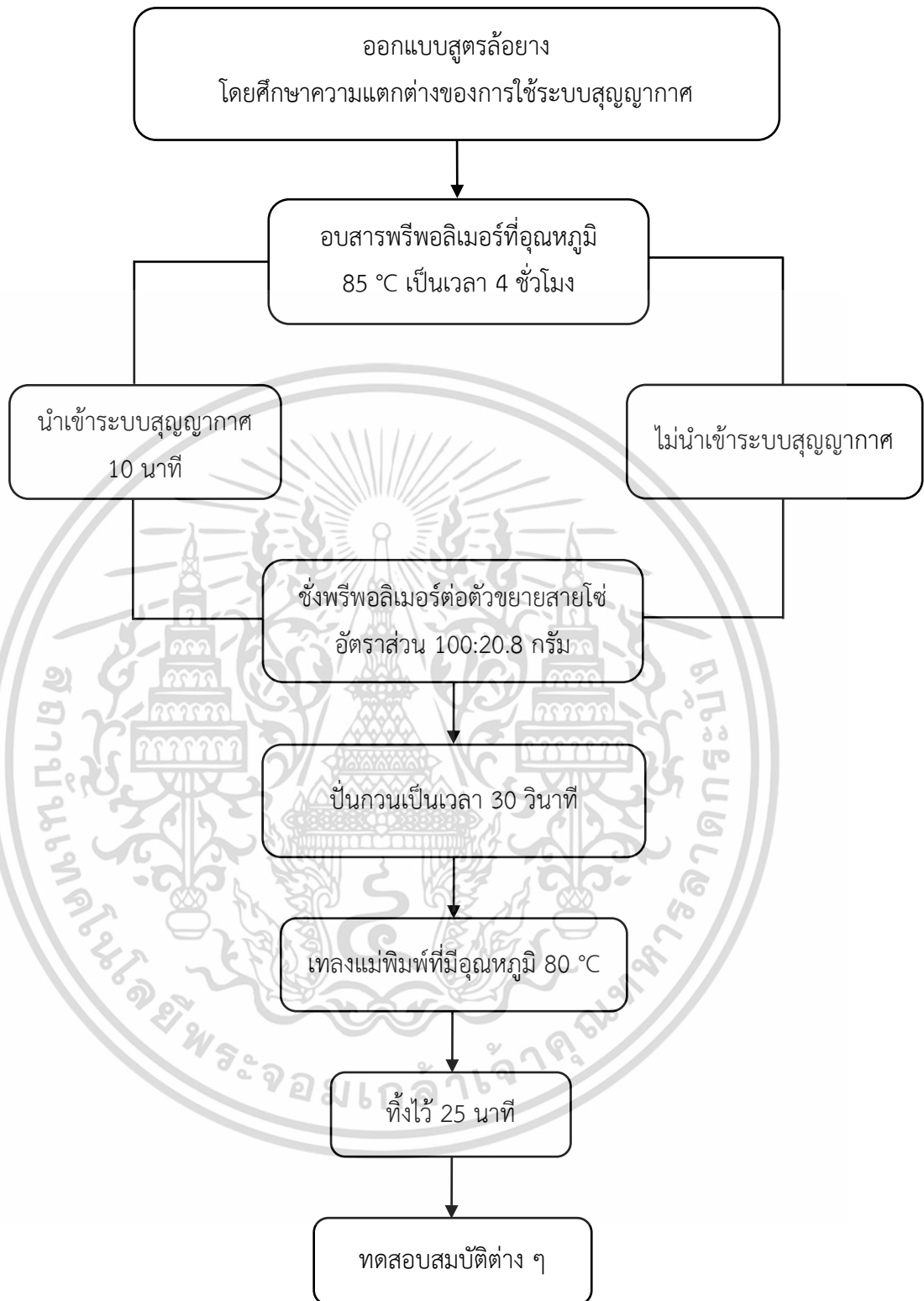
- นำแกนล้อยมาบด
- แยกเศษล้อยางออกจากแกนล้อยที่บด
- นำแกนล้อยที่บดแล้วไปหลอมขึ้นรูปใหม่
- ทดสอบสมบัติเชิงกลของล้อย คือ การทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

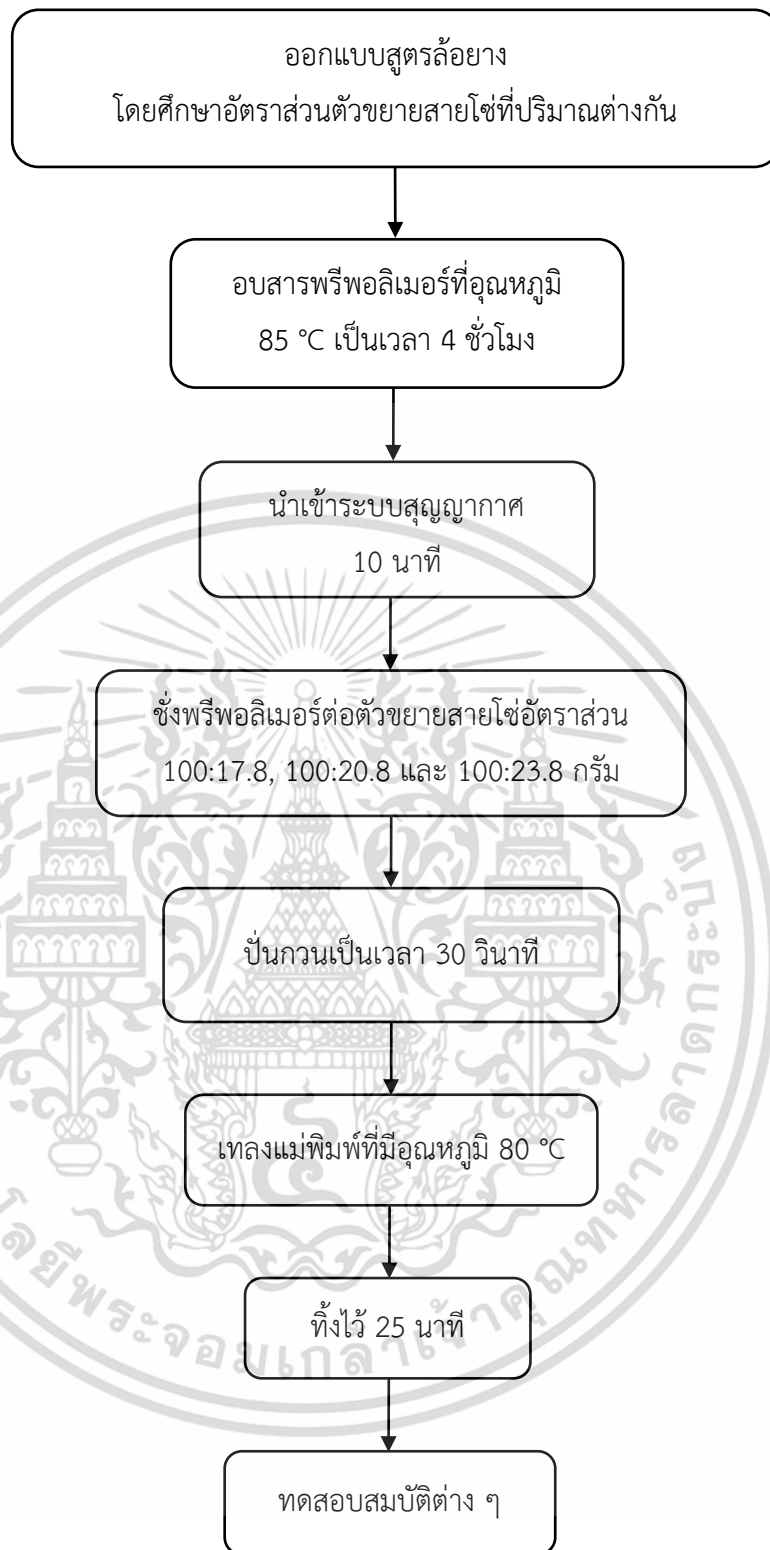


รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงานการพัฒนาสูตรล้อยางพอลิยูรีเทนโดยศึกษาเวลาป่นกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนระหว่างพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

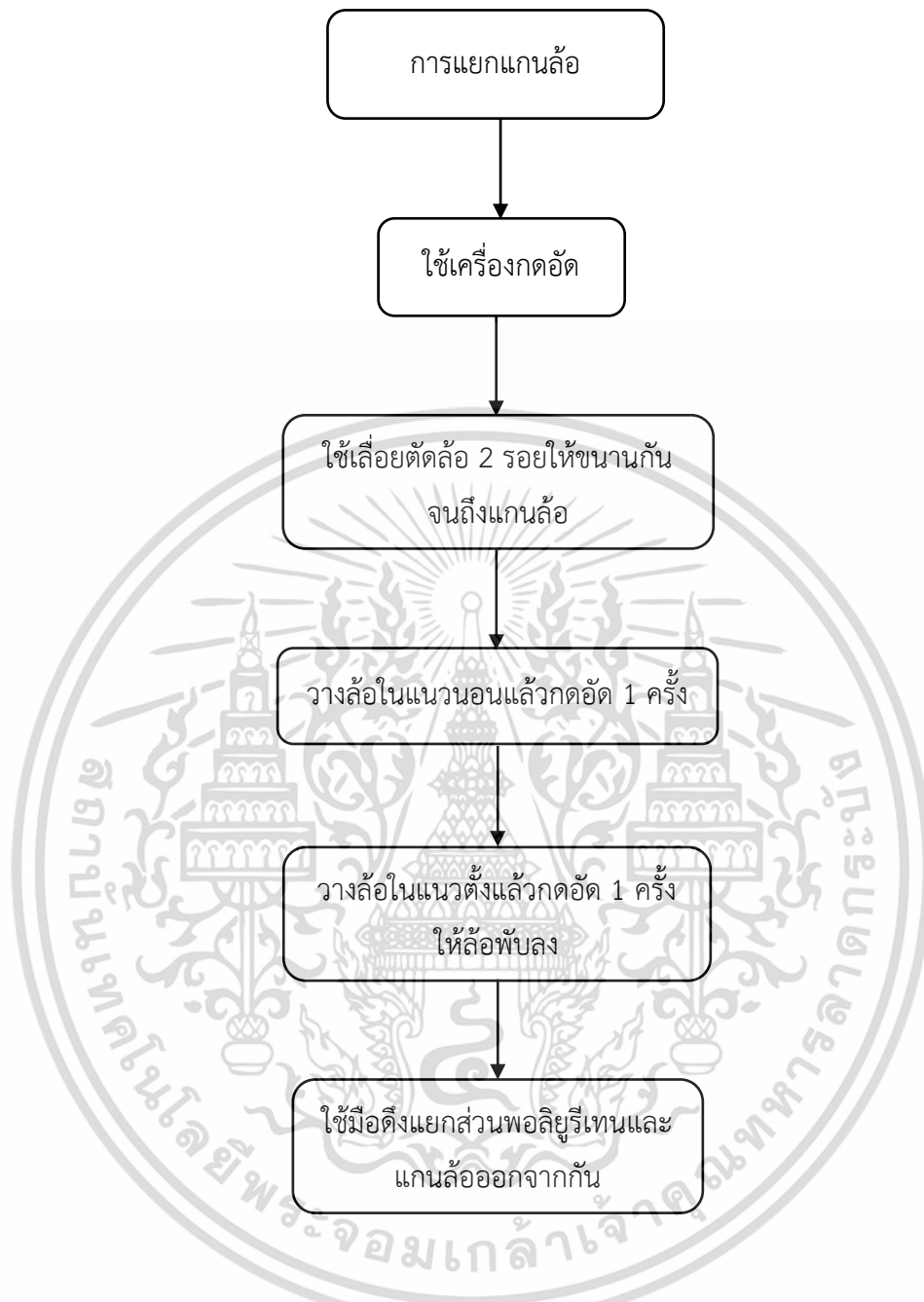


รูปที่ 3.2 แผนการดำเนินงานการพัฒนาสูตรล้อยางพอลิยูรีเทนโดยศึกษาความแตกต่างของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้การใช้ระบบสุญญากาศ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



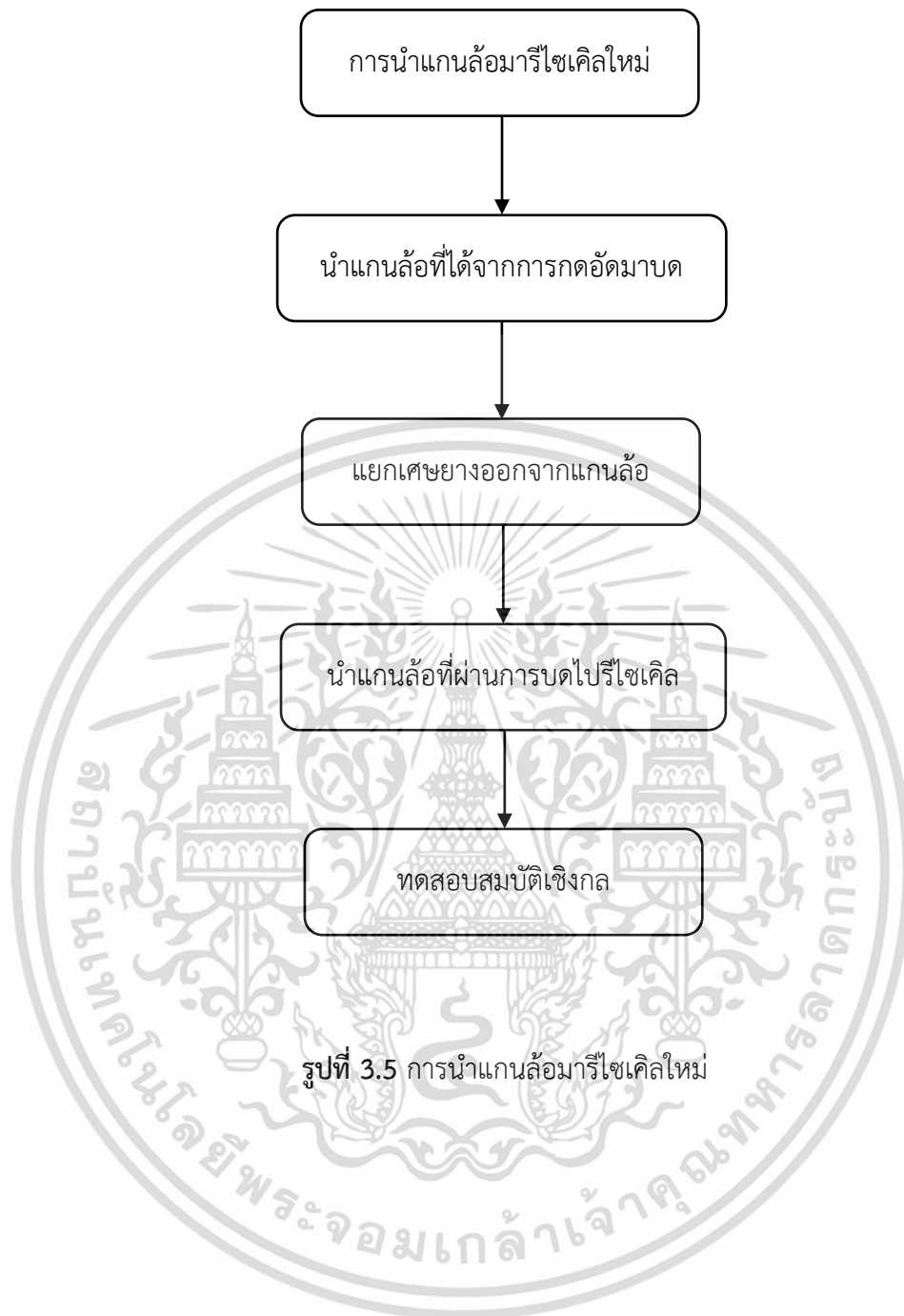
รูปที่ 3.3 แผนการดำเนินงานการพัฒนาสูตรตัวอย่างพอลิยูรีเทนโดยศึกษาอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่ที่ปริมาณต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การแยกแแกนลื้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตอนที่ 1 การศึกษาการพัฒนาสูตรล้อยางพอลิยูรีเทน

1. พรีพอลิเมอร์ ADIPRENE® LF 753D เกรดการค้า บริษัทแลนเซสส์ เอ็นเนอจีซึ่งเคมีสทรี จำกัด
2. ตัวขยายสายโซ่ VIBRACURE® 2107 เกรดการค้า บริษัทแลนเซสส์ เอ็นเนอจีซึ่งเคมีสทรี จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพรีพอลิเมอร์ ADIPRENE® LF 753D

Prepolymer Properties	Typical value
Nominal NCO Content (%)	8.6
Brookfield Viscosity @ 30°C (cPs)	19,000
Brookfield Viscosity @ 50°C (cPs)	2,900
Brookfield Viscosity @ 70°C (cPs)	850
Brookfield Viscosity @ 100°C (cPs)	190
Density @ 70°C (g/m ³)	1.09
Appearance @ 23°C	Clear to hazy liquid
Color (Gardner Scale)	<3
Prepolymer Meltdown Conditions (Hours/°C)	12-16/70
Prepolymer Meltdown Conditions (Hours/°C)	24-36/70

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของตัวขยายสายโซ่ที่ใช้ในการทดลอง

Curative Properties	Typical value
Equivalent weight	107
Appearance at Room Temperature	Clear, amber liquid
Viscosity @ 20°C (cPs)	690
Viscosity @ 60°C (cPs)	22
Viscosity @ 100°C (cPs)	5
Density @ 20°C (g/cm ³)	1.21
Density @ 60°C (g/cm ³)	1.18
Density @ 100°C (g/cm ³)	1.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวณวิศวกรรมเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) รุ่นโรตารี (Rotary vane vacuum pump) บริษัทสยาม เซมิคซี จำกัด
2. ปืนเป่าลมร้อน รุ่น G18-16 FE กำลัง 1800 วัตต์ บริษัทโรเบิร์ต บ็อส จำกัด
3. แม่พิมพ์ขนาด 49 มิลลิเมตร
4. ปีกเกอร์
5. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์ รุ่น GM320 IR Thermometer บริษัทคอมบิวบ์ จำกัด
6. เครื่องบดพลาสติก รุ่น BG 3035 บริษัทบอสโก เอ็นจิเนียริง จำกัด
7. ส่วนมือและใบพัดสำหรับการผสม
8. เดซีเคเตอร์
9. เครื่องกดอัด
10. เครื่องอบให้ความร้อน บริษัท ดับบลิวซีเค จำกัด



รูปที่ 3.6 ปั๊มสุญญากาศ



รูปที่ 3.7 เครื่องบดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ปืนเป่าลมร้อน



รูปที่ 3.9 โถดูดความชื้น



รูปที่ 3.10 แม่พิมพ์ขึ้นรูปล้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่องกวดอัดแยกแก๊ส



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเลเซอร์



รูปที่ 3.13 สว่านและไขควง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.14 เครื่องอบให้ความร้อนสารและแม่พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การพัฒนาสูตรล้อย่างพอลิยูรีเทน

1.1 ศึกษาเวลาป่นกวนระหว่างพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่

- เตรียมพรีพอลิเมอร์ด้วยการนำไปอบด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- นำเข้าเครื่องสุญญากาศ เป็นเวลา 10 นาที
- ชั่งอัตราส่วนระหว่างพรีพอลิเมอร์ต่อตัวขยายสายโซ่เท่ากับ 100:20.8 กรัม
- ป่นกวนเป็นเวลา 5, 15, 30 และ 45 วินาที
- เทลงแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 80 °C
- ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 25 นาที
- นำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ

1.2 ศึกษาความแตกต่างของการใช้ระบบสุญญากาศ

- เตรียมพรีพอลิเมอร์ด้วยการนำไปอบด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- นำเข้าเครื่องสุญญากาศ 1 ตัวอย่าง เป็นเวลา 10 นาที และไม่นำเข้าสุญญากาศ 1 ตัวอย่าง
- ชั่งอัตราส่วนระหว่างพรีพอลิเมอร์ต่อตัวขยายสายโซ่เท่ากับ 100:20.8 กรัม
- ป่นกวนเป็นเวลา 30 วินาที
- เทลงแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 80 °C
- ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 25 นาที
- นำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ

1.3 ศึกษาอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่ที่ปริมาณต่างกัน

- เตรียมพรีพอลิเมอร์ด้วยการนำไปอบด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- นำเข้าเครื่องสุญญากาศ เป็นเวลา 10 นาที
- ชั่งอัตราส่วนระหว่างพรีพอลิเมอร์ต่อตัวขยายสายโซ่เท่ากับ 100:17.8, 100:20.8, 100:23.8 กรัม
- ป่นกวนเป็นเวลา 30 วินาที
- เทลงแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 80 °C
- ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 25 นาที
- นำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 2.1 การแยกแยะแก๊สออกจากล้อย่างพอลิยูรีเทน เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำเลื่อยมาตัดตรงส่วนของยาง
- นำไปกดอัดในในแนวนอน 1 ครั้งและแนวตั้ง 1 ครั้ง ให้ส่วนที่เป็นยางพอลิยูรีเทนกับแกนล้อยออกจากกัน

2.2 การนำแกนล้ออัดมารีไซเคิลเพื่อนำมาผลิตเป็นแกนล้อใหม่อีกครั้ง

- นำแกนล้อที่ได้จากการกดอัดมาบด แล้วทำการแยกส่วนที่เป็นเศษยางออกจากแกนล้อ
- นำแกนล้อที่บดแล้วไปหลอมขึ้นรูปใหม่
- นำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ คือ สมบัติการกระแทก (Impact test)

ตารางที่ 3.3 ตารางแผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	2565					2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
หาข้อมูลและศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←				→					
เตรียมตัวอย่างเพื่อนำไป ทดสอบ					←→					
ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของ ตัวอย่าง เช่น สมบัติ เชิงกล สมบัติทาง กายภาพ							←→			
ทำการปรับปรุงล้ออย่าง PU และนำล้อเสียไปทำ การทดสอบและขึ้นรูป ใหม่								←→		→
วิเคราะห์สรุปผลการ ทดลองและจัดทำรายงาน								←→		→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

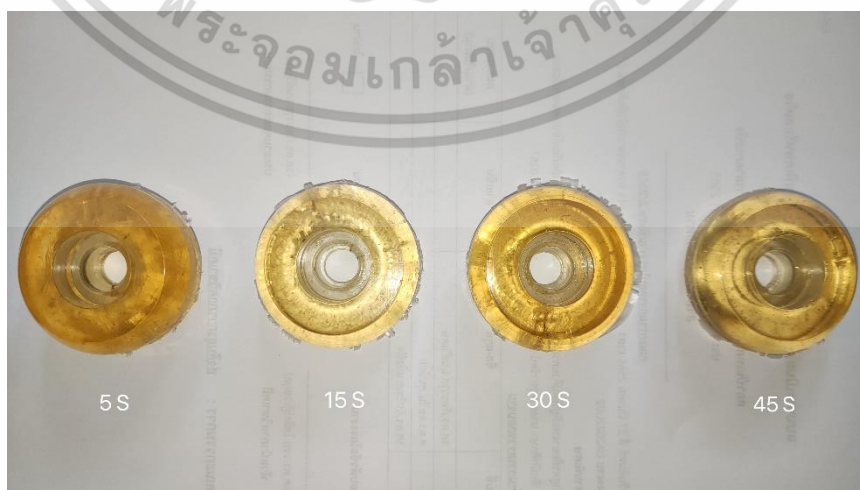
สหกิจศึกษา ณ บริษัท บราโว เอเชีย จำกัด มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษากระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการผสมมือ (Hand mixing) ไม่ให้เกิดฟองที่อาจเกิดการกระทบต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกล ได้ผลิตภัณฑ์ล้อยที่มีความแข็ง 75 Shore D โดยศึกษาเวลาในการปั่นกวน ความแตกต่างของการใช้และไม่ใช้ระบบสูญญากาศ อัตราส่วนพรีพอลิเมอร์กับตัวขยายสายโซ่ที่แตกต่างกัน รวมทั้งการนำขยะล้อย่างมาแยกยางพอลิยูรีเทนออกจากส่วนของแกนล้อย ด้วยวิธีการกดอัด แยกส่วนยางออกจากแกนที่สามารถหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ออกจากกัน เพื่อนำแกนไปรีไซเคิลหลอมขึ้นรูปใหม่ นำกลับมาใช้อีกครั้ง โดยสหกิจศึกษานี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

4.1 การศึกษาการขึ้นรูปล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยกระบวนการผสมมือ

ในขั้นต้นสหกิจศึกษานี้ได้เตรียมตัวอย่างล้อยางพอลิยูรีเทนจากพรีพอลิเมอร์ ทำปฏิกิริยากับตัวขยายสายโซ่ โดยใช้สูตรเริ่มต้นอ้างอิงจากสูตรมาตรฐานที่อัตราส่วนระหว่างพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่คงที่ที่ 100:20.8 กรัม

4.1.1 ศึกษาเวลาการปั่นกวนระหว่างพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่

จากการนำพรีพอลิเมอร์ 100 กรัมต่อตัวขยายสายโซ่ 20.8 กรัม มาปั่นกวนรวมกันด้วยใบพัดปั่นกวนด้วยเวลาที่แตกต่างกันได้แก่ 5, 15, 30 และ 45 วินาที พบว่าช่วงเวลาที่ 30 วินาทีเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปั่นกวน หมายความว่า เป็นช่วงเวลาที่พรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ผสมเข้ากันได้ดีและค่าความหนืดที่น้อย เหลือระยะเวลาที่สารจะเข้าสู่การหนืดและเหนียวเหมือนเจลนานขึ้น ทำให้มีเวลาเทลงแม่พิมพ์ได้ ล้อยไม่เป็นริ้วเนื่องจากความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทำการขึ้นรูปล้อยที่เวลาการปั่นกวนต่างกัน และเปรียบเทียบความแตกต่างของล้อยให้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.1



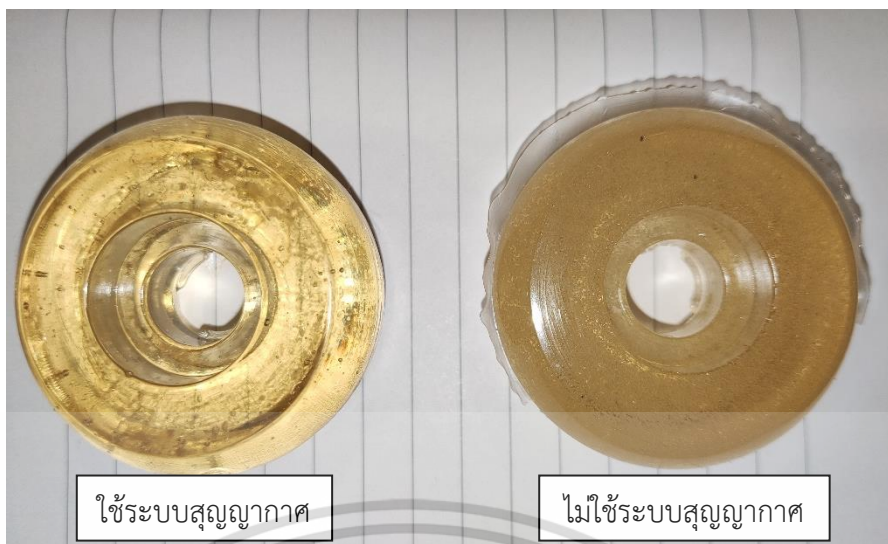
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.1 ล้อยที่ถูกขึ้นรูปโดยใช้เวลาการปั่นกวนที่ต่างกันจากซ้ายไปขวา (5, 15, 30 และ 45 วินาที)

ในรูปที่ 4.1 แสดงความแตกต่างของล้อยางขึ้นรูปที่เวลาการปั่นกวนต่างกัน 5, 15, 30 และ 45 วินาที ในอุณหภูมิการใช้งานของพรีพอลิเมอร์ที่ 65 °C และตัวขยายสายโซ่ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าในการปั่นกวนที่เวลา 5 วินาทีนั้น สารยังผสมเข้ากันไม่ดี สารทั้งสองยังมีการแยกกันค่อนข้างชัดเจน หลังทำการเทลงแม่พิมพ์เมื่อผ่านไปเวลา 25 นาที ยังพบว่าบริเวณผิวภายนอกมีความเหนียวหนืด เนื่องจากยังมีสารหลงเหลือไม่จับคู่ทำปฏิกิริยากันพอดี ล้อยางมีลักษณะเป็นลายเส้นคลื่นภายในพื้นผิว สาเหตุมาจากการผสมที่ยังไม่เข้ากันดี ในการปั่นกวนที่เวลา 15 วินาที สารทั้งสองมีการผสมเข้ากันมากขึ้นมากกว่าการปั่นกวนที่เวลา 5 วินาที แต่ยังมีบางส่วนที่ยังผสมเข้ากันไม่ดี หลังทำการเทลงแม่พิมพ์เมื่อเวลาผ่านไป 25 นาที บริเวณผิวภายนอกยังมีบางส่วนที่ไม่แข็งตัว มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด และเมื่อนำออกจากแม่พิมพ์รอยคลื่นภายในล้อยางลดลงอย่างเห็นได้ชัดแต่ยังมีบางส่วนที่ยังเป็นรอยคลื่นอยู่ เมื่อเพิ่มเวลาการปั่นกวนที่ 30 วินาที พบว่าสารผสมเข้ากันได้ดี ตอนเทลงแม่พิมพ์มีความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารทั้งสองเริ่มทำปฏิกิริยาหลังผ่านไป 25 นาทีพบว่าบริเวณพื้นผิวภายนอกมีความแข็ง ไม่มีส่วนที่ยังเป็นของเหลวอยู่ พื้นผิวมีความเรียบ ไม่พบรอยคลื่นภายในพื้นผิว จากการทดลองในอัตราส่วนปริมาณ 100:28 กรัม เวลาปั่นกวน 30 วินาทีสามารถเทลงแม่พิมพ์ได้ 2 ตัวอย่าง ก่อนที่สารจะมีความหนืดมากขึ้น จนไม่สามารถเทลงแม่พิมพ์ได้ และในการปั่นกวนที่ 45 วินาที พบว่าสารผสมเข้ากันได้ดี ไม่พบรอยคลื่นภายในพื้นผิว แต่สามารถขึ้นรูปได้เพียง 1 ตัวอย่างเนื่องจากเวลาในการปั่นมากขึ้น เวลาที่สารสามารถเทลงแม่พิมพ์ก่อนความหนืดเพิ่มขึ้นสั้นลง การเทลงแม่พิมพ์ในครั้งที่ 2 มีความหนืดมาก ส่งผลให้เกิดรอยคลื่นบริเวณที่เกิดความหนืดมาก ดังนั้นเวลาในการปั่นกวนที่ 30 วินาทีจึงมีความเหมาะสมมากที่สุด

4.1.2 ศึกษาความแตกต่างของการใช้ระบบสุญญากาศ

จากสูตรล้อยางที่อัตราส่วนพรีพอลิเมอร์ 100 กรัมต่อตัวขยายสายโซ่ 20.8 กรัม โดยการนำพรีพอลิเมอร์อุ่นด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาเข้าเครื่องสุญญากาศเพื่อนำอากาศออกจากสารพรีพอลิเมอร์ที่แรงดัน -0.3 bar เป็นเวลา 10 นาทีจนอากาศออกจากสารจนหมด นำพรีพอลิเมอร์ออกจากเครื่องสุญญากาศ วัดอุณหภูมิสารที่ 65 °C ปั่นกวนกับตัวขยายสายโซ่ในปริมาณ 20.8 กรัม ตามสูตรล้อยางด้วยใบพัดปั่นกวนเป็นเวลา 30 วินาที หลังจากการปั่นกวนเทใส่แม่พิมพ์ร้อนอุณหภูมิ 80 °C ขนาด 49 มิลลิเมตร จำนวน 2 ตัวอย่าง ทิ้งไว้ 25 นาที หลังจากนั้นนำล้อยางที่ได้ออกจากแม่พิมพ์ ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งเหมือนดังข้างต้น โดยครั้งนี้จะไม่นำสารพรีพอลิเมอร์เข้าเครื่องสุญญากาศแต่จะรอให้สารลดอุณหภูมิลงเหลือที่ 65 °C จึงนำมาผสมกับตัวขยายสายโซ่ นำล้อยางที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 การทดลอง มาเปรียบเทียบฟองที่เหลืออยู่ในล้อยาง พบว่าล้อยางที่ขึ้นรูปโดยผ่านระบบสุญญากาศนั้นมีจำนวนฟองที่น้อยกว่าล้อยางที่ขึ้นรูปโดยไม่ใช้ระบบสุญญากาศอย่างเห็นได้ชัด ผลลัพธ์เปรียบเทียบดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ล้อที่ขึ้นรูปโดยผ่านระบบสุญญากาศ (ซ้าย) ล้อที่ขึ้นรูปโดยไม่ผ่านระบบสุญญากาศ (ขวา)

ในรูปที่ 4.2 แสดงล้อที่ขึ้นรูปโดยใช้ระบบสุญญากาศช่วยและล้อที่ขึ้นรูปโดยไม่ใช้ระบบสุญญากาศช่วย พบว่าสมบัติทางกายภาพของล้อที่ผ่านระบบสุญญากาศนั้นมีพองที่ลดลงมากกว่า 90% เมื่อเทียบกับล้อที่ไม่ใช้ระบบสุญญากาศอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากระบบสุญญากาศนั้นช่วยลดความชื้นและลดแรงดัน ช่วยในการไล่อากาศออกจากสาร ลดการเกิดพองที่เกิดขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบจะพบว่าล้อที่ถูกขึ้นรูปโดยใช้ระบบสุญญากาศมีความใส ส่วนล้อที่ไม่ใช้ระบบสุญญากาศมีความขุ่นที่เกิดจากพองอากาศภายใน โดยในการก่อนทำการดูอากาศออกนั้นได้ทำการกวนสารเบา ๆ ก่อนเข้าเครื่องสุญญากาศ เพราะพรีพอลิเมอร์นั้นเป็นสารที่มีความหนืดค่อนข้างสูงหากทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงและเกิดความแข็งที่พื้นผิว การใช้ไม้กวนเบาๆก่อนเข้าเครื่องสุญญากาศจะช่วยลดความแข็งที่พื้นผิวลดลงได้ อากาศภายในสารสามารถออกได้ง่ายขึ้น ส่งผลล้อที่ผ่านระบบสุญญากาศอาจยังคงมีพองหลงเหลืออยู่ เนื่องมาจากขั้นตอนการปั่นกวนระหว่างพรีพอลิเมอร์กับตัวขยายสายโซ่ อาจทำให้เกิดพองขึ้นระหว่างการปั่นกวน รวมถึงขั้นตอนการเทลงแม่พิมพ์อีกด้วย ล้อที่ไม่ผ่านระบบสุญญากาศนั้นบริเวณพื้นผิวจะสังเกตเห็นถึงรูเล็ก ๆ ที่เกิดมาจากพองอากาศ ส่งผลให้มีช่องว่างเกิดขึ้น สมบัติเชิงกลลดลง ทนการขีดสีเสียดูได้น้อยลง

4.1.3 ศึกษาอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่ที่ปริมาณแตกต่างกัน

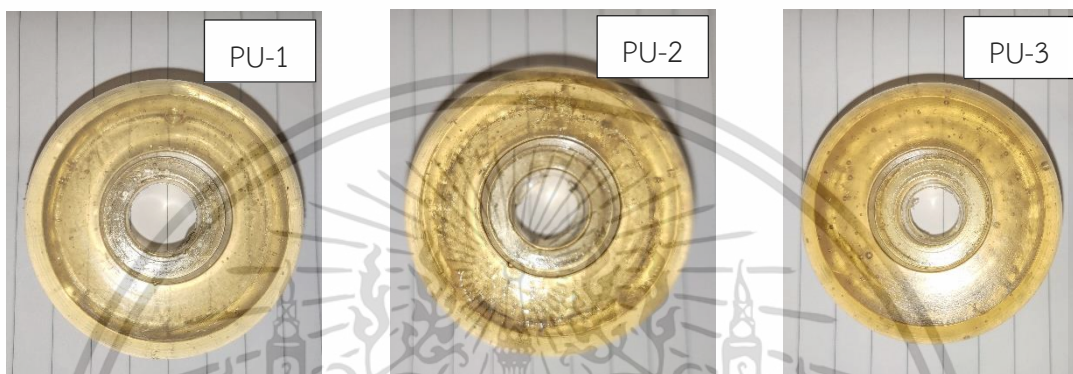
จากการทดลองในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 ได้ผลออกมาว่าในกระบวนการขึ้นรูปแบบผสมมือนั้นใช้เวลาการปั่นกวนที่ 30 วินาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมและใช้ระบบสุญญากาศที่ -0.3 bar เป็นเวลา 10 นาทีในการช่วยลดพองในล้อ และได้ทำการศึกษาต่อเรื่องอัตราส่วนพรีพอลิเมอร์โดยใช้ค่ากลางของ VIBRACURE® 2107 ที่ปริมาณ 20.8 กรัม และทำการลดและเพิ่มปริมาณจากค่ากลาง 3 กรัม เพื่อศึกษาช่วงการใช้งานที่สามารถคลาดเคลื่อนได้ สมบัติเชิงกลและกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และข้อมูลในเอกสารนี้เป็นข้อมูลภายในของบริษัทฯ ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิจัยและพัฒนา

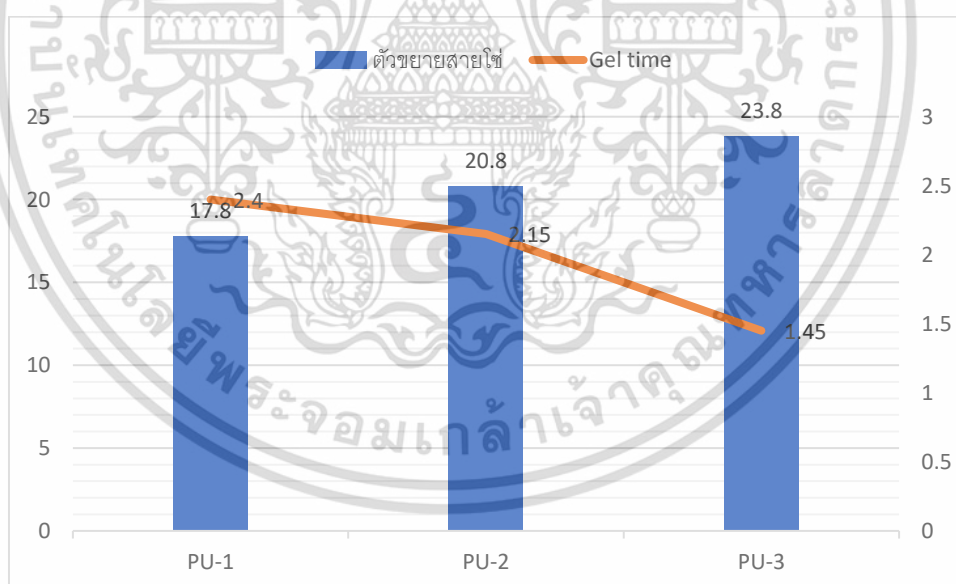
เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ ดังแสดงในตารางสูตรที่ 4.1 ค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 สูตรที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

สูตร	อัตราส่วนระหว่างพรีพอลิเมอร์ต่อตัวขยายสายโซ่		Gel time (min)
	ADIPRENE® LF 753D	VIBRACURE® 2107	
PU-1	100	17.8	2.40
PU-2	100	20.8	2.15
PU-3	100	23.8	1.45



รูปที่ 4.3 ล้อที่ขึ้นรูปด้วยอัตราส่วนต่างกัน PU-1, PU-2 และ PU-3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่ที่ส่งผลต่อเวลาการเกิดเจล

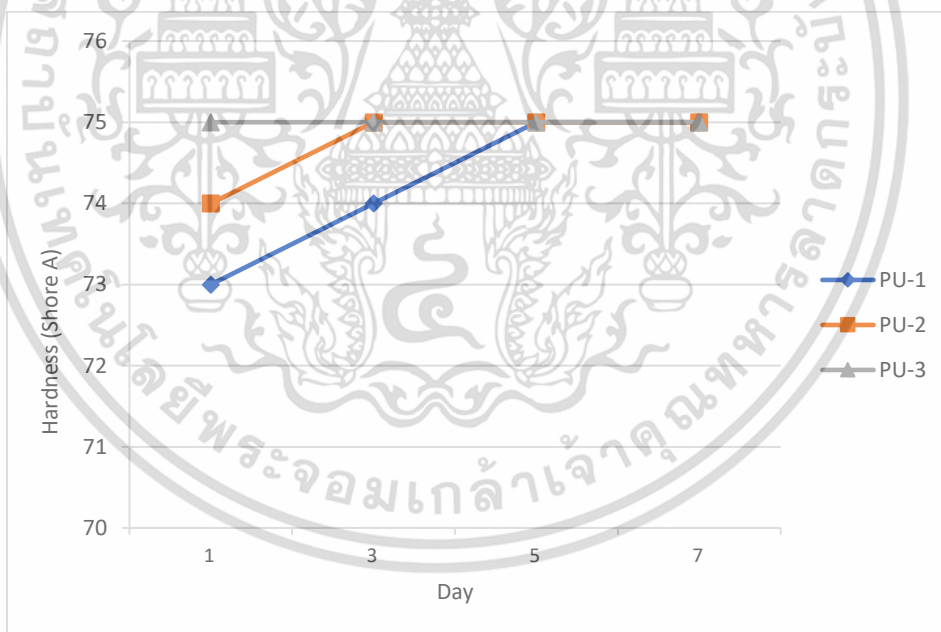
จากตารางที่ 4.1 แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวขยายสายโซ่ดังนี้ PU-1 100:17.8 กรัม, PU-2 100:20.8 กรัม และ PU-3 100:23.8 กรัม ซึ่งแสดงรูปภาพตัวอย่างดังรูปที่ 4.3 จากซ้ายไปขวา พบว่าล้อที่ขึ้นรูปด้วยสูตร PU-2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า มีเวลา Gel time อยู่ที่ 2 นาที 15 วินาที มีลักษณะเป็นสีเหลืองใส เวลาการบ่มในแม่พิมพ์ 25 นาที ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นลดปริมาณตัวขยายสายโซ่ลง 3 กรัม ได้เป็น PU-1 พบว่ามีเวลา Gel time เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 2 นาที 40 วินาที เนื่องจากปริมาณตัวขยายสายโซ่ลดลง และมีเวลาการบ่มในแม่พิมพ์อยู่ที่ 40 นาที เมื่อเทียบกับ PU-2 แล้วพบว่ามียี่สิบเหลี่ยมที่ค่อนข้างอ่อนกว่า เนื่องมาจากการลดปริมาณของตัวขยายสายโซ่ที่มีสี่เหลี่ยมที่ค่อนข้างเข้มเป็นตัวส่งผลต่อสีของล้อยที่ได้ออกมา และ PU-3 มีเวลา Gel time อยู่ที่ 1 นาที 45 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่สั้นที่สุดในสูตรการทดลอง เนื่องจากปริมาณตัวขยายสายโซ่ที่มากเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว เวลาในการบ่มในแม่พิมพ์ 25 นาที แต่การแข็งตัวมีการแข็งตัวที่เร็วกว่า PU-1 และ PU-2 เมื่อเปรียบเทียบสีทั้ง PU-1 และ PU-2 พบว่ามีสีที่ค่อนข้างเข้มกว่าทั้งสองสูตร เป็นเพราะปริมาณตัวขยายสายโซ่ที่มากกว่าสูตรอื่น

4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

- ทดสอบความแข็ง (Hardness, Shore D) ของล้อยพอลิยูรีเทน

จากการทดสอบการวัดค่าความแข็ง ด้วย Shore D โดยทำการวัดความแข็งของล้อยสูตรที่มีความแข็ง 75 Shore D ตามความต้องการของบริษัท บราโว เอเชีย จำกัด โดยนำล้อยพอลิยูรีเทนที่ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ในอัตราส่วนที่ต่างกันในตารางที่ 4.1 นำมาทดสอบที่ระยะเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 ผลทดสอบความแข็งของล้อยพอลิยูรีเทนสูตรต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบเวลาต่างกัน

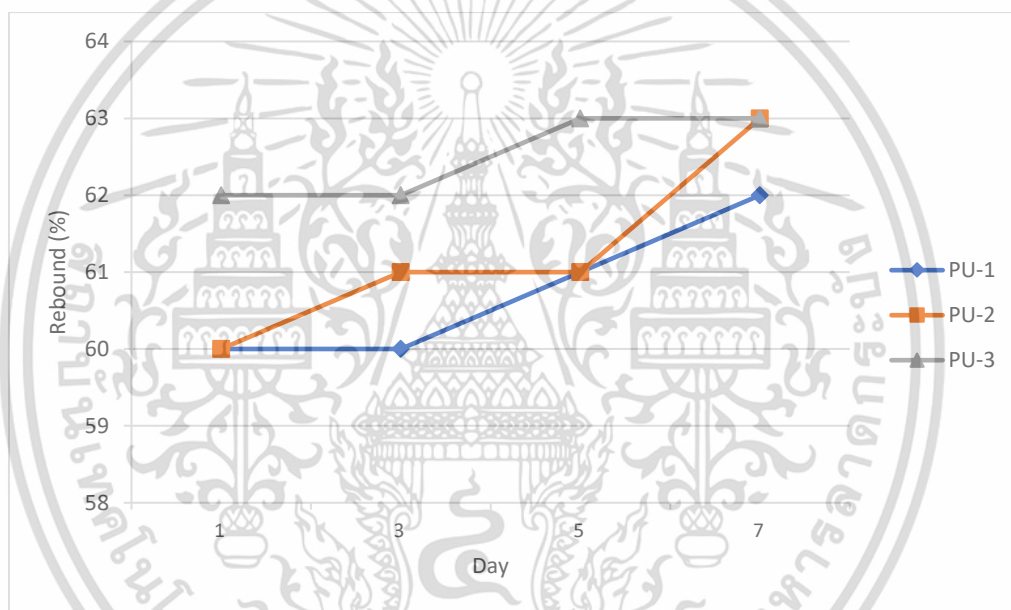
จากรูปกราฟที่ 4.5 พบว่าล้อยพอลิยูรีเทนสูตร PU-3 มีค่าความแข็ง 75 Shore D ในช่วง 1 วันเร็วที่สุด รองลงมาคือสูตร PU-2 และ PU-1 ตามลำดับ และการที่สูตร PU-1 มีค่าความแข็งในช่วง 1 วันต่ำที่สุดเท่ากับ 73 เนื่องจากมีปริมาณตัวขยายสายโซ่ต่ำเกินไป เกิดส่วนนิ่ม (Soft segment) มากกว่าส่วนแข็ง (Hard segment) ส่งผลให้ล้อยมีความนิ่ม มีความเหนียวติดมือ (Sticky) และเหตุนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อเป็นข้อมูลเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เองทำให้เวลาในการนำล้อยอกจากแม่พิมพ์ (Demold) ใช้เวลานานกว่าล้อยูรีเทน PU-2 และ PU-3 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเกิดจากการเชื่อมโยงของพรีพอลิเมอร์ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการแข็งตัวช้า ซึ่งพอลิยูรีเทนยังสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ต่อเนื่องหลังการผลิต ขึ้นกับความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา

- ทดสอบความกระด้าง (Rebound resilience)

ความกระด้างของล้อยูรีเทน เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาความยืดหยุ่นของล้อยูรีเทน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าล้อยูรีเทนสูญเสียพลังงานไปมากเพียงใดจากการเสียดสีภายในระหว่างการกดอัด/การคืนตัว ยิ่งเปอร์เซ็นต์ของความกระด้างมีค่าสูง ยิ่งแสดงให้เห็นว่าล้อยูรีเทนมีความยืดหยุ่นในการกระด้างสูง และความกระด้างนี้จะเป็นตัวช่วยในการยึดเกาะพื้นได้ดีขึ้น โดยได้จัดเตรียมตัวอย่างล้อยูรีเทนมาทดสอบตามสูตรในตารางที่ 4.1 ได้แก่ PU-1, PU-2 และ PU-3 ผลการทดสอบความกระด้างดังแสดงในรูปที่ 4.6



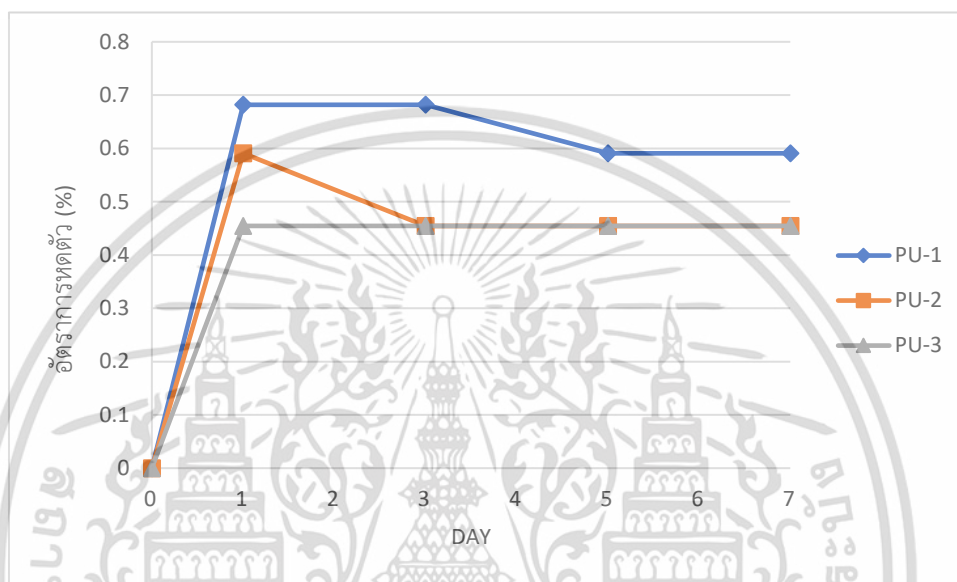
รูปที่ 4.6 ผลทดสอบความกระด้างของล้อยูรีเทนสูตรต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบเวลาต่างกัน

จากการทดสอบความกระด้างดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.6 พบว่า PU-3 และ PU-2 มีค่าความกระด้างเท่ากับ 63% ล้อยูรีเทน PU-1 มีความกระด้างเท่ากับ 62% ในช่วง 1 วันก็นำล้อยูรีเทนมาทดสอบ ล้อยูรีเทน PU-3 ซึ่งเป็นล้อยูรีเทนที่ใส่ตัวขยายสายโซ่ไปในปริมาณสูงสุด มีค่าความกระด้างมากที่สุดเท่ากับ 62% รองลงมาคือ PU-2 และ PU-1 เท่ากับ 60% แต่จะเห็นค่าความกระด้างที่ต่างกันในการทดสอบในวันที่ 3 จะพบว่า PU-2 ที่มีปริมาณอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่สูงกว่าสามารถวัดความกระด้างได้เท่ากับ 61% แต่ PU-1 ยังคงความกระด้างที่ 60% ดังเดิม แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวขยายสายโซ่ ส่งผลให้ล้อยูรีเทนที่นำมาทดสอบแข็งตัวเร็วขึ้น พื้นผิวตัววนนอกของล้อยูรีเทนที่แข็งพอที่จะนำมาทดสอบ จึงส่งผลให้ค่าที่ได้มีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทดสอบการหดตัว (Shrink test)

การทดสอบการหดตัว เป็นการทดสอบเพื่อดูการหดตัวของล้อยพอลิยูรีเทนเมื่อทำการขึ้นรูปแล้ว สามารถนำไปใส่ตลับลูกปืน (Bearings) ที่มีความกว้าง 22 มิลลิเมตร ได้พอดีหรือไม่ โดยนำล้อยตัวอย่างทั้ง 3 สูตร จากตารางที่ 4.1 มาทดสอบว่าระยะเวลาส่งผลต่อการหดตัวของล้อยหรือไม่ในปริมาณตัวขยายสายโซ่ที่ต่างกัน โดยนำล้อยที่ทำการขึ้นรูปแล้วมาทดสอบในระยะเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลทดสอบการหดตัวของล้อยพอลิยูรีเทนสูตรต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบเวลาต่างกัน

การทดสอบการหดตัวของล้อยพอลิยูรีเทนจากรูปกราฟที่ 4.7 พบว่า ระยะเวลาไม่ส่งผลต่อการหดตัวมากนัก ล้อยที่ทำการขึ้นรูปจากสูตร PU-3 นำมาทดสอบวันที่ 1 พบว่ามีการหดตัวน้อยมาก ที่ 0.45% จากตอนที่นำออกมาจากแม่พิมพ์ที่มีขนาด 22 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับล้อยสูตร PU-2 และ PU-1 จะเห็นว่าล้อยมีการหดตัวมาก ที่ 0.59% และ 0.68% ตามลำดับ เนื่องจากการเชื่อมโยงของพรีพอลิเมอร์ยังไม่สมบูรณ์ อาจเกิดการเชื่อมขวางหรือการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่ ทำให้เมื่อเวลาผ่านไปส่งผลให้ล้อยเกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งการหดตัวจะเป็นการหดตัวเข้าหาจุดศูนย์กลางของชิ้นงานเสมอ และการหดกลับของพอลิยูรีเทนนั้นทำให้รู้ที่จะนำไปใส่ตลับลูกปืนนั้นกว้างขึ้น

4.2 การใช้ประโยชน์จากล้อยางเสีย

ล้อยางเสียคือล้อยางที่มีจุดบกพร่อง เช่น ฟองอากาศ ผิวนูน ระบายซิลิโคน ทำให้ไม่สามารถนำไปจำหน่ายได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จึงได้นำมากัดอัดเพื่อแยกแกนล้อยางส่วนยางพอลิยูรีเทนกับส่วนแกนล้อยางที่เป็นพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ที่สามารถหลอมขึ้นรูปใหม่ได้มาหลอมขึ้นรูปใหม่ เพื่อลดต้นทุนการผลิตแกนล้อยาง และเป็นการลดขยะที่เกิดจากของเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้











รูปที่ 4.8 ตัวอย่างจุดบกพร่องของล้อยาง

- การแยกแกนล้อออกจากล้อยางพอลิยูรีเทน

ผลทดสอบจากการแยกแกนล้อโดยการตัดในลักษณะต่าง ๆ โดยทำการทดสอบกับล้อยางที่มีความแข็ง 82 Shore A แกนชนิดพอลิโพรพิลีน (PP) มาทำการตัดและกดอัด ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อได้แกนล้อเปล่ามาแล้วนำไปบดเพื่อทำการขึ้นรูปแกนล้อใหม่ จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ทดสอบการแยกแกนล้อออกจากล้อยางพอลิยูรีเทนด้วยการตัดและกดอัด

จำนวนจุดตัด	จำนวนการกดอัด (ครั้ง)		ก่อนกดอัด	หลังกดอัด
	แนวอน	แนวตั้ง		
1	1	1		
2	1	1		
3	1	2		
4	1	3		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ยิ่งทำการตัดล้อยจำนวนจุดตัดน้อยยิ่งทำให้สามารถแยกยางพอลิยูรีเทนออกจากแกนล้อยได้ง่ายขึ้น เนื่องจากแกนล้อยสามารถพับลงตามรอยพับ ทำมุมได้พอดีทำให้แรงกดที่ส่งลงมาสามารถอัดล้อยลงมาได้ดี จะเห็นว่า การตัดล้อย 1 จุด กดอัดล้อยเพียง 2 ครั้งก็จริง แต่ไม่สามารถแยกยางพอลิยูรีเทนออกจากแกนได้ 100% แต่การตัดล้อย 2 จุด ใช้การกดอัด 2 ครั้ง แต่สามารถแยกยางพอลิยูรีเทนออกจากแกนได้ 100% ส่งผลให้หลังจากที่นำแกนไปบัดแล้วไม่ต้องเสียเวลาในการแยกเศษยางออก เป็นการลดเวลาในการทำงาน และส่งผลให้แกนที่นำไปรีไซเคิลใหม่มีคุณภาพที่ดี

- ทดสอบแรงกระแทก (Impact test)

การทดสอบแรงกระแทกโดยนำแกนล้อยที่ได้จากการนำไปรีไซเคิลมาทำการทดสอบทั้งหมด 3 ตัวอย่างโดยแต่ละตัวอย่างจะใช้น้ำหนักในการกระแทกที่ต่างกัน คือ 4.2 กิโลกรัม 6.2 กิโลกรัม และ 9.2 กิโลกรัม กำหนดด้านแกนล้อยที่ต้องการกระแทก เพื่อดูความสามารถในการ รับการกระแทกจากน้ำหนักที่แตกต่างกัน แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบสองครั้งก่อนเพื่อดูว่าแกนล้อยที่ทำการทดสอบ มีประสิทธิภาพในการรับแรงกระแทกหรือไม่ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแกนล้อยที่ขึ้นรูปมาใหม่เกิดความเสียหายเล็กน้อยในการทดสอบที่ 4.2 กิโลกรัม เกิดเส้นสีขาวด้านที่โดนแรงกระแทก ไม่มีการแตกออกของแกน ไม่ส่งผลกระทบต่อด้านอื่นของแกนล้อย ในการทดสอบที่ 6.2 กิโลกรัม เกิดรอยแตกเล็กน้อยบริเวณที่โดนแรงกระแทก ไม่ส่งผลกระทบต่อด้านอื่นๆของแกนล้อยเช่นกัน ในการทดสอบที่ 9.2 กิโลกรัม พบว่ามีรอยแตกของแกนตามแนวด้านที่โดนแรงกระแทก แต่ล้อยไม่เกิดการแยกออกจากกัน ด้านอื่นๆของแกนล้อยไม่พบรอยแตกหรือรอยร้าวแต่อย่างใด และไม่มีการแตกออกจากกันจากการทดสอบทั้งสามค่าน้ำหนัก ซึ่งแกนที่นำกลับมาขึ้นรูปใหม่นี้การทดสอบแรงกระแทกไม่แตกต่างจากแกนที่ทางบริษัท บราวเวิ เอเซียนำมาใช้ในการผลิตล้อยางพอลิยูรีเทน และสามารถนำไปผลิตและใช้งานได้จริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.9 แกนที่ถูกทดสอบด้วยแรง 4.2, 6.2 และ 9.2 กิโลกรัม จากซ้ายไปขวาตามลำดับ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สหกิจศึกษานี้ในตอนแรกเป็นการศึกษาพัฒนาสูตรล้อยางพอลิยูรีเทน โดยเตรียมตัวอย่างจากพรีพอลิเมอร์และตัวขยายสายโซ่ โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องเวลาในการปั่นกวน พบว่าเวลาที่ใช้ในการปั่นกวนต้องเหมาะสม ไม่ช้าหรือเร็วเกินไป หากปั่นกวนช้าสารจะเกิดเจล ส่งผลให้ล้อยที่ได้เกิดริ้ว หากปั่นกวนเร็วจะเกิดการผสมที่ไม่เหมาะสม งานวิจัยนี้ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปที่เหมาะสมคือ 30 วินาที

จากการศึกษาความแตกต่างของการใช้ระบบสูญญากาศ พบว่าระบบสูญญากาศจำเป็นต้องทำอย่างยิ่งสำหรับการขึ้นรูปแบบผสมมือ จะทำให้เกิดฟองได้น้อยกว่า

จากการศึกษาอัตราส่วนของตัวขยายสายโซ่ พบว่าตัวขยายสายโซ่ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ไม่เช่นนั้นจะส่งผลต่อระยะเวลาการเกิดเจล ส่งผลต่อสมบัติ และสี

ตอนที่สอง การแยกแกลลออกจากยางพอลิยูรีเทนด้วยการกดอัด โดยทำการตัดล้อยในส่วนของการตัด 2 จุดนั้น ทำให้แยกล้อยออกจากยางพอลิยูรีเทนได้อย่างรวดเร็วและแยกออกจากกันได้ 100 % และทำการนำแกลลที่ได้ไปเข้าเครื่องบดและขึ้นรูปใหม่โดยพบว่าแกลลที่นำไปขึ้นรูปใหม่นั้นทนต่อแรงกระแทก และไม่แตกต่างจากแกลลที่ทางบริษัท บราโว เอเซีย นำมาใช้ในการขึ้นรูปสินค้า ในการขึ้นรูปล้อยถ้าหากเราใช้เม็ดพลาสติกเวอร์จินเพียงอย่างเดียวในการหลอมขึ้นรูป เราจะเสียค่าต้นทุนเม็ดพลาสติกอย่างน้อยก็โลกรัมละ 60 บาท ในการฉีดขึ้นล้อยหนึ่งครั้ง ใช้ประมาณ 15 กิโลกรัม ซึ่งนับเป็นราคา 900 บาท แต่ถ้าหากนำแกลลที่ได้มารีไซเคิลผสมกับเม็ดพลาสติกเวอร์จิน 20 % (3 กิโลกรัม) เราจะใช้เม็ดพลาสติกเวอร์จินเพียง 12 กิโลกรัมหรือราคา 720 บาท ประหยัดลง 20 % ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้ระบบสูญญากาศโดยการเพิ่มระบบสูญญากาศภายในให้มากขึ้น เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดฟองอย่างมีประสิทธิภาพ และลดเวลาการทำงานลง
2. ศึกษาสารเคมีที่มีส่วนช่วยในการลดฟอง นำมาปรับใช้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

3. ศึกษาสารเติมแต่งตัวอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อนำมาปรับใช้กับผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพที่ต้องการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] อธิพิณ แจ่มชัด. 2020. “เอกสารประกอบวิชา Rubber science and technology.”
กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Wikipedia. 2015. **Products of polyurethane** [online] Available:
[https://th.wikipedia-.org/polyurethane.](https://th.wikipedia-.org/polyurethane)
- [3] Abhijit Das, Prakash Mahanwar. 2022 “**A brief discussion on advances in polyurethane applications.**” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 3: 93-101.
- [4] Bravoasiawheel. 2000. **Brovoasia product** [online] Available:
[https://www.bravoasiawheels.com/products.](https://www.bravoasiawheels.com/products)
- [5] SCG. 2016. **SCG Circular Way** [online] Available:
[https://www.scg.com/sustainability/circular-economy.](https://www.scg.com/sustainability/circular-economy)
- [6] Lopez-Fonseca, R., Duque-Ingunza, I., de Rivas, B., Arnaiz, S. and Gutierrez-Ortiz, J. I. (2010). *Chemical recycling of post-consumer PET wastes by glycolysis in the presence of metal salts.* **Polymer Degradation and Stability**, 95(6): p. 1022- 1028.
- [7] J.H. Saunders, K.C. Frisch, *Chemistry and Technology*, Part I and II (Interscience Publishers., New York, 1962).
- [8] C. Hepburn, *Polyurethane elastomers* (AppliedScience, London, 1982).
- [9] G. Oertel, *Polyurethane Handbook* (Hanser Publishers, Munich, 1985).
- [10] Z.S. Petrović, *Polyurethanes* (Marcel Dekker, Inc., New York, 2005), 2nd edn. *Handbook of Polymer Synthesis.*
- [11] S.B.Clough, N.S.Schneider, A.O.King, *Journal of Macromolecular Science*, Part B: Physics B2 (4), 641 (1968).
- [12] K. Nakayama, T. Ino, I. Matsubara, *Journal of Macromolecular Science*, Part A: Chemistry A3 (5), 1005 (1969).
- [13] A. Tager, *Physical Chemistry of Polymers* (Mir Publishers, Moscow, 1978).
- [14] S.A. Visser, G. Pruckmayr, S.L. Cooper, *Macromolecules* 24(25), 6769 (1991).
- [15] C.S. Paik Sung, C.B. Hu, C.S. Wu, *Macromolecules* 13(1), 111 (1980).
- [16] O.E.A. Bolduan, R.S. Bear, *J. Polym. Sci.* 6, 271(1951).
- [17] J. Brandrup, E.H. Immergut (eds.), *Polymer Handbook* (Interscience Publishers, New York, 1975).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] J. Blackwell, M. Ross, *Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition* 17, 447 (1979).
- [19] R.J. Bonart, L. Morbitzer, G.J. Hentze, *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics* B3, 337 (1969).
- [20] R.J. Bonart, L. Morbitzer, E.H. Muller, *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics* B9(3), 447 (1974).
- [21] N.R. Legge, G. Holden, H.E. Schroeder (eds.), *Thermoplastic elastomers: a comprehensive review* (Hanser, Munich, 1987).
- [22] Cristina Prisacariu, 2000. **Polyurethane elastomers from morphology to mechanical aspects**, Pages 1-20.
- [23] K. Weissermel, H.J. Arpe, *Industrielle Organische Chemie*, 2nd edn. (Verlag Chemie, Weinheim, 1978).
- [24] D.H. Chadwick, E.E. Hardy, *Encyclopedia of Chem. Technology*, vol.12, 2nd edn. (Interscience, New York, 1967).
- [25] R. Vieweg, A. Hochtlen (eds.), *Kunststoff-Handbuch (Band VII)*. Polyurethane (Carl Hanser Verlag, Munchen, 1966).
- [26] D.K. Chattopadhyay, K.V.S.N. Raju, *Progress in Polymer Science* 32(3),352 (2007).
- [27] D.J. Lyman, J. Heller, M. Barlow, *Die Makromolekulare Chemie* 84(1), 64 (1965).
- [28] A.A. Caraculacu, G. Caraculacu, *Macromol.Sci. Chem.* A22, 631 (1995).
- [29] C. Prisacariu, R.H. Olley, A.A. Caraculacu, D.C.Bassett, C.Martin, *Polymer* 44(18), 5407 (2003).
- [30] I.R. Clemitson, 2008. **Castable Polyurethane Elastomers**, Pages 84-121.
- [31] Mir Mohammad Alavi Nikje, Amir Bagheri Garmarudi & Azni B. Idris, **Polyurethane Waste Reduction and Recycling: From Bench to Pilot Scales. Designed Monomers and Polymers**, (2011), Pages 395-421.
- [32] C. Diessel, C. Kliwer, G. Burak, E. Blumel and C. Kittel, US Patent No. 5,185,380 (1993).
- [33] R. Villwock, in: *Proceedings of the Polyurethanes Expo*, Columbus, OH, p. 373 (2001).
- [34] J. Scheirs, *Polymer Recycling: Science, Technology and Applications*. Wiley, Chichester (1998).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการแจ้งขึ้นเพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์จึงเผยแพร่ขึ้นที่นี้การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นผู้ใดมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [35] F. E. Mark and A. Kamprath, in: *Society of Automotive Engineers Conference*, paper 2000-01- 1514 (2000).
- [36] A. J. Hulme and T. C. Goodhead, *J. Mater. Process Technol.* 139, 322 (2003).
- [37] Y. Rogauime, F. Jabouille, M. Auzanneau and J. C. Goudeau, in: *Proceedings of the 5th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment*, Lisbon, p. 345 (1999).
- [38] R. P. Lattimer, M. J. Polce and C. Wesdemiotis, *J. Anal. Appl. Pyrol.* 48, 1 (1998).
- [39] J. W. Wu, W. F. Sung and S. H. Chu, *Int. J. Heat Mass Trans.* 42, 2211 (1999).
- [40] F. Mark and A. Calori, Technical Report 8028. APME, Brussels (1998).
- [41] L. A. A. Schöen, M. L. Beekes, J. van Tubergen and C. H. Korevaar, *Mechanical separation of mixed plastics from household waste and energy recovery in a pulverized coal-fired power station*. Technical report. APME, Brussels (2000).
- [42] F. E. Mark, *Polyurethane Energy Recovery and Feedstock Recycling Technology, A Summary Overview of Latest European Technologies*. DOW Europe, Horgen (2005).
- [43] Hainian Wang, et al. (2019) “**Laboratory evaluation on comprehensive performance of polyurethane rubber particle mixture**” *Construction and Building Materials* 224, Pages 29-39.
- [44] R. Janardhan, K. Ramamurthy, J. S. Anand. (1994) “**Solution Properties of Polyurethane**” *Polymer Testin* 13, Pages 397-404.
- [45] F.C. Aggenbacht “**Vacuum casting as a rapid manufacturing and prototyping option**”
- [46] Shan Cao, Shouhai Li, Mei Li, Lina Xu, Haiyang Ding, Jianling Xia, Meng Zhang and Kun Huang. (2017) “**A thermal self-healing polyurethane thermoset based on phenolic urethane**” *Polymer Journal*, pages 1–7.
- [47] Dale Lee Handlin, Jr., Steven, Soohyun Chin, Aisa Sendijarevic, Vahid Sendijarevic, Kurt C. Frisch. 1999. **Cast polyurethane elastomers containing low polarity amine curing agents** [online] Available: <https://patents.google.com/patent/US5955559>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของสารที่นำมาขึ้นรูปล้อยูรีเทน

-ADIPRENE® LF 753D

ADIPRENE® Low Free (LF) TDI prepolymer ใช้งานได้ในพอลิเอเทอร์ พอลิเอสเทอร์และ ส่วนประกอบของพอลิคาโพรแลคโตน พรีพอลิเมอร์เหล่านี้ใช้ในการหล่อขึ้นรูปอีลาสโตเมอร์และ ประยุกต์กับสารตัวเชื่อมโยงได้หลากหลาย เป็นผลให้ได้อีลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติเฉพาะตัวเมื่อเทียบกับ TDI พรีพอลิเมอร์ทั่วไป แต่ TDI ที่นำมาใช้มี TDI อิสระน้อยกว่า 0.1%

-VIBRACURE® 2107 LIQUID CHAIN-EXTENDER (สารเชื่อมโยง)

VIBRACURE® 2107 เป็นอะโรมาติกไดเอมีน (aromatic diamine) สารเชื่อมโยงที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยากับ TDI / LFTDI prepolymer เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องช่วยให้้ง่ายต่อการ ทำงานในกระบวนการ อุณหภูมิการใช้งานต่ำกว่าพรีพอลิเมอร์ และมีความไวต่อความชื้นน้อยกว่าสาร ที่เชื่อมโยงพอลิออล

-เสถียรภาพทางความร้อนของพรีพอลิเมอร์

ปริมาณ NCO ของพรีพอลิเมอร์จะลดลงตามเวลาที่สัมผัสกับความร้อน การได้รับความร้อน เป็นเวลานานจะส่งผลให้ความแข็งในขั้นสุดท้ายและสมบัติทางกายภาพของอีลาสโตเมอร์แข็งตัวช้า กว่าที่คาดไว้ อีกทั้งยังใช้เวลาในการถอดแบบนานขึ้น เวลาทำความร้อนสูงสุดที่แนะนำตามฟังก์ชัน ของอุณหภูมิแสดงดังตารางด้านล่าง

อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา
70	23 วัน
85	24 ชั่วโมง
100	8 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

- ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตัวขยายสายโซ่ที่ส่งผลต่อเวลาการเกิดเจล

สูตร	Gel time (min)
PU-1	2.40
PU-2	2.15
PU-3	1.45

- ผลความแข็งของล้อยพอลิยูรีเทนที่อ่านได้จากสูตรต่างๆ

สูตร	Hardness shore D			
	1 Day	3 Day	5 Day	7 Day
PU-1	73	74	75	75
PU-2	74	75	75	75
PU-3	75	75	75	75

- ผลความกระด้างของล้อยพอลิยูรีเทนที่อ่านได้จากสูตรต่างๆ

สูตร	Rebound (%)			
	1 Day	3 Day	5 Day	7 Day
PU-1	60	60	61	62
PU-2	60	61	61	63
PU-3	62	62	63	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลการหดตัวของล้อยพอลิยูรีเทนที่อ่านได้จากสูตรต่างๆ

สูตร	ขนาดของรูตลับลูกปืน			
	1 Day	3 Day	5 Day	7 Day
PU-1	21.85	21.85	21.87	21.87
PU-2	21.87	21.90	21.90	21.90
PU-3	21.90	21.90	21.90	21.90

*หมายเหตุ : ขนาดของแม่พิมพ์ 22 มิลลิเมตร

$$\text{อัตราการหดตัว} = \left(1 - \frac{\text{ขนาดของชิ้นงาน}}{\text{ขนาดของแม่พิมพ์}} \right) \times 100\%$$

สูตร	Shrink (%)			
	1 Day	3 Day	5 Day	7 Day
PU-1	0.68	0.68	0.59	0.59
PU-2	0.59	0.45	0.45	0.45
PU-3	0.45	0.45	0.45	0.45

- ผลการแยกแกนล้อยออกจากล้อยพอลิยูรีเทน

จำนวนจุดตัด	จำนวนการกดอัด (ครั้ง)	
	แนวนอน	แนวตั้ง
1	1	1
2	1	1
3	1	2
4	1	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มสหกิจศึกษา

วันที่ 25 เดือน พฤษภาคม พ.ศ 2566

ข้าพเจ้า นางสาวจุฑารัตน์ รัตนะแพร รหัสประจำตัว 62050267

นางสาวรุจิภาญจน์ ส่งศรี รหัสประจำตัว 62050323

นายอโนชา เหล่าพระจันทร์ รหัสประจำตัว 62050354

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าสหกิจศึกษา เรื่อง

การศึกษาตัวอย่างพอลิยูรีเทนด้วยการขึ้นรูปแบบผสมมือและการรีไซเคิลผลิตภัณฑ์จากเศษขยะตัวอย่าง

Study of polyurethane rubber wheels by using hand mixing process and recycled products from wheel waste

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมอักษรวินิจฉัย 2.47 %

ลงชื่อ.....จุฑารัตน์.....

(นางสาวจุฑารัตน์ รัตนะแพร)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....รุจิภาญจน์.....

(นางสาวรุจิภาญจน์ ส่งศรี)

นักศึกษา

ลงชื่อ.....อโนชา.....

(นายอโนชา เหล่าพระจันทร์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาสหกิจศึกษา ได้ตรวจสอบสหกิจศึกษาของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....อิทธิพล.....
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 อาจารย์ที่ปรึกษา
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้