

การพัฒนาสารลดแบบถาวรอย่างสุตริงถาวร
สำหรับอุตสาหกรรมยางรถยนต์

DEVELOPMENT OF SEMI-PERMANENT BLADDER RELEASE AGENTS
FOR TIRE MANUFACTURING INDUSTRY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

KMITL-2023-SC-M-012-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF SEMI-PERMANENT BLADDER RELEASE AGENTS
FOR TIRE MANUFACTURING INDUSTRY



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

2023

KMITL-2023-SC-M-012-002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาสารถอดแบบถุงลมยางสูตรกึ่งถาวร สำหรับ อุตสาหกรรมยางรถยนต์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนพวรรณ ตันบริรักษ์
รหัสประจำตัว	62605077
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาสูตรน้ำยาสารถอดแบบซิลิโคน หรือพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) ชนิดกึ่งถาวรของถุงลมยางสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ นอกจากนี้ยังศึกษาวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยขั้นตอนแรกคือการเตรียมตัวอย่างน้ำยาสารถอดแบบ โดยใช้เครื่องผสมเชิงกล และทำการพ่นน้ำยาตัวอย่างลงบนพื้นผิวของชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุงลมยาง จากนั้นทำการอบด้วยเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้ให้น้ำยาแห้ง และคงรูปขึ้น ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณการใช้พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (Polymethylhydrogensiloxane, PMHS) ผลของชนิดและปริมาณของสารคู่ควบไซเลน และการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G133-05 ในการใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ โดยมีหัวกดเป็นลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ในการนำมาศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และระยะทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ถึงความทนทานของสารถอดแบบและอายุการใช้งานของสารถอดแบบ รวมถึงการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฟิล์มสารถอดแบบจากจำนวนรอบในการอัดขึ้นรูปซ้ำของกรีนไทร์ที่เป็นยางคอมพาวด์ และชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุงลมยางจากการเติม PDMS 5% ผสมกับ PMHS ปริมาณ 0-6% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มสารถอดแบบมีแนวโน้มลดลง และมีความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบที่สูงขึ้น ดังแสดงจากระยะการเคลื่อนที่ของหัวกดที่เพิ่มขึ้นจากการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นจากการเติม PMHS มากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณของ PMHS ที่เหมาะสมเท่ากับ 4% และจากการศึกษาชนิดของสารคู่ควบไซเลน ได้แก่ อะมิโน (Asi), อีพอกซี (Esi) และเมทาคริลิก (Msi) พบว่าอะมิโนไซเลนได้ผลการทดสอบที่ดีกว่าชนิดอื่น จากการศึกษ ปริมาณ Asi ที่ 0-3% พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่การใช้ Asi 1% ส่งผลให้ได้ฟิล์มสารถอดแบบมีการเคลื่อนที่ของหัวกดในระยะทางสูงสุด ยืนยันด้วยจำนวนรอบของการทดสอบการถอดแบบจากเครื่องกดอัดขึ้นรูป ดังนั้นน้ำยาสารถอดแบบสูตรที่มีความเหมาะสมในงานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ดี และฟิล์มของสารถอดแบบมีความทนทานที่ดีกว่าสารถอดแบบ
อีก 2 ชนิดที่มีอยู่ในท้องตลาด จึงสรุปได้ว่าน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาขึ้นในงานนี้แสดงถึง
ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะมีศักยภาพที่ดีในการพัฒนาเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอวิธีการทดสอบ
ประสิทธิภาพของสารถอดแบบสำหรับใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาสารถอดแบบในอุตสาหกรรมการ
ผลิตยางรถยนต์

คำสำคัญ : พอลิโดเมทิลไซลอกเซน, พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน, สารคู่ควบไซเลน, น้ำยา-
สารถอดแบบชนิดซิลิโคน, ไตรโบมิเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of Semi-Permanent Bladder Release Agents for Tire Manufacturing Industry
Student Name	Miss Noppawan Tanboriphan
Student ID	62605077
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

Abstract

This research was focused on developing semi-permanent silicone (or polydimethylsiloxane, PDMS) release agent formulas of “bladder” for tire manufacturing industry. Methods for testing release agent efficiency were also studied. Solution samples were first prepared using a mechanical stirrer and sprayed on bladder substrate. Hot air oven at 150 °C for 20 min was used to dry and cure the coating. Studied factors in the work included %polymethylhydrogensiloxane (PMHS) loadings, effects of types and %loadings of silane coupling agents. According to ASTM G133-05, a reciprocating tribometer using tungsten carbide probe was used to study for frictional coefficient and moving distance indicating coating durability and service life of the coatings. Comparative study of release agent efficiency was also carried out by number of repeated compression molding of green tread compounded samples and coated bladder samples. By adding 0-6 % PMHS to 5% PDMS solution, it was found that frictional coefficients of the coatings had a trend to decrease with better film durability as shown by longer moving distances of the tribometer probe. This could be explained by increasing crosslinked structures as the PMHS loading was increased. However, an optimum PMHS loading (4%) was found in this work. By studying the types of the coupling agents, i.e., amino (Asi), epoxy (Esi) and methacrylic (Msi) silane coupling agents, minor improvement was found by using amino (Asi) one. As Asi loading was increased (0-3%), frictional coefficients of the sample surfaces were improved, however, insignificant differences in the values were found. By using 1% Asi coupling agent, the longest moving distance was achieved. This result was confirmed by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

numbers of the repeating compression molding test. It was found that an optimum formula release agent in this work yielded better frictional coefficient and more durable coating than those of two commercially available release agents in the market. It can be concluded that bladder release agent developed in this work showed promising results with high potential for commercial development. In addition, methods for testing bladder release agent efficiency were proposed as guidelines for developing release agents in tire industry.

Key words: Polydimethylsiloxane (PDMS), Polymethylhydrogensiloxane (PMHS), Silane coupling agent, Semi-permanent bladder release agents, Tribometer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้บรรลุผลสำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือ คำปรึกษา ตลอดจนคำแนะนำจากบุคคลผู้มีพระคุณดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ และตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณบุญยวัฒน์ อธิระเวศน์กุล กรรมการบริษัท บริษัท แอ็คคิม อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในดำเนินการปฏิบัติการทดลองงานวิจัย รวมถึงคุณประกาศิต บานชื่น คุณนันทน์ภัส โคระทัต และคุณระพีพัฒน์ เป็งวันปลูก ในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา และให้ความรู้ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ดร.สิทธิพงศ์ มหาธนบดี จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับการใช้เครื่องโทรโบมิเตอร์ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากทางโครงการ การพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (ITAP) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานอุตสาหกรรมเคมี และพอลิเมอร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมืออำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ และอาคารสถานที่สำหรับปฏิบัติ รวมทั้งคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจสำคัญตลอดการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวนพวรรณ ต้นบริรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายอักษรย่อในงานวิจัย	ตม
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 สารถอดแบบ (Release agents)	8
2.1.1 ชนิดของสารถอดแบบ	8
2.1.2 กลไกของการยึดติด	10
2.1.3 วิธีการใช้สารถอดแบบ	13
2.1.4 การใช้งานสารถอดแบบ.....	15
2.2 องค์ประกอบของสารถอดแบบ	16
2.2.1 ซิลิโคน (Silicone).....	17
2.2.1.1 สมบัติทั่วไปของซิลิโคน	19
2.2.1.2 ประเภทของซิลิโคน.....	20
2.2.1.3 ข้อดี และข้อเสียของซิลิโคน	21
2.2.2 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent).....	22
2.2.2.1 สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน (Amino silane coupling agent)	24
2.2.2.2 สารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซี (Epoxy silane coupling agent)....	24
2.2.2.3 สารคู่ควบไซเลนชนิดเมทาคริลิก (Methacrylic silane coupling agent)	25
2.2.3 สารเพิ่มความเปียก (Wetting agent).....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR).....	26
2.4 ยางฮาโลบิวทิล (Halobutyl Rubber, XIIR)	27
2.5 ถุงลมยาง (Bladder).....	28
2.5.1 การใช้งานของถุงลมยาง	28
2.5.2 การบำรุงรักษาถุงลมยางในระหว่างใช้งาน.....	29
2.5.3 สมบัติที่ต้องการของถุงลมยาง	29
2.5.4 ลักษณะข้อบกพร่องของถุงลมยาง	30
2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	31
2.6.1 ไตรโบโลยี (Tribology)	31
2.6.1.1 การทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer).....	32
2.6.1.2 การเสียดทาน (Friction).....	33
2.6.1.2.1 ทฤษฎีการเสียดทาน	34
2.6.1.2.2 การเกิดความเสียหายในระดับจุลภาค	35
2.6.1.2.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานต่อเวลา	36
2.6.1.2.4 กฎ และสมการแรงเสียดทาน	37
2.6.1.3 การสึกหรอ (Wear).....	38
2.6.1.4 การหล่อลื่น (Lubrication).....	41
2.6.2 กระบวนการกดอัดขึ้นรูป (Compression molding).....	43
2.6.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM).....	44
2.6.4 การใช้งานที่กระบวนการผลิตจริง	46
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	55
3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	55
3.1.1 สารเคมี.....	55
3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย.....	56
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย	57
3.2.1 การเตรียมน้ำยาสารถอดแบบ	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1.1 ศึกษาปริมาณของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซนในน้ำยา	
สารถอดแบบ.....	59
3.2.1.2 ศึกษาชนิดของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ในน้ำยา	
สารถอดแบบจากสูตร 5DM4MH	59
3.2.1.3 ศึกษาปริมาณของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ใน..	
น้ำยาสารถอดแบบจากสูตร 5DM4MH1Asi	61
3.2.1.4 การศึกษาผลของน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาเปรียบเทียบกับ	
น้ำยาสารถอดแบบทางการค้า.....	61
3.2.2 การทำชิ้นงานอย่างที่ใช้จำลองเป็นถูลมยาง	62
3.2.3 วิธีการเคลื่อนน้ำยาสารถอดแบบบนชิ้นงานอย่างที่ใช้จำลองเป็นถูลมยาง.....	63
3.2.4 วิธีการทดสอบน้ำยาสารถอดแบบ.....	64
3.2.4.1 การทดสอบสารถอดแบบโดยใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์.....	64
3.2.4.2 การทดสอบสารถอดแบบโดยใช้เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression	
molding machine).....	65
3.2.4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบจากการทดสอบการกดอัดขึ้น	
รูปด้วยโปรแกรม ImageJ.....	68
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	69
4.1 การศึกษาผลของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (PMHS)	70
4.2 การศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลน	76
4.3 การศึกษาผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมีโน.....	86
4.4 การศึกษาผลของน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบ	
ทางการค้า.....	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสีย ของสารถอดแบบสูตรถาวร และกึ่งถาวร.....	9
2.2 การเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของซิลิโคน	21
2.3 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลน	25
2.4 ตัวอย่างข้อบกพร่อง หรือตำหนิต่าง ๆ ที่พบในถลุงมยาง	30
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสึกหรอ.....	43
3.1 สมบัติบางประการของยางคอมพาวด์บิวทิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	56
3.2 สมบัติบางประการของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้	56
3.3 รายละเอียดบางประการของเครื่องไตรโบมิเตอร์	57
3.4 ปริมาณของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซนในน้ำยาสารถอดแบบ	59
3.5 ชนิดของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ที่ปริมาณ 1%wt ในน้ำยาสารถอดแบบ จากสูตร 5DM4MH.....	60
3.6 ชนิดของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ที่ปริมาณ 2%wt ในน้ำยาสารถอดแบบ จากสูตร 5DM4MH.....	60
3.7 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ในน้ำยาสารถอดแบบจากสูตร 5DM4MH1Asi.....	61
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางที่มีปริมาณของ PMHS ต่างกัน เมื่อทำการเคลือบฟิล์มสารถอดแบบ.....	70
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนที่ 1% และ 2%wt เมื่อทำการเคลือบฟิล์มสารถอดแบบ.....	77
4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบสูตร 5DM4MH1Asi	84
4.4 การวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบแม่พิมพ์เมื่อมีสารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน โดยศึกษาในรอบที่ 35 ของการทดสอบการถอดแบบ	85
4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางที่มีปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนต่างกัน เมื่อทำการเคลือบฟิล์มสารถอดแบบ.....	86
4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางเมื่อทำการเคลือบฟิล์มสารถอดแบบ โดยเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กรีนไทร์ (Green tire).....	2
1.2 การอบ และการวัลคาไนซ์ (Curing and vulcanizing).....	2
1.3 ถุงลมยาง (Bladder).....	2
1.4 หลักการทำงานในกระบวนการวัลคาไนซ์ยางล้อ	3
1.5 การยึดติดกันของถุงลมยาง หรือแบลตเตอร์กับชั้นในของกรีนไทร์	3
2.1 การเกิดพันธะเคมีระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุ	11
2.2 ลักษณะการแพร่ระหว่างกัน	11
2.3 การดึงดูทางไฟฟ้าสถิต	12
2.4 พลังงานพื้นผิว และความสามารถในการยึดเกาะ	12
2.5 การยึดเกาะทางกล.....	13
2.6 การพ่น (Spraying).....	14
2.7 การทา (Swabbing and Painting).....	14
2.8 การเช็ด (Wiping).....	15
2.9 การจุ่ม (Dipping).....	15
2.10 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS).....	17
2.11 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมทิลไฮโดรเจนซิลอกเซน (Polymethyl hydrogen siloxane, PMHS).....	17
2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของ PDMS กับ PMHS เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม โดยพันธะ Si-H ถูกแทนที่ด้วยพันธะ Si-C.....	21
2.13 รูปแบบการยึดเกาะของสารคู่ควบไซเลน	22
2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลน.....	23
2.15 โครงสร้างของยางบิวทิล.....	26
2.16 ถุงลมยาง และยางล้อดิบที่ประกอบเข้ากับแม่พิมพ์เพื่อทำการขึ้นรูป.....	29
2.17 ยางล้อหลังทำการบ่มสุก	29
2.18 เครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์.....	32
2.19 หัวกดลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ของเครื่องไตรโบมิเตอร์	33
2.20 องค์ประกอบของการเสียดทานแบบเลื่อนไถล (Sliding friction) (a) การยึดติด (b) การไถครูด (c) การเสียรูปของปลายยอดของความหยาบผิว.....	35
2.21 การเปลี่ยนแปลงกลไกการเสียดทานที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าในช่วงเริ่มต้นของการเลื่อนไถล ...	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear).....	38
2.23 การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear).....	39
2.24 การสึกหรอแบบการล้า (fatigue wear)	39
2.25 การสึกหรอแบบไตรโบเคมีคอล (Tribochemical wear).....	40
2.26 ขั้นตอนการเกิดสึกหรอแบบไตรโบเคมีคอล (Tribochemical wear)	40
2.27 สถานะการหล่อลื่นแบบแห้ง.....	41
2.28 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี.....	42
2.29 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบผสม	42
2.30 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์	43
2.31 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)	44
2.32 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM)	44
2.33 หลักการของเลนส์ในกล้องจุลทรรศน์.....	45
2.34 กระบวนการเชื่อมโยงยางล้อ.....	46
3.1 แผนผังลำดับขั้นตอนของการวิจัยสูตรสารถอดแบบแม่พิมพ์	58
3.2 แม่พิมพ์สำหรับทำแบบจำลองยาง.....	62
3.3 แม่พิมพ์สำหรับใส่ยางในการทดสอบ	62
3.4 แผนผังการเคลือบน้ำยาสารถอดแบบแม่พิมพ์บนชิ้นงานยาง	63
3.5 เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine).....	65
3.6 แม่พิมพ์เหล็กสำหรับใช้ในการทดสอบการถอดแบบ	66
3.7 นำกรีนไทร์วางบนชิ้นงานยางที่ทำการเคลือบสารถอดแบบ	66
3.8 การดึงยางที่เชื่อมโยงแล้วออกจากชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบ	66
3.9 แผนผังการทดสอบสารถอดแบบโดยใช้เครื่องกดอัดขึ้นรูป.....	67
3.10 แผนผังการวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบด้วยโปรแกรม ImageJ.....	68
4.1 (ก) ฟิล์มสารถอดแบบที่ถูกเคลือบอยู่บนชิ้นงานยาง (ข) หัวกดของเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่เคลื่อนที่ ไป-กลับบนฟิล์มสารถอดแบบในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ (ค) หัวกดของเครื่อง ไตรโบมิเตอร์ที่เคลื่อนที่ไป-กลับบนฟิล์มสารถอดแบบในระยะเวลาที่นานขึ้นจนฟิล์มสารถอด- แบบเกิดการสึกหรอจนถึงพื้นผิวของชิ้นงานยาง.....	71
4.2 ผลของปริมาณของ PMHS ที่มีผลต่อค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบแสดงผลในรูปแบบของ ระยะทางที่หัวกดไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ของน้ำยาสารลดแบบ สูตร 5DM4MH (ข) फिल्मสารลดแบบที่ได้จากกล่อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คองที่ (ค) फिल्म สารลดแบบที่ได้จากกล่อง OM เมื่อลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง.....	73
4.4 การเชื่อมโยงแบบโครงตาข่าย 3 มิติของ PDMS และ PMHS.....	74
4.5 ผลของปริมาณของ PMHS ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หวัคไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่.....	75
4.6 ผลของปริมาณของ PMHS ที่มีผลต่อความสามารถในการลดแบบ.....	76
4.7 ชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1% และ 2%wt ที่มีผลต่อค่าความหนานของฟิล์ม สารลดแบบแสดงผลในรูปของระยะทางที่หวัคไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่.....	78
4.8 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ (ข) फिल्मสารลดแบบ ที่ได้จากกล่อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คองที่ (ค) फिल्मสารลดแบบที่ได้จากกล่อง OM เมื่อ ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง.....	79
4.9 การทำงานของสารคู่ควบไซเลนต่อสารลดแบบ และชิ้นงานยาง	80
4.10 รูปแบบของชั้นสารลดแบบบนพื้นผิวของชิ้นงานยาง	80
4.11 ชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1% และ 2%wt ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หวัคไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่	81
4.12 ชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1% และ 2%wt ที่มีผลต่อความสามารถในการลดแบบ	82
4.13 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีผลต่อค่าความหนานของฟิล์มสารลดแบบ แสดงผลในรูปของระยะทางที่หวัคไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่.....	87
4.14 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หวัคไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่.....	88
4.15 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีผลต่อความสามารถในการลดแบบ.....	89
4.16 การเปรียบเทียบน้ำยาสารลดแบบที่มีผลต่อค่าความหนานของฟิล์มสารลดแบบแสดงผลใน รูปของระยะทางที่หวัคไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่.....	91
4.17 การเปรียบเทียบน้ำยาสารลดแบบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หวัคไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่.....	92
4.18 การเปรียบเทียบน้ำยาสารลดแบบที่มีผลต่อความสามารถในการลดแบบ.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบแจ้งลิขสิทธิ์แล้ว กรุณา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.1 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ (ข) फिल्मสารถอดแบบที่ได้จากกล้อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ (ค) फिल्मของสารถอดแบบเมื่อลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง.....	105
ค.2 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ (ข) फिल्मสารถอดแบบที่ได้จากกล้อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ (ค) फिल्मของสารถอดแบบเมื่อลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง.....	106



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายอักษรย่อในงานวิจัย

PDMS	=	Polydimethylsiloxane
PMHS	=	Polymethylhydrogensiloxane
Asi	=	N-2-(Aminoethyl)-8-aminooctyltrimethoxysilane
Esi	=	3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane
Msi	=	3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane
DBT	=	Dibutyl Tin Dilaurate
t_{s2}	=	เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time)
t_{c90}	=	เวลาการเชื่อมโยง (Cure time)
IIR	=	Isobutylene Isoprene Rubber
XIIR	=	Halobutyl Rubber
OM	=	Optical Microscope
FTIR	=	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
rpm	=	Revolutions Per Minute หรือรอบต่อนาที
5DM	=	5%PDMS
5DM2MH	=	5%PDMS และ 2%PMHS
5DM4MH	=	5%PDMS และ 4%PMHS
5DM6MH	=	5%PDMS และ 6%PMHS
5DM4MH1Asi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 1%Asi
5DM4MH1Esi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 1%Esi
5DM4MH1Msi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 1%Msi
5DM4MH2Asi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 2%Asi
5DM4MH2Esi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 2%Esi
5DM4MH2Msi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 2%Msi
5DM4MH0.5Asi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 0.5%Asi
5DM4MH1.5Asi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 1.5%Asi
5DM4MH3Asi	=	5%PDMS, 4%PMHS และ 3%Asi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภูมิภาคเอเชียแปซิฟิกเป็นแหล่งผลิตยางพาราที่สำคัญที่สุดของโลก คิดเป็น 90.5% ของผลผลิตยางพาราทั่วโลก โดยประเทศไทยมีผลผลิตยางพาราเป็นอันดับ 1 ของโลก ประมาณ 4.87 ล้านตัน หรือ 33.4% ของผลผลิตโลก รองลงมา ได้แก่ อินโดนีเซีย เวียดนาม จีน และมาเลเซีย มีสัดส่วน 24.7%, 8.5%, 6.4%, และ 3.8% ตามลำดับ [1] ผลิตภัณฑ์ยางพาราถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมภายในประเทศ เนื่องจากการขยายฐานการผลิตของอุตสาหกรรมจากต่างประเทศ โดยใช้ในอุตสาหกรรมยางล้อเป็นหลัก และอุตสาหกรรมแบบจุ่ม เช่น ถุงมือยาง นอกจากนี้ภาครัฐยังมีการสนับสนุนให้นายางพารามาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ภายในประเทศรวมถึงส่งเสริมให้มีการใช้ยางพาราในหน่วยงานภาครัฐเพิ่มมากขึ้น [2] โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์กลุ่มยางล้อเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจไทย เนื่องด้วยเป็นผลิตภัณฑ์ส่งออกสำคัญที่สร้างรายได้กว่า 5,071.7 ล้านเหรียญสหรัฐ ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตยานยนต์ขนาดใหญ่อันดับที่ 11 ของโลก เป็นอันดับที่ 5 ในภูมิภาคเอเชีย และเป็นอันดับที่ 1 ในกลุ่มประเทศอาเซียน [3] ซึ่งอัตราการเติบโตของการผลิตโดยรวมขยายตัวมาโดยตลอด ทำให้อุตสาหกรรมการผลิตยางล้อจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการเติบโตทางเศรษฐกิจไทยทั้งในปัจจุบัน และในอนาคต

สำหรับกระบวนการผลิตยางล้อ ในขั้นตอนการให้ความร้อน เพื่อเชื่อมโยง หรือการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) เป็นการนำยางคอมพาวด์ที่ถูกขึ้นรูปเบื้องต้นเป็นโครงสร้างยางล้อที่ยังไม่ได้เชื่อมโยงเรียกว่า กรีนไทร์ (Green tire) แสดงดังรูปที่ 1.1 มาใส่เข้าไปในแม่พิมพ์ (Mold) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้แก่ยางจนเกิดการสุกตัว (Cured tire) แสดงดังรูปที่ 1.2 มีการใช้อุปกรณ์ที่สำคัญคือ “ถุงลมยาง” หรือแบลตเตอร์ (Bladder) ที่ทำจากยางบิวทิล (Butyl rubber) แสดงดังรูปที่ 1.3 อยู่ที่บริเวณส่วนกลางภายในแม่พิมพ์ โดยทำหน้าที่ขยายตัวพร้อมกับให้ความร้อน โดยไอน้ำร้อน (Steam) ภายในถุงลมยางมีอุณหภูมิ และความดันสูงเพื่อให้ถุงลมยางขยายขึ้นจนดันให้กรีนไทร์ (Green tire) ไปแนบติดกับแม่พิมพ์ (Mold) แล้วเกิดการเชื่อมโยงทำให้ได้รูปทรงของยางล้อตามที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.1 กรีนไทร์ (Green tire) [4]

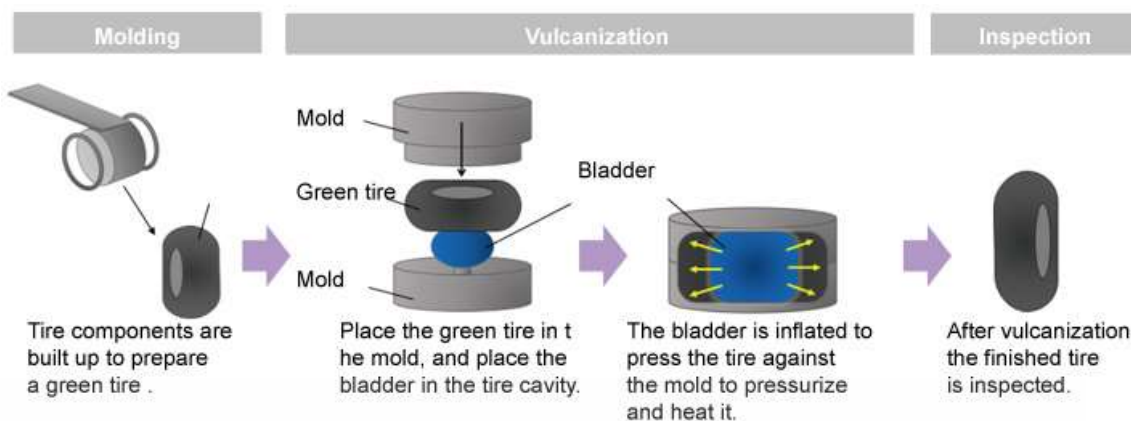


รูปที่ 1.2 การอบยาง และการวัลคาไนซ์ (Curing and vulcanizing) [5]



รูปที่ 1.3 ถุงลมยาง (Bladder) [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.4 หลักการทำงานในกระบวนการวัลคาไนซ์ยางล้อ [7]

ปัญหาสำคัญที่พบได้ในกระบวนการนี้คือ การยึดติดกันของถุงลมยาง หรือแบลดเดอร์ (Bladder) กับชั้นในของกรีนไทร์ (Green tire) แสดงดังรูปที่ 1.5 ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นยางบิวทิล (Butyl inner liner) ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของยางล้อ และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับถุงลมยาง ทำให้อายุการใช้งานลดลง ปัจจุบันมีการใช้สารถอดแบบ (Release agent) หรือสารกันติดเคลือบพื้นผิว มีประสิทธิภาพในการป้องกันการยึดติดกันระหว่างถุงลมยาง หรือแบลดเดอร์ (Bladder) กับกรีนไทร์ (Green tire) ที่ขึ้นรูปเป็นยางล้อ ซึ่งสารถอดแบบทำให้เกิดฟิล์มหล่อลื่นที่เพียงพอให้ไม่เกิดการยึดติดกันเมื่อมีการสัมผัสกันของทั้งสองพื้นผิว



รูปที่ 1.5 การยึดติดกันของถุงลมยาง หรือแบลดเดอร์กับชั้นในของกรีนไทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมยางล้อ มีความต้องการน้ำยาสารลดแบบสำหรับถุงลมยางที่มีประสิทธิภาพ โดยใช้เพื่อป้องกันการติดกันระหว่างถุงลมยาง และกรีนไทร์ที่ขึ้นรูปเป็นยางล้อในกระบวนการอบยาง หรือการวัลคาไนซ์ยางล้อ สารลดแบบที่มีประสิทธิภาพที่ดี มีผลในการช่วยลดความเสียหาย และเพิ่มประสิทธิผลในการผลิตยางล้อได้ สำหรับสารลดแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีลักษณะเป็นชั้นฟิล์มอยู่บนพื้นผิวของถุงลมยาง เมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตยางล้อยังคงมีการพ่นน้ำยาสารลดแบบซ้ำ โดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของน้ำยาสารลดแบบ และตามที่แต่ละโรงงานกำหนด ซึ่งน้ำยาสารลดแบบที่มีการใช้งานแบบนี้เรียกว่า “น้ำยาสารลดแบบสูตรกึ่งถาวร” (Semi-permanent bladder release agents) สำหรับการใช้งานแบ่งออกเป็นหลายลักษณะเช่น การพ่นน้ำยาทุก ๆ ช่วงเวลาเมื่อครบ 6 หรือ 12 ชั่วโมง (เปลี่ยนกะ) หรือการนับจากจำนวนรอบของยางล้อที่ถอดแบบออกแล้วทำการพ่นน้ำยาซ้ำ เช่น ยาง PCR (Passenger Car Tire) ทำการพ่นน้ำยาทุก ๆ 20 หรือ 40 รอบ เป็นต้น

หนึ่งในอุปสรรคของการศึกษาสารลดแบบของถุงลมยางสำหรับอุตสาหกรรมยางล้อคือการทดสอบประสิทธิภาพของสารลดแบบ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือทดสอบที่เหมือนการใช้งานจริงสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของสารลดแบบที่โรงงานจริงมีความเป็นไปได้ที่ค่อนข้างยากเนื่องจากทางโรงงานมีการผลิตอย่างต่อเนื่องเป็นประจำ ทำให้ไม่สามารถหยุดกระบวนการผลิตของโรงงานเพื่อทำการทดสอบได้ เพราะเป็นการเสียทั้งเวลา และต้นทุนในการผลิตของทางโรงงาน อีกทั้งในปัจจุบันยังไม่มีวิธีใดเป็นมาตรฐานในการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาสารลดแบบ ทำให้เกิดแนวคิดจากการทำงานของถุงลมยาง หรือแบลดเดอร์ (Bladder) ที่มีการขยายตัว โดยมีการสัมผัสกับชั้นในของกรีนไทร์ (Green tire) ที่มีองค์ประกอบเป็นยางบิวทิล (Butyl inner liner) ซึ่งทำให้เกิดการเสียดสีขัดถูกัน และเมื่อแม่พิมพ์เปิดออกถุงลมยางเกิดการหดตัวออกจากชั้นในของกรีนไทร์ ซึ่งมีการสัมผัสกันอีกครั้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการศึกษาการประยุกต์ใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีการเปลี่ยนแปลงไปของฟิล์มสารลดแบบ โดยสอดคล้องกับความทนทานของฟิล์มสารลดแบบ สำหรับใช้ในการประเมินความสามารถในการลดแบบของน้ำยาสารลดแบบที่ทำการพัฒนาขึ้น

งานวิจัยเรื่อง “อิทธิพลของสารลดแบบแม่พิมพ์ที่มีต่อการยึดติดของวัสดุแม่พิมพ์” [8] ซึ่งเป็นงานวิจัยร่วมกันระหว่างภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือกับบริษัท แอ็คคิม อินเตอร์เนชันแนล (ประเทศไทย) จำกัด โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของสารลดแบบ ซึ่งมีการจำลองสภาวะการทดสอบจากการใช้งานจริงขณะทำการขึ้นรูปขึ้นงานยาง รวมถึงศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทดสอบประสิทธิภาพของสารลดแบบ โดยมีวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของสารลดแบบด้วยการลื่นไถลแบบไป-กลับจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นภายใต้โครงการวิจัย ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความทนทานของฟิล์มของสารลดแบบเมื่อถูกเคลือบอยู่บนพื้นผิวยาง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการทดสอบเพิ่มขึ้น เมื่อชั้นฟิล์มเกิดการเสื่อมสภาพไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องไปในทางเดียวกันกับผลที่ได้จากเครื่องทดสอบในห้องปฏิบัติการจากต่างประเทศ ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐาน ASTM-G133-05 [9]

งานวิจัยนี้จึงมีความประสงค์ในการทำการศึกษ และพัฒนาน้ำยาสารถอดแบบ ซึ่งเป็นความร่วมมือกันระหว่างภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กับบริษัท แอ็คมี อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ทำการพัฒนาวิจัยสารถอดแบบ และทำการเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า ณ ปัจจุบันของบริษัท แอ็คมี อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด โดยทำการเปรียบเทียบจากการพัฒนาคุณภาพน้ำยาสารถอดแบบให้ดีขึ้นเมื่อทำการวัดผลในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาน้ำยาสารถอดแบบชนิดกึ่งถาวรให้สามารถใช้งานได้ยาวนานมากยิ่งขึ้นต่อการพ่นหนึ่งรอบ เพื่อให้ใกล้เคียงกับน้ำยาสารถอดแบบชนิดถาวร จึงทำการศึกษา และพัฒนาสารถอดแบบถาวรแบบกึ่งถาวร (Semi-permanent bladder release agents) โดยที่สารถอดแบบนี้ มีการพัฒนามาจากสารในกลุ่มซิลิโคนที่เป็นพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) ที่มีสมบัติในด้านของการทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูง มีความยืดหยุ่นที่ดี และเป็นวัสดุที่มีค่าพลังงานพื้นผิว หรือแรงตึงผิวต่ำ (Low surface energy) เพื่อให้มีสมบัติการยึดติดกับวัสดุอื่น ๆ นั้นลดลง หรือไม่เกิดการติดกัน และมีความทนทานต่อการขึ้นรูปซ้ำ ๆ ได้ เพื่อให้ น้ำยาสารถอดแบบ หรือวัสดุเคลือบกันติดนี้ต้องมีความสามารถในการขยายตัว และหดตัวได้ เหมือนกับถาวรแบบ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มสมบัติในด้านความลื่นของสารเคลือบบนพื้นผิว และเป็นการเพิ่มการเชื่อมโยงโดยการใช้สารกลุ่มซิลิโคนที่เป็นพอลิเมทิลไฮโดรเจนซิลอกเซน (Polymethyl hydrogen siloxane, PMHS) [10] และสารคู่ควบซิลิโคน (Silane coupling agent) ที่ทำหน้าที่ช่วยให้น้ำยาสารถอดแบบสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวได้ดี จึงช่วยเพิ่มความทนทานของน้ำยาสารถอดแบบทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบจากการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ที่มีลูกบอลทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง โดยเคลื่อนที่แบบไป-กลับ (ตามมาตรฐาน ASTM G133-05) [9] และทำการยืนยันผลการทดสอบจากจำนวนรอบของการถอดแบบชิ้นงานยางผ่านเครื่องกดอัดขึ้นรูป วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาสารถอดแบบถาวรแบบกึ่งถาวร (Semi-permanent bladder release agents) ที่มีประสิทธิภาพในการถอดแบบได้ดีกว่าน้ำยาสารถอดแบบที่มีอยู่ในปัจจุบันของบริษัท และมีความใกล้เคียงกับน้ำยาสารถอดแบบถาวร (Permanent bladder release agents) ซึ่งทำให้มีผลผลิตในการผลิตเพิ่มมากขึ้น คุณภาพของยางล้อมีความสม่ำเสมอ [11] ประหยัดเวลาในการพ่นน้ำยาสารถอดแบบซ้ำ ลดการสัมผัสสารเคมีของพนักงานฝ่ายผลิต และเพื่อให้กระบวนการผลิตยางล้อสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาสูตรสารถอดแบบลงมยางชนิดกึ่งถาวร (Semi-permanent bladder release agents) ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) โดยเน้นศึกษาปัจจัยบางประการที่มีผลต่อน้ำยาถอดแบบ ได้แก่ ปริมาณของพอลิเมทิลไฮโดรเจน-ไซลอกเซน (Polymethyl hydrogen siloxane, PMHS) ชนิด และปริมาณของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent)

2. พัฒนารีวิวทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาถอดแบบ โดยการประยุกต์ใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบ รวมถึงการวัดจำนวนรอบของการถอดแบบจากเครื่องกดอัดขึ้นรูป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การทบทวนงานวิจัย และสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมน้ำยาถอดแบบสูตรเริ่มต้นที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) โดยทำการทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของน้ำยาถอดแบบ จากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ รวมถึงการจำลองการขึ้นรูปเพื่อดูแนวโน้มของประสิทธิภาพในการถอดแบบเสมือนการใช้งานจริงจากเครื่องกดอัดขึ้นรูป
3. ศึกษาผลกระทบจากพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (Polymethyl hydrogen siloxane, PMHS) ที่ปริมาณ 2% 4% และ 6%wt ตามลำดับ จากสูตรในหัวข้อที่ 2. และทำการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาถอดแบบ
4. ศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน โดยศึกษาที่ปริมาณ 1% และ 2%wt ตามลำดับ สารคู่ควบไซเลนที่ศึกษา ได้แก่
 - อะมิโนไซเลน (2-อะมิโนเอทิล-8-อะมิโนออกทิลไตรเมทอกซีไซเลน, Asi)
 - อีพอกซีไซเลน (3-ไกลซิโดซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน, Esi)
 - เมทาคริลิกไซเลน (3-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน, Msi)
5. ศึกษาผลกระทบจากปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน (Amino silane coupling agent, Asi) ที่ปริมาณ 0.5% 1% 1.5% 2% และ 3%wt ตามลำดับ โดยเลือกสูตรที่ดีที่สุดจากการศึกษาในหัวข้อที่ 4. และทำการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาถอดแบบ
6. ศึกษาแนวเปรียบเทียบในการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาถอดแบบที่พัฒนาขึ้นกับน้ำยาถอดแบบทางการค้า ได้แก่
 - KLO-200P (Wax-based)
 - BCI-024N-250A (Silicone-based)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้น้ำยาสารถอดแบบ หรือวัสดุเคลือบผิวถูกลมยางที่มีจำนวนรอบของการถอดแบบต่อการพ่นน้ำยาหนึ่งครั้งมากกว่าน้ำยาสารถอดแบบทางการค้าที่มีอยู่ในปัจจุบันของบริษัท
2. ได้วิธีการทดสอบใหม่ที่มีความเหมาะสมสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของน้ำยาสารถอดแบบจากเครื่องไตรโบมิเตอร์
3. เพิ่มความรู้ ความเข้าใจในน้ำยาสารถอดแบบ และสามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนา น้ำยาสารถอดแบบได้ รวมถึงเพิ่มความสามารถในการแข่งขันผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำยาสารถอดแบบของบริษัททั้งในประเทศ และต่างประเทศ
4. เป็นการเพิ่มผลิตผลในโรงงานอุตสาหกรรมยางล้อ รวมถึงลดต้นทุนในการใช้น้ำยาสารถอดแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงความหมายของสารลดแบบ หลักการใช้งาน และสารตัวเติมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องรวมถึงชนิด และสมบัติของยางที่นำมาผลิตเป็นถุงลมยาง หรือแบลด์เตอร์ (Bladder) กลไกการทำงานของถุงลมยาง และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับถุงลมยางในระหว่างการใช้งาน รวมถึงวิธีทดสอบโดยการจำลองการทำงานเพื่อดูประสิทธิภาพของฟิล์มสารลดแบบ และการทบทวนวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารลดแบบ (Release agents)

สารลดแบบ (Release agents) อาจรู้จักในชื่อ น้ำยาถอดแบบ สารถอดแบบ สารกันติด หรือน้ำยาทากันติด คือสารที่ใช้สำหรับเคลือบผิวแม่พิมพ์ (Mold) ซึ่งเป็นได้ทั้งของแข็ง หรือของเหลว [12] ช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุอื่นเกาะ หรือยึดติดกับพื้นผิวใด ๆ ทำให้ถอดแบบขึ้นงานได้อย่างง่ายไม่ติดแม่พิมพ์ และไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย ป้องกันไม่ให้เกิดคราบต่าง ๆ ไปเกาะที่ผิวของแม่พิมพ์ ทำให้ถอดแบบขึ้นงานได้ยาก [13] สารลดแบบทำงานโดยการเชื่อมประสานกับผิวด้านนอกของแม่พิมพ์อาจเกิดปฏิกิริยาทางเคมี หรือยึดเกาะเชิงกล ช่วยสร้างชั้นฟิล์มบางที่พื้นผิวของแม่พิมพ์โดยที่ไม่ทำให้เกิดรอยต่างที่ผิวของชิ้นงาน อาจช่วยให้ชิ้นงานมีผิวที่มันวาว ซึ่งสามารถใช้ได้กับวัสดุที่เป็นพลาสติก และยาง [14] นอกจากนี้ยังทำให้เกิดประโยชน์ด้านอื่น ๆ คือ ลดระยะเวลาในการทำงาน ลดต้นทุนการผลิต ลดของเสียจากการผลิตจากผลิตภัณฑ์ที่มีตำหนิจากแม่พิมพ์ที่ไม่สะอาด หรือพื้นผิวเสียหายจากการติดกับแม่พิมพ์ รวมถึงเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ และเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้น

2.1.1 ชนิดของสารลดแบบ

สารลดแบบมี 3 ชนิด ได้แก่

1. สารลดแบบชนิดไม่ถาวร (Non-permanent release agents) เป็นสารลดแบบที่มีการใช้ทุกครั้งที่มีการขึ้นรูป เนื่องจากสารลดแบบชนิดนี้มีการเคลือบเป็นชั้นบาง เมื่อใช้งานจึงเกิดการหลุดออกจากแม่พิมพ์ หรือพื้นผิวที่ขึ้นรูปได้ง่ายจนเหลือเพียงเล็กน้อย หรือแทบไม่เหลือเลย เช่น แวกซ์ (Wax) เป็นต้น

2. สารลดแบบชนิดกึ่งถาวร (Semi-permanent release agents) เป็นสารลดแบบที่เกิดเป็นฟิล์มบางเคลือบที่แม่พิมพ์ หรือวัสดุที่ทำการขึ้นรูป โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารลดแบบทุกครั้งที่มีการขึ้นรูป แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ชนิดตัวทำละลาย (Solvent-based)** สารถอดแบบที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย เมื่อตัวทำละลายระเหยจึงเกิดเป็นชั้นฟิล์มเคลือบที่แม่พิมพ์ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่ม แร็กซ์ หรือพอลิเมอร์ที่อยู่ในตัวทำละลาย การใช้งานในระบบของตัวทำละลายเหล่านั้นเร็วกว่าชนิดน้ำ และมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสารถอดแบบชนิดไม่ถาวร แต่ตัวทำละลายบางชนิดมีกลิ่นรุนแรง และก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

- **ชนิดน้ำ (Water-based)** สารถอดแบบที่นำมาใช้แทนชนิดตัวทำละลาย ในการใช้งานจึงแห้งได้ช้ากว่าในระบบของตัวทำละลาย สามารถใช้งานได้ง่าย เนื่องจากเป็นน้ำ ไม่มีกลิ่นที่รุนแรง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าชนิดตัวทำละลาย

3. สารถอดแบบชนิดถาวร (Permanent release agents)

เป็นสารถอดแบบที่มีการเคลือบที่แม่พิมพ์ โดยมีการสร้างชั้นฟิล์มที่แข็งแรงยึดติดกับแม่พิมพ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแบบกึ่งถาวร รวมถึงแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าสารถอดแบบชนิดอื่น [15]

ทำให้เห็นได้ว่าสารถอดแบบแต่ละชนิดมีสมบัติในการใช้งานแตกต่างกัน สำหรับในการวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาสารถอดแบบกึ่งถาวรให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสารถอดแบบถาวร จึงมีการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสีย สำหรับสารถอดแบบกึ่งถาวร และสารถอดแบบถาวร แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดี - ข้อเสีย ของสารถอดแบบสูตรถาวร และกึ่งถาวร [11]

	สูตรถาวร	สูตรกึ่งถาวร
ลักษณะของฟิล์มที่เกิดขึ้น	เป็นชั้นฟิล์มเคลือบถาวรติดกับถุงลมยาง	เป็นชั้นฟิล์มบางเคลือบไม่ถาวรบนถุงลมยาง ซึ่งสามารถหลุดได้
อายุในการใช้งานของถุงลมยาง (Bladder)	ขึ้นกับอายุการใช้งานของถุงลมยาง โดยไม่มีการพ่นน้ำยาตลอดอายุการใช้งานของถุงลมยาง	ขึ้นกับอายุการใช้งานของถุงลมยาง โดยมีการพ่นซ้ำทุก ๆ 6-12 ชั่วโมง (เปลี่ยนกะ) หรือ 20-40 รอบการผลิต
ต้นทุน	เสียค่าวัสดุเคลือบสูงกว่า และเคลือบเพียงครั้งเดียว	เสียค่าวัสดุเคลือบต่ำกว่า และต้องเคลือบหลายครั้ง ทำให้เสียเวลามีค่าใช้จ่ายสูงทั้งวัสดุ และแรงงาน
ความต่อเนื่องในการผลิต	สามารถทำได้ต่อเนื่องตลอดการผลิต ไม่เสียเวลาหยุดพ่นเคลือบใหม่	ต้องมีการหยุดกระบวนการผลิตเพื่อพ่นสารถอดแบบ จึงทำให้ไม่มีความต่อเนื่องในการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	สูตรถาวร	สูตรกึ่งถาวร
ประสิทธิภาพในการถอดแบบ	มีประสิทธิภาพสูง และไม่ลดลงเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน เนื่องจากฟิล์มมีความคงทน และเชื่อมโยงกับเนื้ออย่างจึงทำให้มีประสิทธิภาพลดลงช้ากว่า หรือทำให้มีประสิทธิภาพการถอดแบบได้ดีตลอดอายุการใช้งานของถุงลมยาง	มีประสิทธิภาพลดลงในแต่ละรอบการผลิตเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน
ของเสียที่เกิดขึ้น	ไม่มี จนครบอายุในการใช้งานของสารถอดแบบ และ/หรือถุงลมยาง	พบเมื่อสารเคลือบเริ่มครบรอบในแต่ละครั้งของการใช้งาน จึงทำให้เกิดความเสียหายต่อถุงลมยางและกรีนไทร์

ดังนั้นในการเลือกใช้สารถอดแบบ ควรเลือกให้เข้ากันได้ และเหมาะสมกับพื้นผิวแม่พิมพ์ที่ต้องการใช้งาน รวมถึงสภาวะในการใช้งานทั้งอุณหภูมิ ความดัน เพื่อให้สารถอดแบบมีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน เพื่อให้ชิ้นงานที่ถอดแบบออกมามีพื้นผิวที่เรียบดี ไม่เกิดความเสียหายต่อแม่พิมพ์ และไม่ทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการทำงานภายหลัง [16]

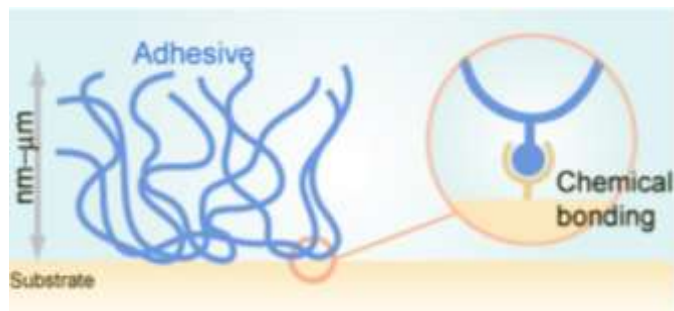
2.1.2 กลไกของการยึดติด

การใช้สารถอดแบบนั้น มีวัตถุประสงค์ในการทำให้เกิดชั้นฟิล์มของสารถอดแบบ เพื่อป้องกันหรือลดการยึดติดกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิด สำหรับการยึดติดเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการทำงานของสารถอดแบบ โดยมีกลไกดังนี้

1. การเกิดพันธะเคมีระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุ (Chemical bonding across the interface)

โดยการเกิดพันธะเคมีระหว่างผิวของวัสดุนั้น เกิดขึ้นบริเวณที่เกิดการยึดติดกัน ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีพลังงานการยึดติดสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ [17] แสดงดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การเกิดพันธะเคมีระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุ [17]

2. การแพร่ระหว่างกัน (Inter-diffusion)

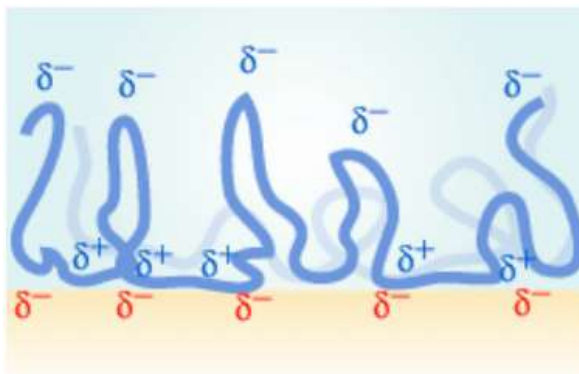
พอลิเมอร์สามารถเกิดการยึดติดกันได้ เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาของสายโซ่พอลิเมอร์ที่บริเวณอินเทอร์เฟซ โดยเกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดจากการสัมผัสกัน อุณหภูมิ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ โดยลักษณะการแพร่ระหว่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการแพร่ระหว่างกัน [17]

3. การดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction)

สำหรับปริมาณประจุไฟฟ้าชั่วคราว และชั่วคราวบนผิววัสดุ มีไม่เท่ากันทำให้เกิดแรงดึงดูดเมื่อวัตถุทั้ง 2 ชั้นมีประจุต่างชนิดกัน หรือเกิดแรงผลักรันของวัสดุที่มีประจุชนิดเดียวกัน การที่วัสดุ 2 ชั้นเกิดการสัมผัสกัน ทำให้มีพลังงานที่ทำให้ประจุไฟฟ้าบนผิววัสดุเกิดการแลกเปลี่ยนกัน โดยเกิดกับวัสดุประเภทที่ไม่นำไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ยาง พลาสติก และแก้ว เป็นต้น ลักษณะการเกิดการดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ [17]

4. พลังงานพื้นผิว และความสามารถในการยึดเกาะผิว (Surface energetics and wettability)

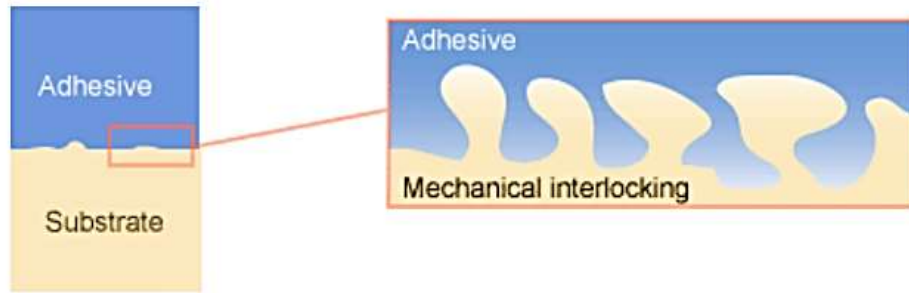
การยึดติดกันบริเวณผิวของวัสดุเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างโมเลกุลของวัสดุ 2 ชนิด โดยแรงที่พบบ่อยบริเวณพื้นผิวของวัสดุที่เกิดการยึดติดกันคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งบริเวณที่วัสดุเกิดการยึดติดกันเป็นบริเวณที่มีพลังงานพื้นผิวสูงกว่าบริเวณอื่น โดยลักษณะของพลังงานพื้นผิว และความสามารถในการยึดเกาะผิว แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 พลังงานพื้นผิว และความสามารถในการยึดเกาะ [17]

5. การยึดเกาะทางกล (Mechanical interlocking)

การเกิดการยึดเกาะทางกลบนพื้นผิวของสารถอดแบบกับพื้นผิวของวัสดุนั้น สารถอดแบบต้องเกิดการซึมซับบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งมีความเป็นรูพรุน จึงทำให้เกิดการล็อกกันของสารถอดแบบกับวัสดุ โดยการยึดเกาะทางกลที่ดันทันสมบัติทางกายภาพของสารถอดแบบแม่พิมพ์ต้องเหมาะสมคือมีความสามารถในการแทรกซึมพื้นผิวที่ดี โดยลักษณะของการยึดเกาะทางกล แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การยึดเกาะทางกล [17]

ลักษณะของพื้นผิวของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยึดเกาะ เมื่อมีการใช้งาน สารยึดเกาะกับวัสดุนั้น สารยึดเกาะที่มีการเคลือบอยู่ที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุในลักษณะของฟิล์มบาง โดยหน้าที่ของฟิล์มบางคือ ลดการเกิดการยึดเกาะทางกลของวัสดุ ลดการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี มีการดูดซับของเนื้อวัสดุเพื่อป้องกันการแพร่ระหว่งกันของเนื้อวัสดุ วัสดุเกิดแรงดึงผิวต่ำส่งผลทำให้ความสามารถในการยึดเกาะผิวต่ำ แรงยึดเหนี่ยวของปฏิกิริยาเคมีลดลง และทำให้ชั้นโมเลกุลของผิวด้านนอก (Boundary layers) ลดลง เป็นต้น นอกจากนี้วัสดุที่มีอนุภาคเป็นของแข็ง เช่น แป้ง ทลัคม และไมกา เป็นต้น สามารถนำมาเป็นสารยึดเกาะได้เช่นกัน เนื่องจากสามารถป้องกันการเกิดการยึดเกาะทางกล และช่วยลดพื้นผิวสัมผัสของวัสดุได้ อีกทั้งการใช้พอลิเมอร์ที่ต่างชนิดกันสามารถป้องกันการยึดติดกันได้ ซึ่งการไม่เกิดการยึดติดกันเกิดจากความไม่เข้ากันของวัสดุ [17]

2.1.3 วิธีการใช้สารยึดเกาะ

ในการใช้งานสารยึดเกาะควรเช็ดทำความสะอาดพื้นผิวก่อน ไม่ให้มีสิ่งสกปรกอยู่บนพื้นผิวที่ต้องการใช้งาน เพื่อให้สารยึดเกาะใช้งานได้ดีที่สุด ตามคำแนะนำของผู้ผลิตควรใช้สารยึดเกาะในปริมาณที่ไม่เยอะจนเกินไป เนื่องจากสิ้นเปลือง และอาจนำไปสู่ปัญหาอื่น ๆ ได้ จึงควรใช้ในปริมาณที่น้อยที่สุดแต่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับความหนาในการเคลือบที่เหมาะสมควรอยู่ที่ประมาณ 0.0005 นิ้ว หรือ 12 ไมครอน แต่สามารถเปลี่ยนแปลงความหนาได้ขึ้นอยู่กับการใช้งานและความหนืดของสารยึดเกาะที่ใช้ และมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้งานด้วย [18]

รูปแบบการใช้งานของสารยึดเกาะสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1. การพ่น (Spraying)

เป็นวิธีการใช้งานสารยึดเกาะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และนิยมใช้กันทั่วไป โดยหัวพ่นมีลักษณะกว้าง หรือแบน ทำให้ละอองของสารยึดเกาะมีความบาง และสม่ำเสมอที่สุด ซึ่งหากใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ และสารยึดเกาะมีความหนืดสูง ควรเพิ่มแรงดันในการพ่น และลดขนาดหัวพ่น ส่วนในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ควรลดแรงดันในการพ่น และเพิ่มขนาดของหัวพ่น การพ่นต้องมีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เช่น ระยะห่าง ความกว้างของมุม และความเร็วในการพ่น เป็นต้น แสดงดัง

รูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การพ่น (Spraying) [19]

2. การทา (Swabbing and Painting)

เป็นวิธีที่สามารถกำจัดฝุ่น และสิ่งปนเปื้อนที่ส่วนใหญ่มาจากอากาศได้ แต่วิธีนี้มักทำให้ได้ การเคลือบมีความหนาของฟิล์มมากเกินไปจนจำเป็น ทำให้เกิดความสิ้นเปลือง และเกิดปัญหาขึ้นได้ ในภายหลัง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของสารลดแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวของแม่พิมพ์ที่มี รูปแบบที่ซับซ้อน เนื่องจากไม่สามารถทำได้ทั่วถึง แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การทา (Swabbing and Painting) [20]

3. การเช็ด (Wiping)

เป็นวิธีการที่ใกล้เคียงการทา แต่การเช็ดได้ฟิล์มที่บางกว่า ทำโดยใช้ฟองน้ำ หรือเศษผ้าในการเช็ดบนพื้นผิว ทำให้ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวส่วนเกินถูกเช็ดออกไปจากพื้นผิวของแม่พิมพ์ แต่วิธีการนี้ต้องใช้แรงงานมาก และผู้ปฏิบัติต้องมีความละเอียดในการทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การเช็ด (Wiping) [21]

4. การจุ่ม (Dipping)

เป็นวิธีการที่มีความรวดเร็ว ต่อเนื่อง ใช้แรงงานน้อย และให้การเคลือบที่มีความสมบูรณ์ ความหนาของฟิล์มที่ได้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการจุ่มแม่พิมพ์ในสารถอดแบบ ส่วนสารถอดแบบที่เกินนั้น ถูกส่งกลับไปอยู่ในถังเก็บสารถอดแบบ เพื่อไม่ให้เกิดการสิ้นเปลือง แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การจุ่ม (Dipping) [22]

2.1.4 การใช้งานสารถอดแบบ

1. คอนกรีต (Concrete)

อุตสาหกรรมคอนกรีตมีการใช้งานที่แพร่หลาย โดยสารถอดแบบถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการยึดเกาะระหว่างส่วนผสมของคอนกรีต และพื้นผิวที่ขึ้นรูป เช่น โครงร่างที่เป็นเหล็ก ไม้ และอะลูมิเนียม เป็นต้น [20]

2. การหล่อขึ้นรูป (Die casting)

การหล่อขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียม และแมกนีเซียมที่มีอุณหภูมิหลอมละลายค่อนข้างสูงภายใต้ความดันสูง ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการหล่อขึ้นรูปได้พัฒนาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ และซับซ้อน สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้เพื่อปรับระดับของอุณหภูมิให้เท่ากัน ช่วยลดเวลาในการทำงาน และเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ [8]

3. อาหาร (Food)

ในอุตสาหกรรมอาหารมีการสัมผัสกันอย่างมาก โดยส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานอยู่ในครัว เช่น ถาดรองน้ำแข็งในตู้เย็น แม่พิมพ์สำหรับทำอาหารต่าง ๆ กระจกใส กระจกที่มีการเคลือบสารกันติด และภาชนะสำหรับการทำอาหารต่าง ๆ ในสมัยก่อนมีการใช้แป้ง หรือน้ำตาลไอซิ่งโรยบนพื้นผิว หรือภาชนะต่าง ๆ เพื่อป้องกันการติดกันของอาหารกับภาชนะ จึงลดความเสียหายที่เกิดขึ้นเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภคจากสิ่งนี้อาจปนเปื้อนลงในอาหาร และทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาด โดยไขมันจากพืช และสัตว์ถูกนำมาใช้เป็นอิมัลชันในอุตสาหกรรมเบเกอรี่ ส่วนการเคลือบแบบแก้ว มักหายไปหลังจากการปรุงอาหารแต่ละครั้ง หรือในระหว่างการทำความสะอาด จึงนิยมใช้สารลดแรงตึงผิวที่เป็นแบบกึ่งถาวร (Semi-permanent agent) เช่น ซิลิโคน และสารพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน (PTFE) เป็นต้น เนื่องจากสามารถใช้งานซ้ำได้เป็นระยะเวลาหลายเดือน

4. ยาง พลาสติก และสิ่งทอ

มีการใช้สารลดแรงตึงผิวกันอย่างแพร่หลายในการลดแรงตึงผิวในการใช้งานในกระบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ เช่น การใช้แม่พิมพ์ (Molding) การอัดรีด (Extrusion) การใช้เครื่องคาลเอนเดอร์ (Calendering) และการปั๊มูน (Embossing) เพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ยึดติดกับอุปกรณ์ในกระบวนการขึ้นรูป และช่วยให้การผลิตรวดเร็ว มีความต่อเนื่องมากขึ้น ไม่เกิดการสะสมของคราบ และสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาอื่น ๆ สารลดแรงตึงผิวสามารถช่วยเคลือบผิวของวัสดุคล้ายกับการเคลือบผิวเครื่องครัวด้วยเทฟลอน สารลดแรงตึงผิวที่มีการใช้งานในด้านพอลิเมอร์มีหลายชนิด เช่น แก้วกซ์ และซิลิโคน เป็นต้น [8]

5. ไม้ (Wood)

ในอุตสาหกรรมงานไม้ทั่วไป เช่น การเคลือบผิวไม้ และวัสดุที่ทำจากไม้รวมทั้งในกระบวนการเคลือบต่าง ๆ เช่น การผลิตแบบกระดาษอัดซับพินอลิกเรซิน แผ่นไม้อัดลามิเนตเคลือบเมลามีน เป็นต้น เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนของไม้เกิดการยึดติดกับวัสดุอื่น และมีความสามารถในการรับแรงที่พื้นผิวได้เพิ่มขึ้น สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่มีการใช้งานด้านนี้ เช่น น้ำมันพาราฟิน และกลุ่มซิลิโคนชนิดพิเศษ เป็นต้น [15]

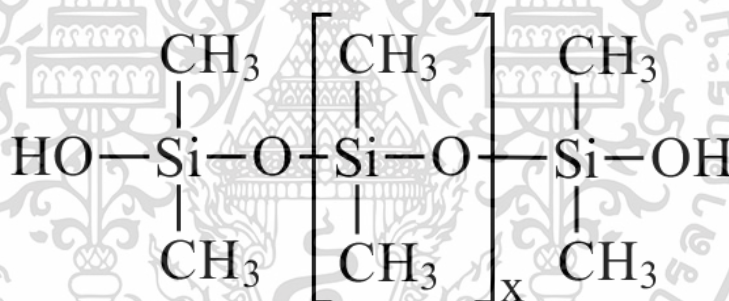
2.2 องค์ประกอบของสารลดแรงตึงผิว

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสารลดแรงตึงผิวชนิดกึ่งถาวรที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางล้อ โดยทั่วไปมีองค์ประกอบดังนี้ พอลิเมอร์เรซิน (Polymer resin) ตัวทำละลาย (Solvent) และมีการใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ เช่น สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สารลดฟอง (Defoamer) และสารเพิ่มความเปียก (Wetting agent) เป็นต้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

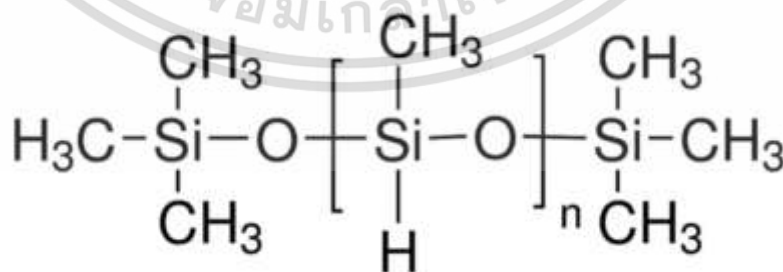
ภาพในการใช้งานสารลดแบบชนิดกึ่งถาวรนี้ด้วย สำหรับองค์ประกอบของสารลดแบบในงานวิจัยมีดังนี้

2.2.1 ซิลิโคน (Silicone)

ซิลิโคนเป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพที่ดี มีความแข็งแรงยืดหยุ่น ทนความร้อน หรือทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดี รวมถึงยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าด้วย ทำให้สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ในรูปของเหลว เจล กาว หรือแม้กระทั่งแผ่นยางทนความร้อนสำหรับรองรับยานอวกาศ [23] โดยมีโครงสร้างพื้นฐานทางเคมีคือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) ซึ่งองค์ประกอบในโมเลกุลของ PDMS ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (Si) ออกซิเจน (O) คาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) โดยมี CH_3 เป็นโซ่ข้าง (Side chain) กับอะตอมของ Si [24] ดังแสดงในรูปที่ 2.10 และองค์ประกอบในโมเลกุลของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (Polymethyl hydrogen siloxane, PMHS) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับ PDMS



รูปที่ 2.10 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) [24]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (Polymethyl hydrogen-siloxane, PMHS) [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิโคนมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ โดยเป็นสารที่มีความยืดหยุ่นสูงมาก และค่าความหนืดขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากการเรียงตัวกันอย่างใกล้ชิดของกลุ่ม CH_3 ในสภาวะปกติ เรียงตัวแบบซ็อกที่ผิวด้านบน จึงทำให้ผิวของซิลิโคนเป็นผิวแบบหยดน้ำลื่น พลังงานพันธะของ Si-O ในโมเลกุลของ PDMS มีค่าประมาณ 444 kJ/mol ซึ่งมีความมากกว่าพลังงานพันธะของพอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymers) ตัวอย่างเช่น C-C (356 kJ/mol) หรือ C-O (399 kJ/mol) ทำให้มีความเสถียรมากกว่าพอลิเมอร์อินทรีย์ เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของอะตอม Si (1.8) น้อยกว่าอะตอมของ O (3.5) ทำให้พันธะ Si-O เกิดการโพลาริเซชันขึ้น ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบโควาเลนต์แก่อะตอมของ Si เป็นประจุบวก และอะตอมของ O เป็นประจุลบ จึงเป็นพันธะเคมีที่มีความเสถียรด้วยโครงสร้างของพันธะซิลอกเซน (Siloxane bond) และไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล จึงทำให้ซิลิโคนมีสมบัติคงทนต่อความร้อน และสภาพอากาศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากพันธะซิลอกเซนเป็นพันธะที่มีความเสี่ยงจากผลกระทบของกรด และเบส ระยะของพันธะซิลอกเซน (O-Si-O) (1.6×10^{-10} m) มีความยาวมากกว่าระยะของพันธะ C-C (1.54×10^{-10} m) และมุมของพันธะซิลอกเซน (O-Si-O) (140°) มีค่ามากกว่ามุมของพอลิเอทิลีน (C-C-C) (109°) นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในการหมุนพันธะ Si-O (<0.5 kJ/mol) มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการหมุนของพันธะ C-C (15.4 kJ/mol) หรือพันธะ C-O (11.31 kJ/mol) จึงทำให้พันธะซิลอกเซนหมุนได้ง่าย ด้วยเหตุนี้โครงสร้างโมเลกุลของซิลิโคนจึงเป็นแบบเกลียว (Helical structure) โดยประกอบด้วยพันธะ Si-O จำนวน 6 พันธะในหนึ่งรอบเกลียวโครงสร้างแบบนี้จึงส่งผลให้ผิวของซิลิโคนครอบคลุมไปด้วย CH_3 ซึ่งทำให้เกิดสมบัติพื้นผิวแบบหยดน้ำลื่น (Hydrophobic surface properties) และมีแรงดึงผิวต่ำจากโครงสร้างดังกล่าวทำให้ PDMS มีสมบัติที่สำคัญประกอบด้วย

1. แรงระหว่างโมเลกุลของ CH_3 ต่ำ
2. ความสามารถในการยืดหยุ่นของพันธะซิลอกเซน
3. ความแข็งแรงของพันธะซิลอกเซน
4. การมีสมบัติเป็นพันธะไอออนิกบางส่วน of พันธะซิลอกเซน

นอกจากนี้ซิลิโคนยังทนต่อสภาพอากาศ โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดี โดยเฉพาะความสามารถในการใช้งานได้ในอุณหภูมิที่สูงมาก ๆ และต่ำมาก ๆ ได้ อย่างไรก็ตามซิลิโคนมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และ ความทนต่อแรงกระแทก (Impact resistance) ที่ไม่ค่อยสูงมากนัก จึงอาจต้องมีการใช้สารตัวเติม เช่น ซิลิกามาช่วยเสริมสมบัติเหล่านี้ ซิลิโคนมีความเป็นฉนวนที่ดีมาก มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซ และของเหลวสูง แต่ซิลิโคนไม่ทนต่อกรด และเบส รวมถึงสารเคมีพวกเอสเทอร์ คีโตน และอีเทอร์ [24]

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนรูปร่างของโมเลกุล (Conformation) ที่เกิดจากการหมุนรอบพันธะเดี่ยวทำได้ง่ายกว่า จึงส่งผลให้ซิลิโคนมีความยืดหยุ่นสูง และอะตอมของซิลิกอนมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของคาร์บอน จึงทำให้ซิลิโคนมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (Free volume) สูง ทำให้โมเลกุล

เคลื่อนไหวได้ง่าย ด้วยเหตุผลนี้ซิลิโคนจึงมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) ต่ำคือ มีค่าประมาณ -127 องศาเซลเซียส

2.2.1.1 สมบัติทั่วไปของซิลิโคน

เนื่องจากซิลิโคนมีความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการขีดสี และความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำมาก ดังนั้นหากต้องการนำซิลิโคนไปใช้ในงานเชิงวิศวกรรม จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรง (เช่น ซิลิกา) ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากซิลิโคนมีความทนทานต่อความร้อนสูงมาก ดังนั้นสมบัติเชิงกลของซิลิโคนจึงเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยตามระดับของอุณหภูมิ สำหรับสมบัติทั่วไปของซิลิโคน [23] มีดังนี้

ความแข็ง (Shore A)	: 10 ถึง 90
ความทนต่อแรงดึง	: ≤ 9.65 เมกะปาสคาล
การยืดตัว ณ จุดขาด	: 100 ถึง 1200 เปอร์เซ็นต์
ความทนต่อการฉีกขาด (Die B)	: ≤ 48 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
การกระเด็น (Rebound Resilience)	: 10 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์
อุณหภูมิการใช้งาน	: -100 ถึง 315 องศาเซลเซียส

ความทนต่อการเสื่อมสภาพ (Ageing resistance) เนื่องจากซิลิโคนไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล และพันธะ Si-O ที่มีอยู่ในสายโซ่หลักของซิลิโคนมีค่าพลังงานพันธะสูงกว่าพันธะ C-C ดังนั้นซิลิโคนจึงทนต่อสภาพอากาศ ออกซิเจน โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดีกว่ายางที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นพันธะ C-C อย่างไรก็ตามซิลิโคนเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อสัมผัสกรด หรือเบสที่เข้มข้น

ความยืดหยุ่น (Flexibility) ซิลิโคนเกรดทั่วไปมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ที่ต่ำ ทำให้ซิลิโคนมีความยืดหยุ่นสูง การเติมหมู่ฟินิลเข้าไปในโมเลกุลช่วยให้โมเลกุลเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายยิ่งขึ้น (Tg ต่ำลง) ซึ่งทำให้เกิดเป็นซิลิโคนเกรดพิเศษ เช่น ยาง PMQ และยาง PVMQ ยังคงมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ ได้

ความทนต่อน้ำมัน และสารเคมี (Oil and chemical resistance) ซิลิโคนเกรดทั่วไปสามารถทนน้ำมันได้ปานกลาง แต่ไม่ทนต่อกรด เบส น้ำมันเชื้อเพลิง เอสเทอร์ และคีโตน อย่างไรก็ตามสมบัติความทนต่อน้ำมัน และสารเคมีของซิลิโคน สามารถสูงขึ้นได้หากเติมอะตอมของฟลูออรีนเข้าไปในโมเลกุล ซึ่งทำให้ได้ซิลิโคนเกรดพิเศษ เช่น ฟลูออโรซิลิโคน (FMQ) ที่มีสมบัติทนต่อน้ำมัน น้ำมันเชื้อเพลิง และตัวทำละลายอื่น ๆ ได้อย่างดีเยี่ยม ในขณะที่สมบัติอื่น ๆ ยังคงเหมือนซิลิโคนเกรดธรรมดา (ยกเว้นสมบัติความทนต่อความร้อนต่ำกว่าซิลิโคนเกรดธรรมดาเล็กน้อย)

การซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) เนื่องจากซิลิโคนมีช่องว่างระหว่างโมเลกุล ดังนั้นก๊าซจึงสามารถซึมผ่านซิลิโคนได้เร็ว และความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เช่น สมบัติของก๊าซ อุณหภูมิ และความดัน เนื่องจากที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซิลิโคนมี

ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซสูงกว่ายางบิวทิลถึงเกือบ 400 เท่า ซิลิโคนจึงเหมาะสมแก่การนำไปใช้ในงานที่ต้องการให้ก๊าซแพร่ผ่านได้มาก เช่น ก๊าซออกซิเจน เพื่อใช้ในทางการแพทย์

สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) ซิลิโคนมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม บางเกรดมีความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volume resistivity) ต่ำถึง 0.004 โอห์ม-เซนติเมตร (ohm-cm) และมีค่าความแข็งแรงไดอิเล็กทริก (Dielectric strength) เท่ากับ 500 โวลต์ต่อมิล (volts per mil)

ความทนต่อการฉายรังสี (Radiation resistance) ซิลิโคนมีความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากรังสีค่อนข้างสูง เช่น ยาง PVMQ ที่เป็นยางซิลิโคนเกรดพิเศษ

สมบัติพื้นผิว (Surface properties) ซิลิโคนมีพื้นผิวเกาะติดยาก และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงทำให้มีสาร หรือวัสดุอื่นมาเกาะติดได้ยาก แม้กระทั่งวัสดุที่เหนียวติด ซึ่งสมบัติข้อนี้ทำให้สามารถนำซิลิโคนไปใช้ประโยชน์ได้มาก เช่น สารเคลือบผิว เป็นต้น [23]

2.2.1.2 ประเภทของซิลิโคน

ซิลิโคนที่วัลคาไนซ์ด้วยความร้อน (Heat cured silicone rubber) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามสถานะ และกระบวนการผลิต โดยที่ซิลิโคนทั้ง 2 ประเภทนี้มีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน

1. ซิลิโคนแข็ง (High consistency silicone rubber, HCR)

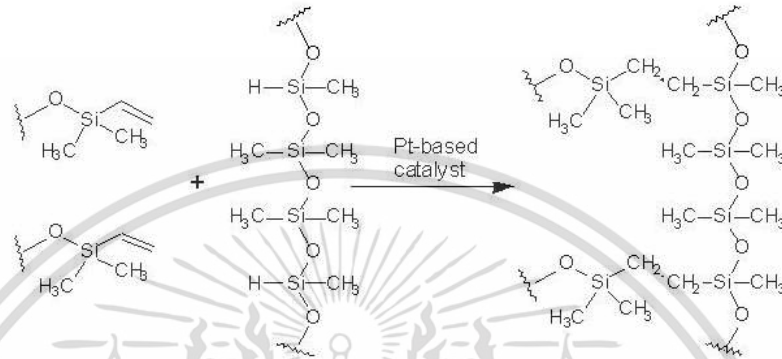
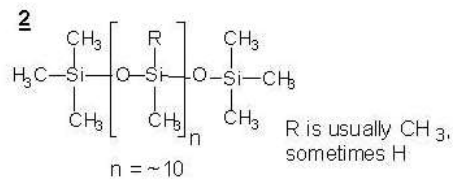
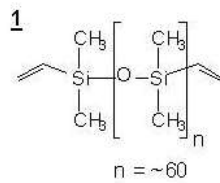
คอมพาวด์ของซิลิโคนที่อยู่ในรูปของแข็ง เตรียมได้โดยการนำซิลิโคนไปผสมกับสารเคมีต่าง ๆ และสารเปอร์ออกไซด์ เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยง แล้วนำซิลิโคนที่ได้มาทำเป็นแผ่นเพื่อความสะดวกในการขนส่ง และเก็บรักษา เมื่อต้องการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จึงนำแผ่นซิลิโคนมาผ่านเครื่องคาลันเดอร์ (Calendar) เครื่องเอกซทรูด (Extruder) หรือขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (ซึ่งเป็นแม่พิมพ์แบบฉีด แบบกดอัด หรือแบบกึ่งฉีด) และให้ความร้อนเพื่อให้เกิดวัลคาไนซ์เพิ่ม

2. ซิลิโคนเหลว (Liquid silicone rubber, LSR)

ซิลิโคนในรูปของเหลวใส มีความหนืดต่ำ ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบ โดยองค์ประกอบที่หนึ่งมีตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แพลทินัม (Platinum, Pt) และดีบุก (Tin, Sn) เป็นต้น และองค์ประกอบที่สองมีเมทิลไฮโดรเจนซิลอกเซน (Methyl hydrogen siloxane) ที่เกิดการเชื่อมโยง และมีแอลกอฮอล์เป็นตัวยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) เมื่อต้องการทำผลิตภัณฑ์จึงนำของเหลวทั้งสองส่วนมาผสมกันในเครื่องฉีด (Injection molding) เมื่อเกิดการผสมกันแล้ว จึงเกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ หรือที่เรียกว่า การวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ซิลิโคนสามารถใช้งานได้ในทางการแพทย์ เช่น เป็นอวัยวะเทียม รวมถึงมีสมบัติในการป้องกันการนำไฟฟ้าที่ดี [24]

siloxane oligomers

siloxane cross-linkers



รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของ PDMS กับ PMHS เมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม โดยพันธะ Si-H ถูกแทนที่ด้วยพันธะ Si-C [25]

2.2.1.3 ข้อดี และข้อเสียของซิลิโคน

จากลักษณะของสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นของซิลิโคน เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ซิลิโคนมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารถอดแบบสำหรับถลุงขี้ผึ้งที่ใช้ในการขึ้นรูปล้อยางรถยนต์ จากสมบัติที่มีความทนทานดีเยี่ยมต่อสภาพอากาศ (Excellent resistance to weathering) พื้นผิวมีสมบัติน้ำไม่เกาะ หรือพื้นผิวไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic surface properties) และมีเสถียรภาพสูงทางความร้อน และไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (High thermal and oxidative stability) นอกจากนี้มีการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของซิลิโคน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของซิลิโคน [24]

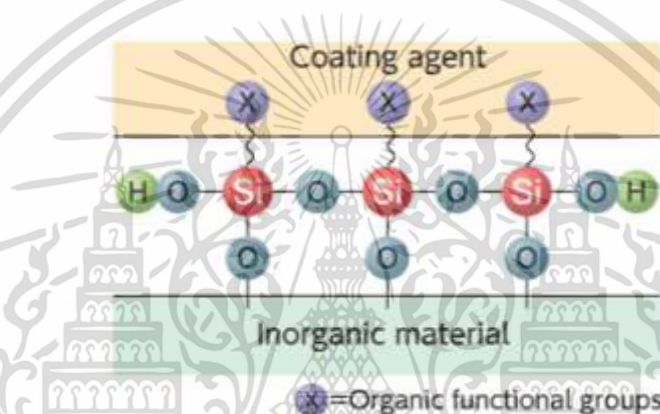
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - ไม่หดตัว จึงทำให้หล่อชิ้นงานที่มีขนาดแม่นยำเหมือนต้นแบบ จึงนิยมใช้กับต้นแบบที่ทำจากคอมพิวเตอร์ - เหมาะกับงานทรงซับซ้อน - สามารถถอดแบบออกได้ทันทีโดยไม่เกิดความเสียหาย - สามารถผลิตซ้ำได้หลายครั้ง - ไม่จำเป็นต้องฉีดสเปรย์ หรือทาแป้ง - เหมาะกับการผลิตซ้ำในงานที่มีรายละเอียดมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ความแข็งแรงต่อการฉีกขาดระดับปานกลาง - จำเป็นต้องกรีดยางเพื่อไล่อากาศออก - ราคาสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

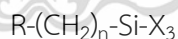
2.2.2 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent)

สารคู่ควบไซเลน หรือสารประสานเป็นสารที่มีสมบัติทำให้สารตัวเติมยึดเกาะ และเกิดการกระจายตัวได้ดีในวัสดุ เนื่องจากเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีอะตอมของซิลิคอน (Si) อยู่ภายในโมเลกุล ซึ่งปลายแต่ละข้างของโมเลกุลมีหน้าที่ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยปลายด้านหนึ่งมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับสารอินทรีย์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งมีหมู่ที่สามารถสร้างพันธะโควาเลนต์กับเมทริกซ์ของสารอินทรีย์ โดยที่สารตัวเติม หรือเส้นใยเสริมแรงต่าง ๆ เป็นสารประเภทที่ละลายในน้ำได้เรียกว่า ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ในขณะที่พอลิเมอร์เป็นสารประเภทที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เรียกว่า ไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวต่ำ [26] จึงทำให้ต้องมีการเติมสารคู่ควบไซเลน เพื่อเป็นการปรับปรุงการยึดติดกันของสารตัวเติม และพอลิเมอร์



รูปที่ 2.13 รูปแบบการยึดเกาะของสารคู่ควบไซเลน [68]

สำหรับสูตรทั่วไปของสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วย



โดยที่ R = Organofunctional group

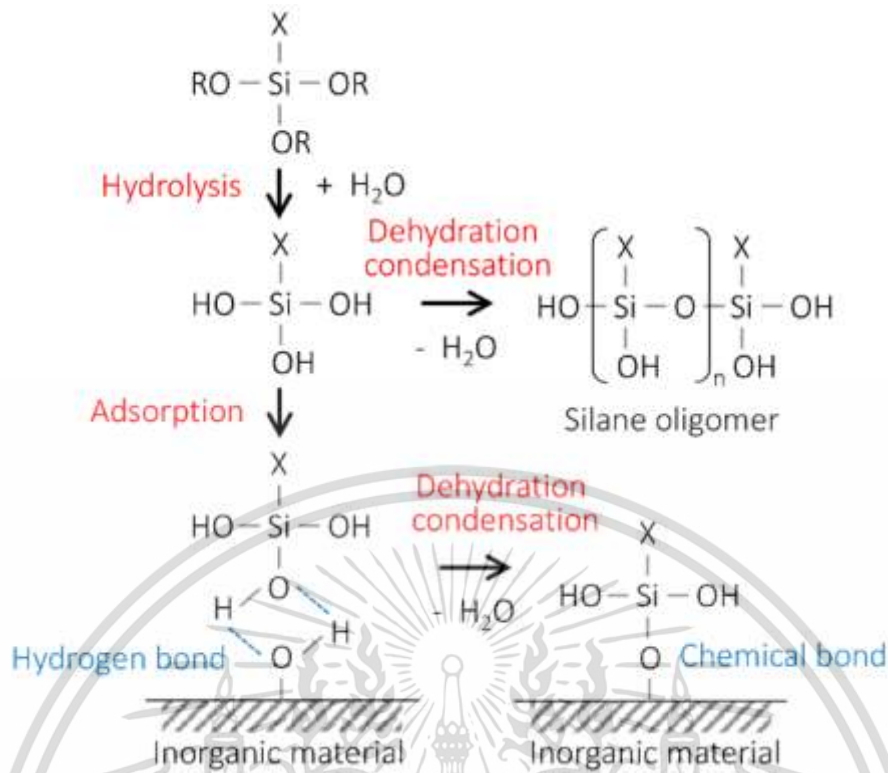
$(CH_2)_n$ = Linker

Si = Silicon atom

X_3 = Hydrolyzable groups

โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยซิลิคอน (Si) เป็นจุดศูนย์กลางของโมเลกุล โดยจับกับหมู่ของสารอินทรีย์ (R) เช่น หมู่ไวนิล หมู่อะมิโน หมู่คลอไรด์ หมู่เมอแคปแทน และหมู่อีพอกซี เป็นต้น โดยทำหน้าที่ยึดติดกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ และในส่วนของหมู่อินทรีย์ (X) เช่น เมทอกซี หรือเอทอกซี ซึ่งสามารถยึดติดกับสารอินทรีย์ [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลน [29]

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วย การเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของสารคู่ควบไซเลน โดยหมู่อนินทรีย์ (X) หรืออัลคอกซี (-OR) ภายในโมเลกุลของไซเลนนั้นทำปฏิกิริยากับน้ำ หรือความชื้นบนผิวเกิดเป็นหมู่ไซลานอล (Silanol, -O-Si) จากนั้นหมู่ไซลานอลจับกับหมู่ -OH บนพื้นผิวของน้ำหลุดออกเกิดเป็นพันธะออกเซน (Oxane bonds) และเกิดการยึดติดกับผิวของสารอนินทรีย์ หรือสารตัวเติม และสุดท้ายสารคู่ควบไซเลนทำปฏิกิริยากันเอง จึงเกิดการยึดเกาะกันหลายชั้นเป็นโครงสร้างร่างแหเชื่อมโยงภายในโครงสร้าง (Interpenetrating networks) หรืออาจเกิดเป็นสายโซ่พันกัน โดยชนิดของสารคู่ควบไซเลนมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีของเรซิน หรือพอลิเมอร์ ความมีขี้ หรือไม่มีขี้ หรือความสามารถในการละลาย โดยที่สารคู่ควบไซเลนถูกนำไปใช้ในงาน เช่น การปรับปรุงผิวของสารตัวเติมเพื่อให้สารตัวเติม และพอลิเมอร์ยึดเกาะกันได้ดี หรือใช้ในการลดความหนืดปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อความร้อนและสภาพอากาศ [28] ซึ่งสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) มีหลากหลายชนิดตามโครงสร้าง สำหรับงานวิจัยนี้มีการใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ทั้งหมด 3 ชนิด โดยมีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.1 สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน (Amino silane coupling agent)

อะมิโนไซเลน (2-อะมิโนเอทิล-8-อะมิโนออกทิลไตรเมทอกซีไซเลน) เป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 292.5 มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.97 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จุดเดือดอยู่ที่ 180 องศาเซลเซียส โดยมีจุดวาบไฟอยู่ที่ประมาณ 164 องศาเซลเซียส สำหรับโครงสร้างของอะมิโนไซเลนแสดงดังตารางที่ 2.3

สารคู่ควบไซเลนนี้มีหมู่ฟังก์ชันของอะมิโนอยู่ 2 ตำแหน่ง มีการใช้งานในวัสดุคอมโพสิต สารเคลือบ กาว และสารเคลือบหลุมร่องฟัน จึงมีการนำมาใช้ในเทอร์โมเซต เทอร์โมพลาสติก และอีลาสโตเมอร์ รวมถึงอะคริลิก เซลลูโลส อีพอกซี ฟีนอล เมลามีน พอลิยูรีเทน พอลิยูเรีย พอลิคาร์บอเนต พอลิเอสเตอร์ ไนลอน พอลิสไตรีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต พอลิบิวทิลีนเทเรพทาเลต อะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน และซิลิโคน สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เพื่อสมบัติในด้านของการยึดเกาะที่แข็งแรงทนทานกับวัสดุต่าง ๆ เช่น เซรามิก และโลหะ สำหรับการยึดเกาะนี้เป็นผลมาจากเคมีอินทรีย์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากหมู่อะมิโนแบบปฐมภูมิ และแบบทุติยภูมิ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาอย่างแรง (เช่น พันธะโควาเลนต์ และพันธะไฮโดรเจน) ระหว่างส่วนประกอบอนินทรีย์ และอินทรีย์ของระบบ ยังมีการใช้เพื่อปรับปรุงในการรับแรงดัดงอ แรงอัด และแรงเฉือน ตลอดจนการยึดเกาะในระบบต่าง ๆ เช่น เทอร์โมเซต และเทอร์โมพลาสติก การปรับปรุงความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และการยึดเกาะ นอกจากนี้ยังมีความหนืดต่ำ มีลักษณะการไหลที่ดีขึ้น ลดเวลาในการผสมเนื่องจากสารมีความเข้าได้ดีขึ้นของส่วนประกอบคอมโพสิต ลดการใช้พลังงาน เพิ่มความสามารถในการกระจายของเรซิน ตลอดจนความสามารถในการทนต่อสารเคมี และความชื้นได้ดีขึ้น [30]

2.2.2.2 สารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซี (Epoxy silane coupling agent)

อีพอกซีไซเลน (3-ไกลซิโดซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน) เป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซีที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 236.3 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จุดเดือดอยู่ที่ 290 องศาเซลเซียส โดยมีจุดวาบไฟอยู่ที่ประมาณ 149 องศาเซลเซียส สำหรับโครงสร้างของอีพอกซีไซเลนแสดงดังตารางที่ 2.3

สารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซีสามารถใช้งานได้หลากหลายประเภท รวมถึงสีรองพื้น สารช่วยยึดเกาะ สารเคลือบด้านการขีดข่วน และปะเก็น เป็นต้น สารคู่ควบไซเลนสามารถปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกล การต้านทานต่อน้ำ และความต้านทานต่อความร้อนของวัสดุที่ประกอบด้วยสารตัวเติมอนินทรีย์ และพอลิเมอร์อินทรีย์ทั้งสองชนิดนี้เหมาะสำหรับการอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูง เช่น อีพอกซี ฟีนอลิก เมลามีน ยูรีเทน เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เช่น พอลิคาร์บอเนต ไนลอน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต พอลิบิวทิลีนเทเรพทาเลต และอะคริโลไนไตรล์บิวทา-

ไดอินสไตรีน สำหรับสารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซีสามารถทำงานได้ดีกับพื้นผิวอนินทรีย์ เช่น แก้ว ซิลิกา ไมกา อะลูมินา ดินเหนียว และแบงก์ รวมทั้งโลหะ เช่น เหล็ก และทองแดง [30]

2.2.2.3 สารคู่ควบไซเลนชนิดเมทาคริลิก (Methacrylic silane coupling agent)

เมทาคริลิกไซเลน (3-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซี) เป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดเมทาคริลิก ที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 248.4 มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.05 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จุดเดือดอยู่ที่ 125 องศาเซลเซียส โดยมีจุดวาบไฟอยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส สำหรับโครงสร้างของเมทาคริลิกไซเลนแสดงดังตารางที่ 2.3

สำหรับสารคู่ควบไซเลนชนิดเมทาคริลิกมักใช้ในพลาสติกเสริมใยแก้ว หรือพลาสติกที่ดัดแปลงด้วยสารตัวเติมเพื่อช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารตัวเติมในขณะที่แนวโน้มการตกตะกอนของสารตัวเติมลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลให้ความหนืดของเรซินลดลงอย่างมาก ตลอดจนการปรับปรุงสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมใยแก้ว หรือพลาสติกที่เติมแร่ นอกจากนี้การใช้สารคู่ควบไซเลนชนิดเมทาคริลิกในวัสดุเหล่านี้ยังทำให้มีความทนทานต่อความชื้น (ไอร่ะเหย) เพิ่มขึ้นอย่างมาก รวมถึงความทนทานต่อการกัด และเบสมากขึ้น รวมถึงการใช้เป็นโมโนเมอร์ร่วมในพอลิเมอร์ สารคู่ควบไซเลนชนิดเมทาคริลิกช่วยทำให้ที่สารยึดเกาะมีความทนทานต่อการขีดข่วน และรอยขีดข่วนที่ตีขึ้นมาก เนื่องจากการเชื่อมขวาง และการยึดเกาะที่แข็งแรงกับพื้นผิว โดยสารคู่ควบไซเลนเกิดการไฮโดรไลซ์ในที่มีความชื้นโดยเมทานอลถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อสร้างไซลานอล ซึ่งจากนั้นทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไซลอกเซน [31]

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลน [30, 31]

ชนิดของสารคู่ควบไซเลน	โครงสร้างของสารคู่ควบไซเลน
สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน (N-(2-(Aminoethyl)-8-aminoethyl- trimethoxysilane)	
สารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซี (3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane)	
สารคู่ควบไซเลนชนิดเมทาคริลิก (3-Methacryloxypropyltrimethoxysilane)	

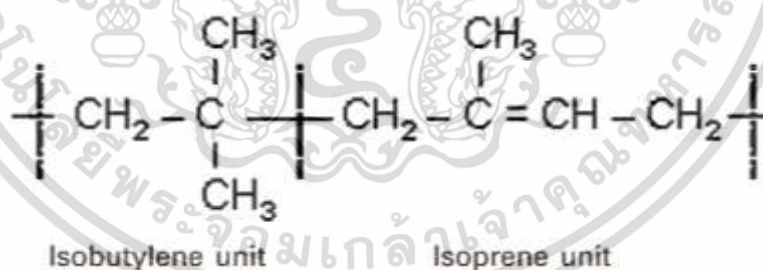
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 สารเพิ่มความเปียก (Wetting agent)

ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวที่ใช้ตัวทำละลายในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้สารเพิ่มความเปียก ซึ่งสารเติมแต่งกลุ่มนี้ที่มีการผสมในน้ำยาสารลดแรงตึงผิวของของเหลว เนื่องจากแรงตึงผิวของของเหลวที่สูงมากกว่าการเปียกของวัตถุ สารเพิ่มความเปียกจึงทำให้น้ำยาสารลดแรงตึงผิวของของเหลว มีความสามารถในการเปียกได้ดียิ่งขึ้นตลอดจนผสมสัมผัสกับวัสดุ จึงช่วยให้ของเหลวแพร่ หรือซึมเข้าสู่วัตถุได้ดี [32]

2.3 ยางบิวทิล (Butyl rubber, IIR)

ยางบิวทิล มีชื่อเต็มคือ ยางไอโซบิวทิลีนไอโซพรีน (Isobutylene isoprene rubber, IIR) เป็นโคโพลิเมอร์ระหว่างโมโนเมอร์ของไอโซพรีน (Isoprene) และไอโซบิวทิลีน (Isobutylene) สำหรับโครงสร้างของยางบิวทิลแสดงดังรูปที่ 2.15 ในยางบิวทิลมีการใช้ตัวเร่ง Ziegler-Natta สำหรับเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน [31] มีปริมาณของไอโซพรีนน้อยมาก ประมาณ 0.5-3% โมล มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 300,000 – 500,000 มีค่าความหนืดมูนนี่ (ML1+4@100 องศาเซลเซียส) อยู่ในช่วง 40 – 70 โดยทั่วไปยางบิวทิลมีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [33] ยางบิวทิลสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยกำมะถัน (Sulfur) ในระหว่างปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันได้ เพราะในไอโซพรีนมีพันธะคู่ว่างไวต่อการทำปฏิกิริยา โดยยางบิวทิลมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ประมาณ -70 องศาเซลเซียส [34]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของยางบิวทิล [34]

จากโครงสร้างทางเคมี ทำให้เห็นว่ายางบิวทิลประกอบด้วยส่วนที่อิ่มตัว (Saturated) เป็นส่วนใหญ่ทำให้ถูกตัด หรือขาดได้ยากเมื่อได้รับแรงเฉือน และอุณหภูมิสูง ทำให้ยางมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากออกซิเจน โอโซน และความชื้น อย่างไรก็ตามพันธะคู่ที่มีอยู่เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ยางคงรูปด้วยกำมะถันได้ โดยที่การคงรูปสามารถเกิดได้เร็ว หรือช้าขึ้นอยู่กับปริมาณของพันธะคู่ ถ้าเพิ่มปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุล ส่งผลให้การคงรูปเกิดได้เร็ว ยางมีความแข็งแรง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยืดหยุ่นสูงขึ้น แต่ความทนทานต่อโอโซน และสภาพอากาศด้อยลง ทำให้ยางบิวทิลจึงมีสมบัติที่โดดเด่น ดังนี้

- ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability) ต่ำมาก (ต่ำกว่ายางธรรมชาติ ประมาณ 8-10 เท่า)
- มีความสามารถในการต้านทานโอโซน (Ozone resistance) และดินฟ้าอากาศ (Weathering resistance) ดี
- มีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)
- มีความสามารถในการรับแรงสั่นสะเทือน (Vibration damping) ได้ดีตั้งแต่ในช่วงอุณหภูมิห้องถึงประมาณ 100 องศาเซลเซียส
- มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Frictional coefficient) สูง
- มีความทนทานต่อการพับงอ (Flex resistance)
- มีสมบัติค่าการกระเด็นกระดอน (Rebound Resilience) ต่ำที่อุณหภูมิห้อง และมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
- มีความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ค่อนข้างสูง
- ทนสารเคมี (Chemical resistance) และความชื้น (Moisture resistance)
- มีความทนทานต่อน้ำมันพืช และน้ำมันสัตว์ได้ดีมาก
- มีความทนทานต่อกรด เบส และสารเคมี
- มีความทนทานต่อการถูกออกซิไดซ์

จากสมบัติที่กล่าวมาทำให้ยางบิวทิลเหมาะสมในการผลิตยางในรถยนต์ ใช้ทำถุงลมยางสำหรับบอลลูนให้คงรูป (Curing bladder) ในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ ทำจุกยางภาชนะทางเภสัชกรรม ทำฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า แผ่นยางใช้ภายนอกอาคาร และยางหุ้มกันกระแทก (Mounts) เป็นต้น [34]

2.4 ยางฮาโลบิวทิล (Halobutyl Rubber, XIIR)

ยางฮาโลบิวทิลเป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาฮาโลจิเนชัน (Halogenation) ของยางบิวทิลกับก๊าซคลอรีน (Cl_2) หรือก๊าซโบรมีน (Br_2) ได้เป็นยางคลอโรบิวทิล (CIIR) หรือยางโบรมอบิวทิล (BIIR) ตามลำดับ ยางฮาโลบิวทิลนี้มีปริมาณฮาโลเจนอยู่น้อยมาก จึงไม่จัดอยู่ในพวกยางที่มีขี้ แต่ยางชนิดนี้คงรูปได้เร็ว มีระดับการคงรูปสูง และมีความต้านทานต่อการเกิด Reversion ในระหว่างการคงรูปได้ดี ดังนั้นยางฮาโลบิวทิลจึงสามารถใช้ผสมกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่น ๆ เช่น ยางธรรมชาติได้ดี และยังสามารถเกิดการคงรูปร่วมกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่น ๆ ได้ สมบัติของยางชนิดนี้โดยทั่วไปดีกว่ายางบิวทิลเล็กน้อยคือ มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่ามีความทนทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อไอโซน ความร้อน สภาพอากาศ และสารเคมีต่าง ๆ ได้ดีกว่า แต่มี Hysteresis สูงกว่าการใช้งาน นิยมใช้ผลิตยางโอริง หรือปะเก็น ยางชนิดที่ต้องทนต่อสารเคมี ท่อไอน้ำ ยางบุด้านในของยางล้อแบบ ไม่มียางใน (Inner liner) สายพานยางบุต่าง ๆ และจุกปิดขวดยา เป็นต้น [35]

2.5 ถุงลมยาง (Bladder)

ถุงลมยางเป็นวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปยางล้อ โดยผลิตจากยางสังเคราะห์เป็นองค์ประกอบหลัก มักนิยมใช้ยางบิวทิล และสารเติมแต่ง ๆ ในการผลิตถุงลมยาง เนื่องจากยางบิวทิลมีสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากความร้อน และการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี โดยลักษณะของถุงลมยาง [6] แสดงดังรูปที่ 1.3

2.5.1 การใช้งานของถุงลมยาง

การใช้งานถุงลมยางต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์ที่รองรับเฉพาะการทำงานของถุงลมยาง และใช้ในการขึ้นรูปยางล้อคือ แบบแม่พิมพ์ฝาล่างที่มีส่วนสัมพันธ์กัน ถุงลมยางสามารถขยายตัว-หดตัวในแนวรัศมี และแนวตั้ง ลูกสูบที่ควบคุมถุงลมยางต้องสัมพันธ์กับแบบแม่พิมพ์ฝาล่าง อีกทั้งถุงลมยางต้องสามารถเคลื่อนที่ขึ้นได้เพื่อความสะดวกในการนำยางล้อที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วออกจากแม่พิมพ์

ยางล้อที่สร้างเสร็จแล้วอยู่ที่ขอบของถุงลมยางโดยลวดขอบล้อ (Bead) ด้านล่างของยางล้อมีสัมผัสกับส่วนบนของผิวด้านในของแบบพิมพ์ฝาล่าง ชุดกระบอบอกสูบ และลูกสูบ มีการเคลื่อนที่มารวมกันกับตัวส่งยางล้อที่สร้างเสร็จแล้ว ชุดลูกสูบดังกล่าวเมื่อยืดออกแล้ว ทำให้ลูกสูบที่ควบคุมถุงลมยางที่ขยายตัวในแนวรัศมี และดันถุงลมยางเข้าภายในยางล้อที่สร้างเสร็จแล้ว จากนั้นจึงเริ่มฉีดไอน้ำเข้าไปในช่องว่างของถุงลมยางระหว่างชุดหนีบด้านบน และล่าง จากนั้นถุงลมยางถูกทำให้ขยายตัวจนพองเพื่อให้พื้นผิวของถุงลมยางสัมผัสกับห้องยางล้อที่สร้างเสร็จแล้ว จากนั้นเกิดการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำที่ไหลเวียนอยู่ภายในถุงลมยาง และเกิดการบ่มยางล้อดังกล่าว เมื่อยางล้อสุกตัวตามเวลาที่กำหนดแล้วฝาดบนของเครื่องบ่มยางล้อมีเคลื่อนที่ขึ้น ถุงลมยางถูกระบายน้ำร้อน หรือไอน้ำ และความดันภายในลดลง จากนั้นถุงลมยางจึงเกิดการหดตัวลง และเคลื่อนที่ขึ้น สำหรับกระบวนการขึ้นรูปยางล้อ แสดงดังรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 ถูกลมยาง และกรีนไทร์ที่ประกอบเข้ากับแม่พิมพ์เพื่อทำการขึ้นรูป [8]



รูปที่ 2.17 ยางล้อหลังทำการบ่มสุก [8]

2.5.2 การบำรุงรักษาถูกลมยางในระหว่างใช้งาน

ถูกลมยางจำเป็นต้องมีการดูแลรักษา เช่น การทำความสะอาดผิว การพ่นเพื่อกันติดกับวัสดุ เนื่องจากการที่ถูกลมยางติดกับกรีนไทร์ ทำให้มีการเกิดขึ้นของพื้นผิวที่ไม่สมบูรณ์ หรือเกิดรอยขึ้นจนเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ซึ่งสามารถทำความสะอาดพื้นผิวของถูกลมยางระหว่างการใช้งานทุก 8 ชั่วโมง โดยการทาด้วยน้ำสบู่ ซิลิโคน หรือสารถอดแบบ เป็นต้น [6]

2.5.3 สมบัติที่ต้องการของถูกลมยาง

ถูกลมยางมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพ และประสิทธิผลในการผลิตของอุตสาหกรรมยางล้อ เนื่องจากถูกลมยางที่ดี ส่งผลทำให้มีการถ่ายเทความร้อน และมีความสามารถในการเชื่อมโยงยางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีอัตราการผลิตสูง นอกจากนี้ทำให้ไม่เกิดการยึดติด หรือต้องมีการฉีดพ่นสารเคลือบบ่อย ๆ เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของถูกลมยาง และสามารถใช้ทำนายความสามารถในการผลิตของกระบวนการผลิตยางล้อ ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการผสมยาง การฉาบผ้าใบ การรีดยาง และองค์ประกอบของกระบวนการผลิตยางล้อ ดังนั้นถูกลมยางที่ดีควรมีสมบัติดังต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถบ่มที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้
- มีความต้านทานต่อการถูกบ่มเร่งด้วยความร้อนดี
- สามารถหักงอได้ดี เมื่อถูกบ่มเร่งด้วยความร้อน
- มีความต้านทานต่อการฉีกขาดดี
- มีความต้านทานต่อโอโซนดี
- มีความยืดหยุ่นที่ดี

2.5.4 ลักษณะข้อบกพร่องของถุงลมยาง

โดยทั่วไปยางที่ผ่านกระบวนการบ่มเร่งแล้ว อาจเกิดการเสื่อมสภาพ โดยอุณหภูมิ และโอโซน เป็นปัจจัยหลัก ทำให้โครงสร้างยางเสื่อมสภาพส่งผลคือ สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านพลศาสตร์ของยางเสื่อมลง เช่น ยางจึงค่อย ๆ แข็งขึ้น ค่าโมดูลัสสูงขึ้น ความเป็นอีลาสติกลดลงเกิดการแตกบนพื้นผิว และยางเกิดการขาดอย่างรวดเร็วเมื่อออกแรงกระทำซ้ำ ๆ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของยางที่บ่มเร่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในโมเลกุลหลักของยาง และที่พันธะเชื่อมโยง การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปของโมเลกุลหลักของยางคือ การขาดออกจากกันเกิดเป็นสายโซ่เล็ก ๆ มวลโมเลกุลลดลง ดังนั้นความเป็นอีลาสติกลดลงด้วย [6] สำหรับตัวอย่างข้อบกพร่องของถุงลมยาง แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างข้อบกพร่อง หรือตำหนิต่าง ๆ ที่พบในถุงลมยาง [6]

ข้อบกพร่อง	สาเหตุ	ข้อเสนอแนะ
1. แยกเป็นชั้น (ผิวไม่เรียบ)	- เกิดการปนเปื้อน	- ตรวจสอบการปนเปื้อนจากชั้นตอนการผสม และการขึ้นรูป
2. มีรอยพับที่ผิว	- ถุงลมยางมีขนาดใหญ่กว่ายางล้อ	- ใช้ขนาดของถุงลมยางให้เหมาะสมกับยางล้อ
3. ด้านในของถุงลมยางหลอมละลาย	- เกิดการออกซิเดชัน - เกิดการปนเปื้อนจากโลหะ	- มีออกซิเจนในไอน้ำ หรือน้ำ/ (≥ 150 ppm) - ตรวจสอบระบบขึ้น-ลงของถุงลมยางระหว่างการใช้งาน
4. ผิวแข็งเปราะ	- สารเคมีจากยางล้อแพร่เข้าสู่พื้นผิวของถุงลมยาง	- ทำความสะอาดผิวของถุงลมยาง - ใช้ยางบิวทิลชนิดที่มีโบรมีน
5. แยกเป็นชั้น (ผิวเรียบ)	- ส่วนผสมสุกก่อนกำหนด - มีสารหล่อลื่น และสารระเหยปนเปื้อน	- ลดปริมาณไอโซพรีนในยางบิวทิล - ลดปริมาณของเรซิน - ลดปริมาณหมู่เมทิลอลในเรซิน - เพิ่มความสามารถในการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ให้บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางผู้จัดทำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อบกพร่อง	สาเหตุ	ข้อเสนอแนะ
6. มีฟองอากาศ หรือมี รุพ-run	- ตรวจสอบสภาพของการผสมยาง - อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป	- รุพ-run เกิดจากอุณหภูมิของการขึ้นรูปสูง ทำให้ส่วนผสมสุกก่อนกำหนด
7. ฉีดขาด	- ความยืดหยุ่นร้อนต่ำ	- ปรับปรุงความยืดหยุ่นร้อน - ลดปริมาณเรซิน - เพิ่มปริมาณไอโซพรีนในยางบิวทิล
8. มีก้อนยางแข็งใน ส่วนผสม	- นิโอพรีนสุกก่อนกำหนด	- เพิ่มขึ้นตอนการกรองในกระบวนการขึ้นรูป
9. รอยต่อแยกออกจากกัน	- มีสารหล่อลื่นปนเปื้อน - มีสารระเหยปนเปื้อน	- ห้ามใช้สารระเหย หรือสารหล่อลื่นระหว่างการต่อยาง
10. ถูกลมยาง ใหม่มีผิว ไม่สวย	- แบบพิมพ์สกปรก	- ทำความสะอาดพื้นผิวแบบพิมพ์
11. ถูกลมยางยืดแล้วไม่ หดกลับ	- การคงตัวระหว่างการยืดสูง (Tension set)	- เพิ่มปริมาณพันธะเชื่อมโยง - เพิ่มอุณหภูมิ หรือเวลาในการบ่ม - เพิ่มปริมาณเรซิน

2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.6.1 ไตรโบโลยี (Tribology)

ไตรโบโลยี (Tribology) คือ สหศาสตร์ทางวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีที่ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างการเสียดทาน (Friction) การสึกหรอ (Wear) และการหล่อลื่น (Lubricant) ของพื้นผิวสัมผัสของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสกันที่หลากหลาย เช่น การเลื่อนไหล การเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมา การหมุน เป็นต้น ซึ่งคำว่า Tribo มาจากภาษากรีก ที่แปลว่า “ขัดถู” เป็นหลักวิชาการหลายแขนงทั้งพื้นฐานทางด้านกลศาสตร์ของไหล การเคลื่อนที่ และขัดสีของชิ้นส่วนทางกล เป็นต้น ปัญหาทางด้านไตรโบโลยีเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนจำเป็นต้องอาศัยความรู้จากหลากหลายแขนง เช่น ฟิสิกส์เครื่องกล (Tribophysics) เคมี (Tribocchemistry) โลหะวิทยา (Metallurgy) และวัสดุศาสตร์ และในบางกรณีที่เกี่ยวข้องกับการนำความรู้ทางด้านธรณีวิทยา และชีววิทยา (Biotribology) มาใช้ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นทางไตรโบโลยีด้วย [36] ยกตัวอย่างเช่น ในการผลิตวัสดุรองรับ (Bearing) จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติทางกลของวัสดุร่วมกับสมบัติทางไตรโบโลยีภายใต้สภาวะการใช้งานที่เหมาะสม [37] สารหล่อลื่นนอกจากความต้องการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และการสึกหรอแล้ว ต้องพิจารณาถึงสมบัติทางเคมี สมบัติทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมบัติทางกลร่วมกับสมบัติทางไตรโบโลยีด้วย [36] โดยปัจจุบันการศึกษา และทดสอบทางด้าน ไตรโบโลยีมีบทบาทสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมหลายประเภทเพื่อช่วยในการออกแบบการผลิต

2.6.1.1 การทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer)

เครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) คือเครื่องมือในการทดสอบด้านไตรโบโลยีเพื่อ ตรวจวัดค่าปริมาณทางไตรโบโลยีที่เกี่ยวข้องกับการเสียดทาน การสึกหรอ และการหล่อลื่น เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทาน ค่าแรงเสียดทาน หรือปริมาณการสึกหรอ โดยสมบัติด้านไตรโบโลยี ของสารหล่อลื่นเป็นส่วนที่สำคัญในการพัฒนาสารหล่อลื่น โดยทั่วไปแล้วการทดสอบสมบัติทาง ไตรโบโลยีของสารหล่อลื่น สามารถพิจารณาได้จากมาตรฐานของเครื่องมือทดสอบ และวิธีการ ทดสอบทางไตรโบโลยีที่เป็นมาตรฐาน โดยวิธีการทดสอบตามมาตรฐานเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตรง ตามที่ผู้ผลิต และผู้ใช้งานต้องการ สำหรับการทดสอบทางไตรโบโลยีนี้มีการออกแบบวิธีการทดสอบที่ สอดคล้องกับสภาวะการใช้งาน ซึ่งใช้ในการคาดคะเนพฤติกรรมการสึกหรอเพื่อประเมินอายุการใ้ งานของอุปกรณ์

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความทนทานของฟิล์ม สารลดแรงเสียดทานตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G133-05 [9] โดยระบบการวัดของเครื่องทดสอบนี้ สามารถจำลองการให้แรง และใช้รูปแบบการเคลื่อนที่ของคู่สัมผัสเป็นแบบไป-กลับ (Reciprocating) หัวกดที่ใช้คือ ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความเร็วในการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โหลดน้ำหนัก 500 กรัม ระยะเคลื่อนที่ของลูกบอล 2 มิลลิเมตร หรือ 4 มิลลิเมตรของระยะทางรวมไป-กลับ



รูปที่ 2.18 เครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 หัวกดลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ของเครื่องไทรโบมิเตอร์

2.6.1.2 การเสียดทาน (Friction)

การเสียดทานคือ การต้านทานของแรงเสียดทานต่อการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างสองพื้นผิวสัมผัส โดยแรงเสียดทานเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัส และมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ หรือตรงข้ามกับทิศทางของแรงที่พยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่ [38] หากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับพื้นผิวของของแข็งเรียกว่า แรงเสียดทานแห้ง (Dry friction force) และแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับพื้นผิวของของเหลวเรียกว่า แรงเสียดทานเปียก (Fluid friction force) [39]

ตัวอย่างการเสียดทาน เช่น การเสียดทานแบบลื่นไถล (Sliding Friction) คือ การเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบลื่นไถลระหว่างผิวสัมผัสที่ไม่มีการกลิ้ง และแรงเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling friction) คือ เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่แบบกลิ้งระหว่างชิ้นงานคู่สัมผัส เป็นต้น

สำหรับค่าแรงเสียดทานไม่ใช่สมบัติของวัสดุ แต่เป็นผลของระบบที่เกิดจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) สามารถคำนวณได้จากแรงเสียดทาน (F) ต่อแรงกดที่หน้าสัมผัส (N)

$$\mu = \frac{F}{N}$$

โดยทั่วไปแรงเสียดทานสามารถแบ่งได้เป็น 2 องค์ประกอบคือ แรงยึดติด (Adhesion force: F_a) ที่เกิดขึ้นระหว่างคู่สัมผัส และแรงที่ทำให้เกิดการเสียรูป (Deformation force: F_d) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของคู่สัมผัส แรงที่ทำให้เกิดการเสียรูปโดยทั่วไป เรียกว่า แรงไถครูด (Ploughing) ที่ทำให้เกิดการเสียรูปที่ผิวหน้าของคู่สัมผัส

$$F = F_a + F_d$$

แรงที่ทำให้เกิดการเสียรูปดังกล่าวคือ แรงเสียดทานไถครูด (Ploughing friction) ซึ่งทำให้เกิดการเสียรูปได้ในระดับมหภาค (Macro) และเกิดการเสียรูปในระดับจุลภาค (Micro) [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.2.1 ทฤษฎีการเสียดทาน

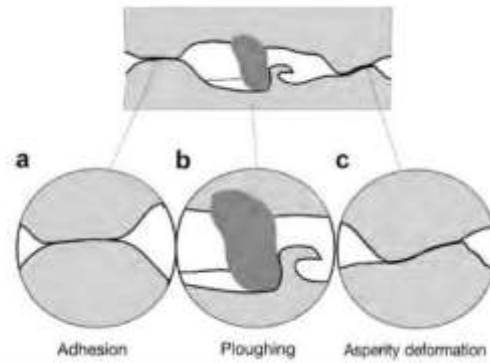
การเสียดทานที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่าง ๆ เป็นการนำเอาแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากองค์ประกอบในระดับมหภาค เช่น มุมสัมผัสของพื้นผิว (Surface contact area) และค่าความถี่ของแรงกด (Hertz contact pressure) มาทำการอธิบายผลของพฤติกรรม หรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระดับจุลภาค รวมถึงผลกระทบของรูปร่างลักษณะพื้นผิว การชนกันของยอดแหลมของความหยาบผิว (Asperities) และชั้นโมเลกุลของผิวด้านนอก (Boundary layers) ที่มีผลต่อการเสียดทาน เมื่อผิวหน้าของชิ้นส่วนมีการสัมผัสกัน ปลายยอดของความหยาบผิวถูกแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าสัมผัสทำให้เกิดการเชื่อมติดกันจากการยึดติด (Adhesion) ของวัสดุทั้งสองชิ้น แสดงดังรูปที่ 2.20 (a) เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันทำให้ปลายยอดที่เชื่อมติดอยู่ด้วยกันเกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ในขณะที่มีการเลื่อนไถลการยึดติด และการฉีกขาดของส่วนที่เชื่อมติดกันเกิดขึ้นซ้ำ ๆ ตลอดเวลา แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองการยึดติดที่ได้ และยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายด้าน

- ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่คำนวณทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบไม่สอดคล้องกันด้านวัสดุคู่สัมผัส

- อิทธิพลของความหยาบผิวที่มีต่อการเสียดทานไม่ได้นำไปรวมอยู่ในแบบจำลอง

- ค่าการยึดติดไม่สามารถตรวจสอบได้ในกรณีที่มีการแยกผิวคู่สัมผัสออกจากกันโดยตรง

ผลกระทบจากการไถลครูดเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงเสียดทาน เนื่องจากปลายยอดของความหยาบผิวจากวัสดุที่มีความแข็งสูงกว่า หรืออนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่แทรกตัวบริเวณหน้าสัมผัสขณะเกิดการเลื่อนไถล ทำให้เกิดการเสียดรูปแบบไถลครูด และเกิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของคู่สัมผัส แสดงดังรูปที่ 2.20 (b) ดังนั้นทำให้แบบจำลองของการเสียดทานได้ปรับปรุงให้ครอบคลุมมากขึ้น โดยนำปัจจัยด้านมุมของความหยาบผิว และรัศมีรอยเชื่อมติดกันของปลายยอดความหยาบผิวมาพิจารณาร่วมด้วยเป็นการเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างคู่สัมผัสที่มีการเคลื่อนที่เลื่อนไถล ประกอบด้วยการยึดติด และการไถลครูด นอกจากนี้อิทธิพลของการเสียดรูปแบบถาวรของปลายยอดความหยาบผิว แสดงดังรูปที่ 2.20 (c) เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิว และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเปลี่ยนแปลงไป จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นผลมาจากอิทธิพลของการยึดติด การเสียดรูปของปลายยอดความหยาบผิว การเกิดการไถลครูดจากความหยาบผิว และอนุภาคของแข็งระหว่างคู่สัมผัส



รูปที่ 2.20 องค์ประกอบของการเสียดทานแบบเลื่อนไถล (Sliding friction) [39] (a) การยึดติด (b) การไถครูด (c) การเสียรูปของปลายยอดของความหยาบผิว

2.6.1.2.2 การเกิดความเสียหายในระดับจุลภาค

การอธิบายถึงการเสียดทานต่อมาได้มีการพิจารณาถึงกลไกของความเสียดทานในระดับจุลภาค ซึ่งมีการพบว่า อิทธิพลของสมบัติทางกลมีผลต่อพฤติกรรมของการเสียดทานมากกว่าสมบัติทางเคมี เมื่อการเลื่อนไถลทำให้อุณหภูมิบริเวณหน้าสัมผัสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย กลไกการเกิดการเสียดทานมีสาเหตุหลักมาจากการเสียรูปของปลายยอดความหยาบผิว การยึดติด และการแทรกตัวของอนุภาคขนาดเล็กที่หน้าสัมผัสทำให้เกิดการไถครูด แสดงดังรูปที่ 2.20 และอิทธิพลจากการยึดติดมีผลน้อยกว่าสาเหตุหลักดังกล่าว ซึ่งสามารถอธิบายได้จากผลการทดลอง ดังนี้

- แรงเสียดทานเนื่องจากการเสียรูปของปลายยอดความหยาบผิว มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสถิต (Static coefficient of friction) เมื่อปลายยอดความหยาบผิวเกิดการเสียรูปถาวร คู่สัมผัสเกิดการเชื่อมติดกันได้ยาก คู่สัมผัสดังกล่าวสามารถมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงคงที่ (Steady-state) ได้ ถ้าปลายยอดความหยาบผิวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลาเนื่องจากกระบวนการสึกหรอ (Wear process)

- แรงเสียดทานจากการยึดติด มีค่าต่ำเมื่อคู่สัมผัสมีการหล่อลื่นที่ดี และมีค่าสูงเมื่อคู่สัมผัสเกิดการเลื่อนไถลโดยตรงไม่มีสิ่งสกปรก หรือชั้นของออกไซด์

- แรงเสียดทานจากการไถครูด มีค่าต่ำลงเมื่ออนุภาคการสึกหรอถูกกำจัดออกไปจากหน้าสัมผัส หรือเมื่อมีวัสดุอ่อนลื่นไถลบนวัสดุที่มีความแข็งสูงกว่า และแรงเสียดทานมีค่ามากเมื่อเกิดการสึกหรอที่ผิวด้านใดด้านหนึ่งมากกว่าจากเศษการสึกหรอ

จากผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นถึงกลไกการไถครูดของเศษการสึกหรอส่งผลกระทบต่อกลไกการเกิดแรงเสียดทานในสภาวะการเลื่อนไถลของคู่สัมผัสจำนวนมาก แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ไม่สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุตามทฤษฎี แต่อย่างไรก็ตามมีคู่สัมผัสของวัสดุหลายชนิดทั้งในกรณีของคู่สัมผัสจากวัสดุชนิดเดียวกัน และคู่สัมผัส

จากวัสดุต่างชนิดกัน พบว่าแรงเสียดทานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวัสดุที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่พฤติกรรมของแรงเสียดทาน และความต้านทานแรงดึงของวัสดุ มักมีค่าสอดคล้องกัน นอกจากนี้มีผลงานวิจัยที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขณะเริ่มต้นสั่นไถลที่มีค่าต่ำลง เนื่องจากฟิล์มของการหล่อลื่นแบบบาวนด์ (Boundary lubrication film) ที่มีความหนาในระดับไมโครเมตร (ระดับนาโนเมตร) สามารถลดแรงเสียดทานได้อย่างชัดเจนโดยที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกับผลของความหยาบผิว และการไถครูดขณะสั่นไถล แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของคู่สัมผัสที่มีความหยาบผิวต่ำ มักส่งผลทำให้มีแรงเสียดทานในสภาวะคงที่ (Steady state) มีค่าต่ำกว่าคู่สัมผัสที่มีความหยาบผิวสูงประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีสารหล่อลื่นแรงเสียดทานในช่วงเริ่มต้นยังสามารถลดต่ำลงได้ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงเสียดทานในช่วงคงที่สามารถลดลงได้ถึง 10-60 เปอร์เซ็นต์ จากผลการศึกษาในช่วงเวลานี้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการไถครูด และการยึดติดมีความสำคัญต่อกลไกการเสียดทานบริเวณหน้าสัมผัสที่มีการสั่นไถล และส่งผลต่อพฤติกรรมของการเสียดทานที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะต่าง ๆ ทางไตรโบโลยีของหน้าสัมผัส ซึ่งเป็นผลมาจากเศษสึกหรอที่เกิดขึ้นในระหว่างการสั่นไถล

2.6.1.2.3 การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานต่อเวลา

การเปลี่ยนแปลงบริเวณหน้าสัมผัสของชิ้นส่วนตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปที่ส่งผลทำให้พฤติกรรมของแรงเสียดทานเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไปสามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมช่วงการทดสอบเริ่มต้น (Running-in) ตามด้วยช่วงคงที่ (Steady-state) และช่วงชำรุดเสียหาย (Breakdown) จากการศึกษาพบว่า การควบคุมพฤติกรรมของการเสียดทานในช่วงเริ่มต้นส่งผลทำให้เกิดแรงเสียดทานที่เหมาะสมในช่วงคงที่ ซึ่งช่วงของการเสียดทานแบบคงที่ จึงเป็นตัวกำหนดถึงอายุการใช้งานของชิ้นส่วนนั้น ๆ ต่อไปจากกลไกการเสียดทานที่แตกต่างกันทำให้สามารถแบ่งลักษณะของการเสียดทานได้เป็นหลายสภาวะ แสดงดังรูปที่ 2.21

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงเริ่มต้นของการเสียดทาน แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เป็นผลมาจากการไถครูดจากปลายยอดความหยาบผิวของคู่สัมผัส ซึ่งการยึดติดยังไม่ส่งผลต่อแรงเสียดทานมากนัก เนื่องจากผิวคู่สัมผัสอาจมีสิ่งเจือปน (Contamination) ติดอยู่ในการสั่นไถล เกิดการเสีรูปร่างของปลายยอดความหยาบผิวเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อแรงเสียดทานสถิต ในช่วงนี้ผิวหน้าเกิดการสึกหรอ และขัดถู ทำให้มีความหยาบผิวลดลง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงแรกจึงมีค่าสูงอย่างมาก โดยไม่ขึ้นกับชนิดวัสดุคู่สัมผัส สภาพของผิวหน้าชิ้นงาน และสภาวะแวดล้อม

ช่วงที่ 2 การสึกหรอผิวหน้าจากช่วงที่ 1 ทำให้สิ่งเจือปนที่ผิว และเนื้อจริงของวัสดุถูกขัดสีออกไป ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของการยึดติด

ช่วงที่ 3 การเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคการสึกหรอที่เกิดขึ้น และแทรกตัวอยู่ระหว่างคู่สัมผัส การเสีรูปร่างของยอดความหยาบผิวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และแรงยึดติดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดผิวใหม่จากการสึกหรอตลอดเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคการสึกหรอบางส่วนที่อยู่ระหว่างคู่สัมผัสทำให้เกิดการไถครูด ถ้าเศษจากการสึกหรอแทรกตัวอยู่ระหว่างวัสดุที่มีความแข็งใกล้เคียงกัน ทำให้เศษการสึกหรอฝังตัวอยู่บนผิวหน้าของคู่สัมผัสทั้งสอง และทำให้ลื่นไถลยากขึ้น ส่งผลทำให้แรงเสียดทานจากการไถครูดมีค่าสูง

ช่วงที่ 4 จำนวนเศษการสึกหรอที่แทรกตัวอยู่ระหว่างผิวคู่สัมผัสมีปริมาณคงที่ เนื่องจากอัตราการแทรกตัว และหลุดออกจากหน้าผิวสัมผัสมีปริมาณเท่ากัน แรงยึดติดมีค่าคงที่ และปลายยอดความหยาบผิวถูกทำให้เสียรูปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการสึกหรอแบบหลุดร่อนเป็นแผ่น (Delamination) ทำให้เกิดผิวใหม่ที่มีความหยาบขึ้นมาใหม่ ในช่วงที่ 4 เป็นช่วงที่มีแรงเสียดทานอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady-state)

ช่วงที่ 5 ในกรณี เช่น เมื่อคู่สัมผัสมีความแข็งแตกต่างกันมาก ปลายยอดความหยาบผิวของวัสดุแข็งจึงขูดสีกออกไปจนกระทั่งมีผิวหน้าเป็นมันเงาค่อยๆลดลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจึงมีค่าลดลง เนื่องจากการลดลงของการเสียรูปที่ปลายยอดความหยาบผิว และไถครูดจากอนุภาคการสึกหรอที่ไม่สามารถฝังลงในผิวหน้าของวัสดุแข็งได้

ช่วงที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มลดลง และเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อผิวหน้ามีรอยสึกของคู่สัมผัสทั้งคู่เกิดเป็นผิวเรียบคล้ายกระจก



รูปที่ 2.21 การเปลี่ยนแปลงกลไกการเสียดทานที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าในช่วงเริ่มต้นของการลื่นไถล

[39]

2.6.1.2.4 กฎ และสมการแรงเสียดทาน

กฎแรงเสียดทานของ Amontons ทั้ง 2 ข้อ ได้นำมาอ้างอิง และใช้งานอย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถอธิบายเชิงแรงเสียดทานระดับจุลภาค และมหภาค [39] โดยที่กฎข้อที่ 1 กล่าวถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างแรงเสียดทาน และแรงกด นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ) เป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับแรงกด และกฎข้อที่ 2 กล่าวถึงแรงเสียดทาน หรือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่ขึ้นกับพื้นที่ผิวปรากฏ (Apparent area of contact) ระหว่างคู่สัมผัส แสดงให้เห็นว่าขนาดของพื้นที่สัมผัสไม่ได้มีอิทธิพลต่อแรงเสียดทาน และนอกจากนี้ก็มีกฎของแรงเสียดทานของคูลอมบ์ (Coulomb's) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

law of friction) หรือเรียกว่ากฎของแรงเสียดทานข้อที่ 3 ของ Amonton ได้กล่าวถึงแรงเสียดทานไม่ขึ้นกับความเร็วในการเลื่อนไถล ซึ่งในการนำกฎของแรงเสียดทานทั้ง 3 ข้อไปใช้งานยังมีข้อจำกัดเป็นจำนวนมาก

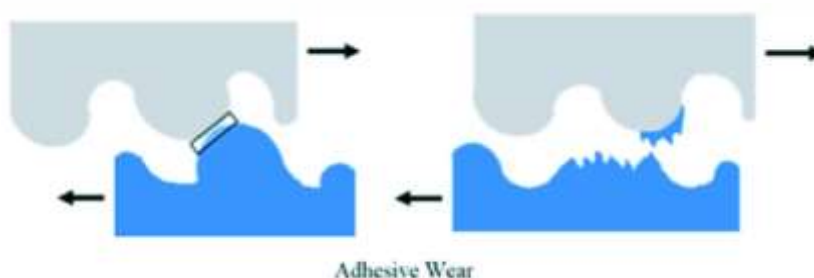
ในปัจจุบันนี้การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นโดยพิจารณาถึงผลกระทบของคู่สัมผัสที่มีต่อการเสียดทานร่วมกัน เพื่อให้ได้สมการที่สามารถนำมาใช้งานได้ครอบคลุมมากขึ้น เช่น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นร่วมกันของปลายยอดความหยาบผิว และการเสียดรูป การเกิดเศษการสึกหรอ/การไถครูด และการยึดติดที่มีต่อแรงกด และพื้นที่ผิวสัมผัส โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ให้ผลที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น แต่มีตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของการเสียดทาน เช่น แรงยึดติด ขนาดของเศษสึกหรอ ความหนาแน่นของเศษการสึกหรอ ร้อยละที่เศษการสึกหรอทำให้เกิดการไถครูดในวัสดุที่อ่อนกว่า และปลายยอดความหยาบผิวที่ทำให้เกิดการไถครูด และยึดติด

2.6.1.3 การสึกหรอ (Wear)

การสึกหรอ (Wear) คือ การสูญเสียเนื้อผิวสัมผัสของวัตถุเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัสทั้งทางกล หรือทางเคมี ทำให้วัสดุมีน้ำหนัก และมิติเปลี่ยนไปในขณะที่ใช้งาน การสึกหรออาจเกิดขึ้นในระดับช้า หรือเร็ว โดยมีการกำหนดค่าของการสึกหรอ ซึ่งวิธีการตรวจสอบปริมาณการสึกหรอ คือ การชั่งน้ำหนักก่อนทดสอบ และหลังจากการผ่านการทดสอบการสึกหรอ ลักษณะความเสียหายของวัสดุอาจทำให้ชิ้นงานมีขนาด และรูปทรงที่เปลี่ยนไป ซึ่งรูปแบบของการสึกหรอ สามารถจำแนกประเภทจากสาเหตุของการเกิดตามมาตรฐาน DIN 50320 ได้ 4 รูปแบบ คือ

1. การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesion wear)

การที่วัสดุสองชิ้น มีการเคลื่อนที่ในแนวไถล (Sliding contact) และเกิดการถูกันจนเกิดความเค้นสัมผัส (Contact stress) ที่สูง เกิดจุด Yield stress ของวัสดุ ซึ่งวัสดุที่อ่อนกว่าจึงอยู่ในสภาวะ Plastic zone และถูกวัสดุที่แข็งกว่าฉีกเนื้อออกไป และติดกันไป ซึ่งในแวดวงอุตสาหกรรมมีการใช้อีกหลาย ๆ ชื่อ เช่น Scoring, Scuffing, Galling หรือ Seizure แสดงดังรูปที่ 2.22

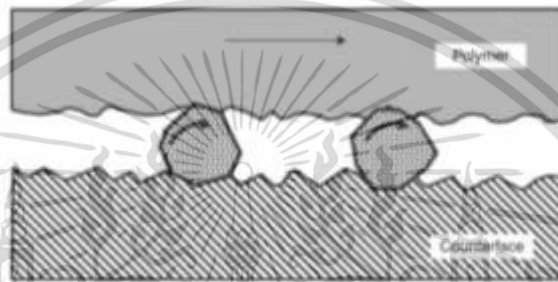


รูปที่ 2.22 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสึกกร่อนแบบขัดสี (Abrasive wear)

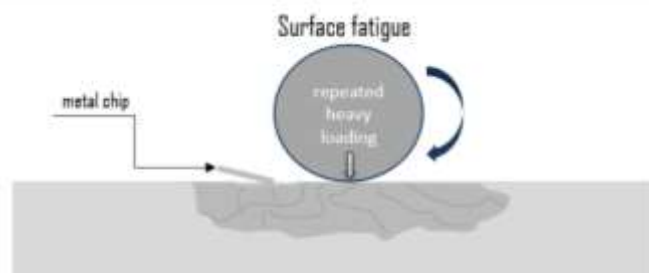
การที่ผิวหน้าของวัสดุสองชิ้น ถูกเสียดสีโดยอนุภาคที่มีความแข็งสูงกว่า (Abrasive particle) เช่น สสาร หรือสิ่งสกปรก (Contaminants) ที่มีความแข็งสูง เช่น เม็ดทราย ฝุ่นละออง หรือเม็ดแร่ธาตุที่มีความแข็ง ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านตรงกลางระหว่างวัสดุทั้งสองชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ทำให้จนเนื้อวัสดุทั้งสองชิ้นหายไป ซึ่งการหายไปของเนื้อวัสดุจึงค่อย ๆ หายไปที่ละเล็กทีละน้อย ภายใต้สภาวะทางกลทำให้เกิดการสึกกร่อนขึ้น เรียกว่าการสึกกร่อนแบบขูดขีดสามองค์ประกอบ (Three body abrasion) ซึ่งการสึกกร่อนแบบขัดสีนี้มักพบเจอได้บ่อยมากในอุตสาหกรรม ซึ่งสาเหตุหลักมาจากการปนเปื้อนที่มากับสารหล่อลื่น



รูปที่ 2.23 การสึกกร่อนแบบขัดสี (Abrasive wear) [40]

3. การสึกกร่อนแบบการล้า (Fatigue wear)

เกิดจากการที่วัสดุทั้งสองเกิดการสัมผัสกันด้วยจำนวนครั้งมาก ๆ หรือได้รับภาระทางกลกระทำเป็นรอบ (Cyclic load) เป็นระยะเวลานาน ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการล้าตัว ส่งผลให้ผิววัสดุหลุดล่อนออกไป และทำให้มีรอยลึกที่ผิวชิ้นงานจนเกิดการสึกกร่อน ลักษณะการเกิดการล้าตัวอีกแบบหนึ่งเกิดจากการมีสิ่งสกปรกในสารหล่อลื่น และทำให้เกิดรอยกด (Dents) ขึ้นบนผิวชิ้นงานก่อน และเมื่อมีการใช้งานในระยะยาว รอยกดขนาดเล็กเริ่มขยายใหญ่เป็นรอยแตก (Crack) เนื่องจากสารหล่อลื่นแทรกตัวเข้าไปในรอยกดซ้ำ ๆ หลายครั้งจนเกิดเป็นหลุม เนื่องจากการสะสมของ Strain รอบ ๆ จนทำให้เกิดการแตกร้าวในที่สุด โดยชิ้นส่วนวัสดุที่เกิดความล้าตัวที่ผิววัสดุ เช่น ตลับลูกปืนแบบเม็ดกลมหรือฟันของเฟืองเครื่องจักรกล เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การสึกกร่อนแบบการล้า (fatigue wear) [40]

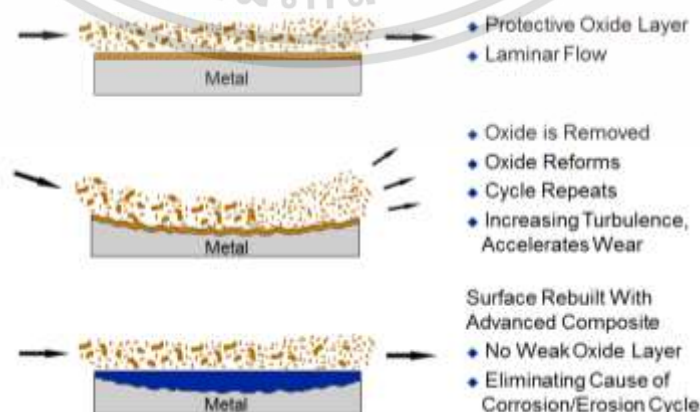
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การสึกกร่อนแบบไตรโบเคมีคอล หรือการกัดกร่อน (Tribochemical wear/Corrosive wear)

ลักษณะการสึกกร่อนแบบเฟรตติ้ง (Fretting wear) เนื่องจากชิ้นงานถูกขัดถูพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Reaction) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน” ซึ่งทำให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณเคลื่อนตัว การที่วัสดุทำงานอยู่ภายใต้สารที่มีการกัดกร่อนทั้งในส่วนของเหลว และก๊าซ ซึ่งโดยหลักการในการเกิดปฏิกิริยาของไตรโบเคมีคอล คือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารกัดกร่อน (Corrosive agent) และวัสดุที่ถูกกัดกร่อน (Bulk material) ซึ่งบริเวณที่โดนกัดกร่อน มีการเปลี่ยนเนื้อวัสดุให้กลายเป็นชั้นฟิล์มหนาประมาณ 50 - 150 นาโนเมตร (Protective layer) ปกคลุมวัสดุเอาไว้ (ซึ่งสถานะนี้เนื้อวัสดุด้านในไม่โดนกัดกร่อน) แต่ว่าหลังจากนั้นเมื่อเกิดการถูสัมผัสน้ำ (Sliding friction) ทำให้ฟิล์มตรงนั้นโดนเอาออกไป และกลับไปวนรูปแบบนี้เรื่อย ๆ ซึ่งเนื้อวัสดุหายไปเรื่อย ๆ เช่นกัน ตัวอย่างของชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีโอกาสเกิดการสึกกร่อนชนิดนี้ เช่น บริเวณหมุดยึดที่ยึดแผ่นเหล็กโครงเครื่องบิน หรือช่องว่างการประกอบตลับลูกปืนกับตัวเสื้อของตลับลูกปืนไม่แน่น ส่งผลให้เกิดการสึกกร่อนแบบเฟรตติ้งบริเวณผิวสัมผัสภายนอกของตลับลูกปืน และตัวเสื้อ นอกจากนี้ความแข็งแรง และโครงสร้างของวัสดุแต่ละชนิดส่งผลต่อการต้านทานการสึกกร่อนของวัสดุด้วยเช่นกัน การสึกกร่อนแบบไตรโบเคมีคอล แสดงดังรูปที่ 2.25 และ 2.26 ตามลำดับ



รูปที่ 2.25 การสึกกร่อนแบบไตรโบเคมีคอล (Tribochemical wear) [40]



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนการเกิดสึกกร่อนแบบไตรโบเคมีคอล (Tribochemical wear) [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

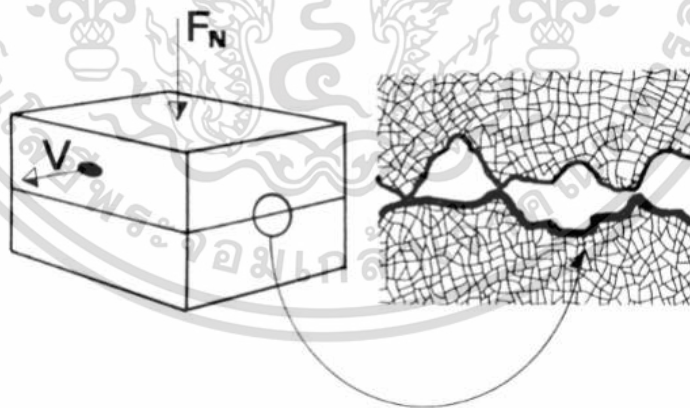
2.6.1.4 การหล่อลื่น (Lubrication)

ในชิ้นส่วนของเครื่องจักร เช่น แบริ่งแบบกลิ้งตัว ชุดเฟืองทด และรางเลื่อน มีการใช้สารหล่อลื่น เพื่อการลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างคู่สัมผัสของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้น ๆ โดยสารหล่อลื่นที่อาจอยู่ในรูปแบบก๊าซ เช่น อากาศ รูปแบบของเหลว เช่น น้ำมันหล่อลื่น รูปแบบของแข็ง เช่น กราไฟต์ หรือรูปแบบกึ่งของแข็งของเหลว เช่น จารบี แต่ที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ น้ำมันหล่อลื่น ซึ่งเป็นสารหล่อลื่นแบบของเหลว และแบบกึ่งของแข็งของเหลว ซึ่งการหล่อลื่นที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น แรงที่ใช้งาน ความเร็วรอบ อุณหภูมิ และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น [42] นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังทำหน้าที่ในการลดแรงเสียดทาน และการสึกหรอ ทำหน้าที่ในการส่งถ่ายกำลัง สารทำความสะอาด ลดความร้อน รองรับแรงกระแทก และสามารถเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ด้วย จึงสามารถยืดอายุการใช้งานได้นานมาก โดยการเลือกความหนืด และสมบัติให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน เช่น ความเร็วรอบ อุณหภูมิ และแรงกดอัด เป็นต้น

สำหรับรูปแบบของหน้าสัมผัสที่แตกต่างกันของชิ้นส่วนต่าง ๆ และปัจจัยที่สำคัญของระบบสภาวะการหล่อลื่น (Lubrication conditions) [43] รวมถึงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และการสึกหรอ แสดงดังตารางที่ 2.5 มีดังนี้

1. ขอบเขตการหล่อลื่นแบบแห้ง (Dry Lubrication regime)

ผิวสัมผัสของวัสดุได้รับการสัมผัสกันโดยตรง ส่งผลทำให้เกิดความเสียหาย หรือสึกหรออย่างรุนแรงบนผิวหน้าของคู่วัสดุ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอสูงมาก แสดงดังรูปที่ 2.27



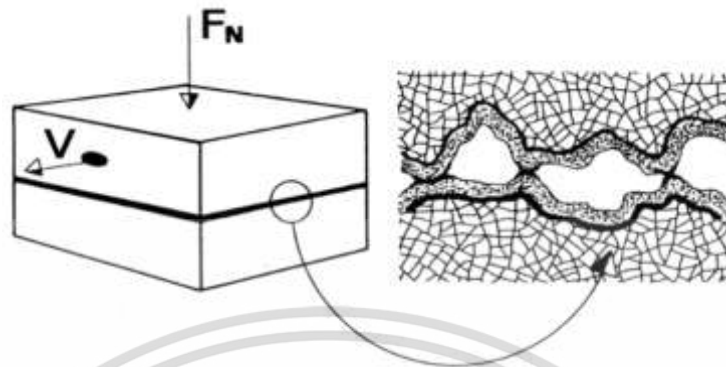
รูปที่ 2.27 สภาวะการหล่อลื่นแบบแห้ง [43]

2. ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์ารี (Boundary lubrication regime)

ผิวหน้าสัมผัสของวัสดุถูกคลุมไปด้วยชั้นโมเลกุลที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี หรือการดูดกลืนอะตอม (Absorbed) ดังนั้นในระหว่างการขัดสี (สั่นไถล) ในการใช้งานชั้นผิวถูกขัดสีแทนเนื้อวัสดุที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

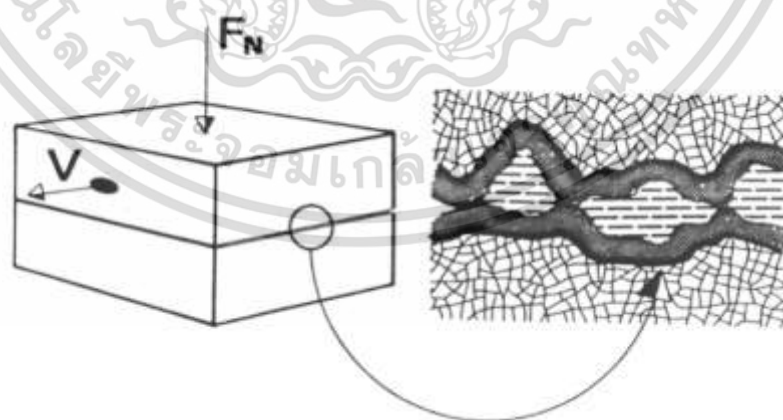
ค่าความต้านทานต่อการเฉือนตัวที่ต่ำกว่าเนื้อวัสดุคู่สัมผัส จึงทำให้ชั้นผิวหน้าเหล่านี้สึกหรอออกไปก่อน และเกิดการสร้างชั้นผิวดังกล่าวมาทดแทนชั้นผิวเดิมที่สึกหรออย่างต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์ [43]

3. ขอบเขตการหล่อลื่นแบบผสม หรือการหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์ (Mixed lubrication regime)

เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้สารหล่อลื่นแบบบาวนด์คาร์ภายใต้การหล่อลื่นแบบกึ่งสมบูรณ์นี้ผิวสัมผัสที่ลื่นไถลมีฟิล์มน้ำมันแยกเนื้อวัสดุออกได้เพียงบางส่วน และมีเนื้อวัสดุ (Asperities) บางส่วนสัมผัสกันโดยตรงผลที่เกิดขึ้นคือ แรงกระทำถูกรองรับไว้โดยแรงดันของฟิล์มน้ำมันแบบไฮโดรไดนามิกส์ โดยขอบเขตการหล่อลื่นแบบนี้เกิดขึ้นในชั้นส่วนของแบริ่งในช่วงเริ่มทำงาน และหยุดทำงานในเครื่องจักรไอน้ำแบบลูกสูบ หรือเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซีลน้ำมันระหว่างลูกสูบกับผนังกระบอกสูบ และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบผสม [43]

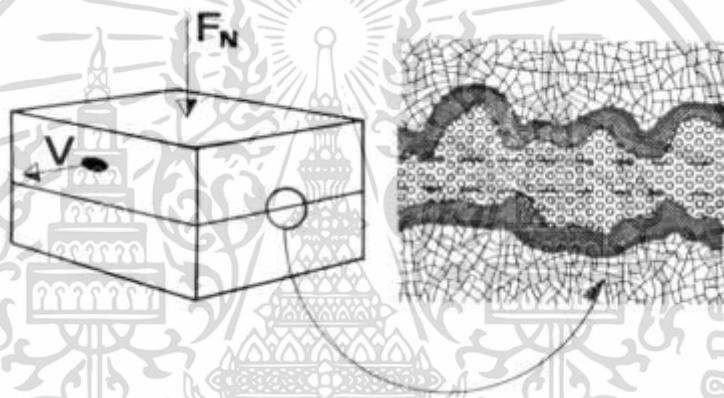
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full film regime)

การที่หน้าสัมผัสชิ้นงานได้ถูกแยกออกจากกัน โดยฟิล์มของสารหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- สภาวะการหล่อลื่นแบบไฮโดรไดนามิกส์ (Hydrodynamic lubrication) เป็นสภาวะที่มีการใช้สารหล่อลื่น ทำให้เกิดฟิล์มน้ำมันหนาพอ หรือเหมือนลิ่มน้ำมันที่แยกผิวคู่ของวัสดุที่มีการเคลื่อนที่ออกจากกันโดยสิ้นเชิง เป็นการหล่อลื่นแบบเต็มฟิล์ม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชั้นสารหล่อลื่นกับค่าความหนืดของสารหล่อลื่นเพียงอย่างเดียว

- สภาวะการหล่อลื่นแบบอีลาสโตไฮโดรไดนามิกส์ (Elasto Hydrodynamic, EHD) เป็นสภาวะที่ผิวคู่สัมผัส มีการเสียรูปอย่างไม่ถาวร (คืนตัวได้) และความหนืดในจุดสัมผัสของสารหล่อลื่นมีค่าสูงขึ้นอย่างยิ่งยวด เนื่องจากแรงดันยิ่งยวดที่เกิดขึ้นในชั้นของสารหล่อลื่น [44] แสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ขอบเขตการหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ [43]

ตารางที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะสารหล่อลื่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และการสึกหรอ [38]

สภาวะการหล่อลื่น	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	การสึกหรอ
การหล่อลื่นแบบแห้ง	> 0.3	สูงมาก
การหล่อลื่นแบบบาวน์ดารี	< 0.005	เล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบผสม	$< 0.005 - 0.3$	เล็กน้อย
การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์	$< 0.005 - 0.1$	แทบไม่เกิดขึ้น

2.6.2 กระบวนการกดอัดขึ้นรูป (Compression molding)

กระบวนการกดอัดขึ้นรูป (Compression molding) เป็นกระบวนการที่สามารถทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน เป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทยางล้อ เริ่มจากมีแม่พิมพ์สองส่วนในการสร้างรูปร่างผลิตภัณฑ์เมื่อทำการกดอัด โดยที่วัสดุถูกวางในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรือการแข็งเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าใช้กระบวนการนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่พิมพ์พร้อมมีการให้ความร้อน จากนั้นแม่พิมพ์ทั้งสองส่วนถูกกดอัดลงไปที่วัสดุในแม่พิมพ์ เนื่องจากมีแรงดันสูงทำให้เกิดการบีบอัด จนกระจายวัสดุอย่างสม่ำเสมอในแม่พิมพ์ และมีการให้อุณหภูมิสูง เมื่อมีการบ่มที่สมบูรณ์แล้ว จึงนำผลิตภัณฑ์ออกมาจากแม่พิมพ์ สำหรับวัสดุที่นิยมนำมาทำการกดอัดขึ้นรูปคือ พลาสติก โลหะผสม และยาง เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการขึ้นรูป (Forming) และการเชื่อมโยงยาง (Vulcanization) เสร็จสิ้นได้ในกระบวนการเดียว ดังนั้นการกดอัดขึ้นรูปนี้ จึงเป็นการจำลองที่สามารถบอกแนวโน้มของประสิทธิภาพน้ำยาสารถอดแบบได้ โดยมีความสอดคล้องกับการใช้งานที่กระบวนการผลิตจริง แสดงดังรูปที่ 2.31 [45]



รูปที่ 2.31 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) [46]

2.6.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM)

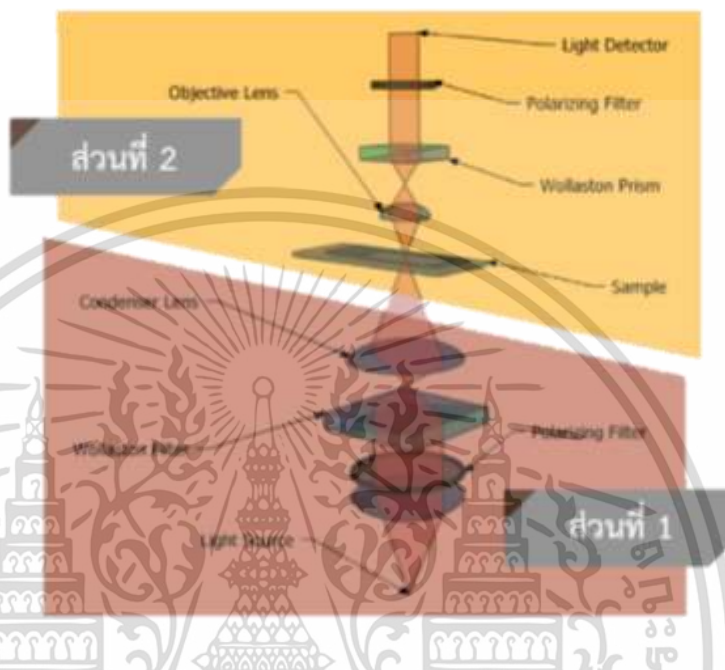
กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงส่องผ่านหรือใช้แสงสะท้อนจากตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยเลนส์เดี่ยว หรือหลายเลนส์เพื่อให้ได้ภาพจากตัวอย่างตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา จึงมีอุปกรณ์สำหรับมองดูวัตถุที่มีขนาดเล็กเกินกว่ามองเห็นด้วยตาเปล่า



รูปที่ 2.32 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) [47]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหลักการทำงานของเลนส์ในกล้องจุลทรรศน์ เลนส์ใกล้วัตถุ คือ เลนส์ที่ใกล้กับตัวอย่าง ทำหน้าที่ขยายภาพตัวอย่างให้ใหญ่ขึ้นจากปกติ โดยเป็นภาพจริงหัวกลับที่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้น จากนั้นเลนส์ใกล้ตาทำให้เกิดภาพเสมือนหัวกลับที่มีขนาดขยายทำให้ตามองเห็นภาพได้ชัดเจน ทำให้สามารถมองเห็นวัตถุที่มีขนาดเล็กได้ [46]



รูปที่ 2.33 หลักการของเลนส์ในกล้องจุลทรรศน์ [47]

หลักการของเลนส์ในกล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนการปรับระนาบแสงจากแหล่งกำเนิดแสง และส่วนที่ใช้ขยายภาพตัวอย่าง

ส่วนที่ 1 การปรับระนาบแสง ด้วยแสงจากแหล่งกำเนิดแสง (Light Source) มีการกระจายตัวออกไปในทุกทิศทางทุกทาง ในการส่องขยายวัตถุตัวอย่างจึงมีความจำเป็นต้องปรับระนาบแสงเพื่อลดการบิดเบี้ยวของภาพที่ได้จากความเข้ม และทิศทางแสงที่ไม่เท่ากัน ซึ่งตัวปรับระนาบแสง (Polarizers) และ Wollaston Filter แสงที่ปรับระนาบเท่ากันแล้ว มาสู่เลนส์รวมแสง (Condenser Lens) ที่เป็นตัวรวมแสงให้มีความเข้มสูงเพื่อส่องไปยังวัตถุให้เกิดความคมชัด และส่องผ่านตัววัตถุไปยังส่วนต่อไปได้

ส่วนที่ 2 การขยายภาพวัตถุ ประกอบด้วยเลนส์นูน (Objective Lens) ที่มีหลายกำลังขยาย สำหรับการรับแสงที่ผ่านวัตถุมาผ่าน Wallaston prism เพื่อปรับระนาบแสงที่ได้จากเลนส์วัตถุเป็นระนาบแสงทางตรงเพื่อเข้าไปยังจอภาพแสดงผล หรือตาผู้สังเกตการณ์ [47]

2.6.4 การใช้งานที่กระบวนการผลิตจริง

ในการขึ้นรูปร่างล้อทำได้โดยการนำโครงยางล้อดิบสวมลงบนถุงลมยาง หรือแบลตเตอร์ (Bladder) ซึ่งต้องทำการเคลือบสารถอดแบบลงบนพื้นผิวของถุงลมยางก่อน แล้วนำไปให้ความร้อน ทำให้สารเคลือบเกิดการบวมที่สมบูรณ์ยึดติดกับพื้นผิวของถุงลมยาง โดยลวดขอบล้อ (Bead) ด้านล่างของโครงยางล้อดิบสัมผัสกับผิวด้านในของแม่พิมพ์ด้านล่าง เมื่อชุดลูกสูบยืดออกทำให้ลูกสูบที่ควบคุมถุงลมยางเกิดการขยายตัวในแนวรัศมี จึงดันถุงลมยางเข้าไปติดภายในโครงยางล้อดิบ จากนั้นจึงเริ่มฉีดไอน้ำร้อน (Steam) เข้าในช่องว่างของถุงลมยาง แล้วถุงลมยางมีการขยายตัวให้พองเพื่อให้ผิวของถุงลมยางสัมผัสกับห้องของยางล้อ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำร้อนที่ไหลเวียนอยู่ภายในถุงลมยาง และเกิดการบวมยางล้อดิบ เมื่อยางล้อถูกเชื่อมโยง หรือสุกตัว (Cure) ตามเวลาที่กำหนดผ่านของเครื่องบ่มยางล้อเคลื่อนที่ขึ้น ถุงลมยางระบายน้ำร้อน หรือไอน้ำ และความดันออกมา จากนั้นถุงลมยางเกิดการหดตัว และนำยางล้อออกมา [48]



รูปที่ 2.34 กระบวนการเชื่อมโยยางล้อ [48]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Inokuchi และคณะ [49] จดสิทธิบัตรสารออกาโนพอลิซิลอกเซน (Organopolysiloxane) มาใช้เป็นน้ำยาสารถอดแบบเพื่อใช้งานบนพื้นผิวของถุงลมยาง หรือแบลตเตอร์ (Bladder) ซึ่งมีการสร้างฟิล์มบางที่มีความยืดหยุ่นสามารถยึดติดตามถุงลมยาง เมื่อถุงลมยางขยายตัวขึ้นฟิล์มนี้ต้องแข็งแรงพอ และไม่แตก หรือเกิดการเสียดสีกับยางเมื่อนำยางออกจากถุงลมยาง โดยในออกาโนพอลิซิลอกเซนที่มีหมู่คาร์บอกซิลอยู่ที่ปลายสายโซ่ของโมเลกุลในสารประกอบ (A) ซึ่งสารนี้สามารถละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ เนื่องจากสารละลายอินทรีย์เป็นส่วนผสมที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการเคลือบลงบนพื้นผิวของถุงลมยาง หรือแบลตเตอร์ (Bladder) ช่วยในการปรับปริมาณในการเคลือบ และความหนืดที่เหมาะสม ตัวอย่างของสารละลายอินทรีย์ ได้แก่ โทลูอิน ไซลีน และเฮกเซน เป็นต้น น้ำยาสารถอดแบบนี้ใช้กับถุงลมยางที่มีส่วนประกอบของซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) และยางบิวทิลที่มารวมกันเพื่อทำการขึ้นรูปร่าง และส่วนประกอบของอิมัลชันแบบน้ำมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ (A), สารลดแรงตึงผิว (B) ไม่มีการจำกัดประเภทอาจเป็นได้ทั้งแบบไม่มีประจุ (Nonionic), แบบประจุลบ (Anionic), แบบประจุบวก (Cationic) หรือแบบมีทั้งสองประจุ (Amphoteric) ซึ่งสามารถใช้ร่วมกันได้ ในงานนี้เลือกใช้แบบไม่มีประจุ และ น้ำ (C) นอกจากนี้อาจมีการใช้พอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำเพื่อช่วยในการปรับปริมาณของการเคลือบบนถุงลมยาง เพื่อป้องกันการหยดย้อยระหว่างใช้งาน และเพิ่มความสามารถในการเปียก รวมถึงมีการใส่สารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ช่วยเพิ่มสมบัติให้ล้อยางสามารถถอดออกได้ง่าย แล้วนำมาใช้งานกับถุงลมยางที่ทำจากยางบิวทิลเป็นหลัก หรือยางบิวทิลที่มีคลอโรพรีนเป็นส่วนประกอบ รวมถึงมีซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ที่อยู่ปลายสายโซ่ในโมเลกุลของออกาโนพอลิซิลอกเซน (Organopolysiloxane) จึงส่งผลให้มีการยึดเกาะที่ดีของออกาโนพอลิซิลอกเซนกับพื้นผิวของถุงลมยาง และปรับปรุงในการถอดแบบซ้ำ ๆ น้ำยาสารถอดแบบนี้ถูกนำไปใช้โดยการพ่นจุ่มหรือทา แล้วได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 80-250 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาหนึ่ง หากอุณหภูมิต่ำความสามารถในการทำปฏิกิริยาของออกาโนพอลิซิลอกเซนของสารประกอบ (A) กับซิงค์ออกไซด์ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ถุงลมยางเสื่อมสภาพลง ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 100-200 องศาเซลเซียส โดยการใช้ น้ำยาสารถอดแบบต้องมีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

Oliver และคณะ [50] จดสิทธิบัตรน้ำยาสารถอดแบบที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปยางรถยนต์ เพื่อป้องกันไม่ให้พื้นผิวด้านนอกของถุงลมยาง หรือแบลดเดอร์ (Bladder) ติดกับพื้นผิวด้านในของยาง โดยมีการใช้น้ำยาสารถอดแบบที่มีส่วนประกอบมาจากไฮดรอกซิลเทอร์มินเนทพอลิออกาโนซิลอกเซน (Hydroxyl terminated polyorganosiloxane) และอะมิโนออกาโนซิลอกเซน (Amino organosiloxane) เพื่อนำมาใช้กับพื้นผิวด้านนอกของถุงลมยาง เพื่อลดการเสียดสี การสึกหรอ และเพิ่มความปลอดภัยแก่พื้นผิวด้านนอกของถุงลมยางกับพื้นผิวด้านในของยาง โดยใช้สารประกอบซิลิโคนมาทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น โดยในการทดลองนี้มีการใช้อิมัลชัน ดังนี้

- อิมัลชัน A : Polydimethylsiloxane fluid
- อิมัลชัน B : Hydroxyl terminated polydimethylsiloxane และ Polydimethylsiloxane fluid
- อิมัลชัน C : Hydroxyl terminated polydimethylsiloxane และ Methylhydrogenpolysiloxane
- อิมัลชัน D : Hydroxyl terminated polydimethylsiloxane, Methylhydrogenpolysiloxane และ Acrylic copolymer

จากนั้นมีการทดสอบประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานโดยทาอิมัลชัน A และ B ก่อนแล้วตามด้วยการทาอิมัลชัน C และ D ซึ่งสามารถใช้สารละลายอินทรีย์ เช่น โทลูอีน และไซลีน ในการปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหนียว เมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตพบว่าสามารถใช้ได้ 20 ครั้งต่อ 1 รอบในการใช้น้ำยา และการทาน้ำยาสารถอดแบบในขณะที่ถูกลมยางขยายตัวพบว่า มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทาน้ำยาสารถอดแบบในขณะที่ถูกลมยางหดตัว ซึ่งน้ำยาสารถอดแบบทำให้ถูกลมยาง และยางรถยนต์ที่ขึ้นรูปแล้วไม่ติดกันขณะนำออกจากแม่พิมพ์ จึงเป็นการลดอุปสรรค และความเสียหายที่จากการผลิตยางรถยนต์ได้

Patitsas และคณะ [51] จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับถูกลมยาง หรือแบลด์เตอร์ (Bladder) ที่ใช้ในการขึ้นรูปยางล้อ โดยทำการเพิ่มการสั่นไถลระหว่างผิวสัมผัสแก่ถูกลมยางที่มีองค์ประกอบหลักมาจากยางบิวทิล โดยอาจมีไอโซพรีนที่ไม่อิ่มตัวร่วมด้วยเพื่อให้ยางบิวทิลเกิดการเชื่อมโยง จึงทำให้ถูกลมยางมีการกระจายตัวของอัลคิลฟีนอกซีพอลิอัลคิลีนอกซีอัลคานอล (Alkylphenoxy poly(alkyleneoxy)alkanol) เมื่อทำการเชื่อมโยงยาง พบว่าการยึดเกาะของยางที่เชื่อมโยงแล้วลดลงสำหรับอัลคิลฟีนอกซีพอลิอัลคิลีนอกซีอัลคานอลเป็นสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุ (Nonionic) โดยมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ คือ อัลคิลฟีนอกซี (Alkylphenoxy) และส่วนที่ชอบน้ำ คือ พอลิอัลคิลีนอกซี (Poly(alkyleneoxy) alkanol) ซึ่งคาดว่าโมเลกุลของอัลคิลฟีนอกซีพอลิอัลคิลีนอกซีอัลคานอลเกิดการแพร่ออกมาที่พื้นผิวของถูกลมยาง ดังนั้นจึงใช้โคพอลิเมอร์ของไอโซบิวทิลีน (Isobutylene) และมีคอนจูเกตไดอีน (Conjugated diene) 1 ตำแหน่ง รวมถึงยางฮาโลเจน เช่น นีโอพรีน (Neoprene) เนื่องจากนีโอพรีนทำหน้าที่เหมือนฮาโลเจนโดยเป็นตัวเร่งในระบบของการเชื่อมโยง และอาจมีการเพิ่มสารเติมแต่งอีกเล็กน้อย จากนั้นนำไปเข้าสู่กระบวนการผสม และทำการเชื่อมโยงจนได้ถูกลมยาง ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบพบว่า เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength), โมดูลัส (Modulus) และค่าความทนทานต่อการแตกหัก (Break strength) ลดลงเล็กน้อยอย่างไม่มีความสำคัญ แต่ค่าความต้านทานการลอก (Peel Adhesion) ลดลงมาก ส่งผลให้ถูกลมยางมีความลื่นมากขึ้น จึงถอดแบบยางได้ง่าย และทำให้อายุการใช้งานของถูกลมยางยาวนานขึ้น

Köhler และคณะ [52] จดสิทธิบัตรน้ำยาสารถอดแบบสำหรับใช้งานบนพื้นผิวของถูกลมยาง หรือแบลด์เตอร์ (Bladder) ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปยางรถยนต์ โดยในน้ำยาสารถอดแบบมีส่วนผสมของสารกลุ่มซิลิโคน เช่น น้ำมันซิลิโคน และซิลิโคนอิมัลชัน เป็นต้น สารกลุ่มนี้นำไปสู่สมบัติการหล่อลื่น และสามารถถอดแบบได้ง่ายขึ้น น้ำยาสารถอดแบบนี้มีการใช้ในรูปแบบของสารละลาย ซึ่งนำไปใช้บนพื้นผิวของถูกลมยาง โดยการทา การสเปรย์ หรือการจุ่ม หากได้สัมผัสกับอุณหภูมิที่สูงเป็นเสมือนการเร่งปฏิกิริยาให้ยึดติดกับพื้นผิวของถูกลมยางได้ดีขึ้น สำหรับส่วนประกอบของน้ำยาสารถอดแบบมีไดเมทิลพอลิไซลอกเซน (Dimethylpolysiloxane) ตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันซิลิโคน ยางซิลิโคน ผงเทพลอน รวมถึงสารเติมแต่งอื่น ๆ และใช้การเคลือบถึง 2 ชั้น โดยมีความหนาอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 10-30 ไมครอน เพื่อป้องกันการสึกหรอจากพื้นผิวชั้นนอก ซึ่งฟิล์มสารถอดแบบต้องมีความยืดหยุ่น และทำการเคลือบในขณะที่อุณหภูมิขยายตัว จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มสารถอดแบบนี้มีค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elastic) อยู่ในช่วง 0.1-0.3 นิวตันต่อตารางเมตร ค่าความแข็ง Shore A อยู่ในช่วง 10-40 และสามารถใช้งานได้สูงถึง 400 รอบ ดังนั้นอายุการใช้งานของอุณหภูมิขยายจึงเพิ่มขึ้น และสามารถทำการผลิตได้ต่อเนื่องมากขึ้น

Strobridge และคณะ [53] จดสิทธิบัตรสารถอดแบบเพื่อนำมาใช้กับพื้นผิวของแม่พิมพ์ โดยมีการสร้างพื้นผิวอีกชั้นหนึ่งที่ไม่ทำให้เกิดการยึดติด เพื่อช่วยในการถอดแบบ และมีความทนทานต่อการกระทำซ้ำ ๆ สำหรับสารถอดแบบนี้มีองค์ประกอบหลักคือ ไดเมทิลโคนโคพอลิโออล (Dimethicone copolyol) เช่น ไดเมทิลซิลอกเซน (Dimethyl siloxane) และเมทิลพอลิโอออกซีเอทิลีนซิลอกเซนโคพอลิเมอร์ (Methyl(polyoxyethylene) siloxane) copolymers เป็นต้นที่สามารถละลาย หรือผสมในน้ำได้ในปริมาณ 60% และอาจมีตัวทำละลายที่ระเหยได้ เช่น โทลูอีนไซลีน และไซโคลเฮกเซน จากนั้นนำมาใช้งานโดยการนำท่ออย่างมาจุ่มลงใน สารถอดแบบให้ทั่วแล้วทำการวัลคาไนซ์ พบว่าท่อที่ขึ้นรูปสามารถหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างง่ายดาย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารถอดแบบที่ขึ้นรูปมีพื้นผิวที่ติดอย่างมากที่แม่พิมพ์

Takao Oka และคณะ [54] จดสิทธิบัตรสารป้องกันการยึดติดสำหรับยาง โดยส่วนประกอบของสารป้องกันการยึดติดสำหรับยางมักมีการใช้สเมกไทต์ (Smetites) ซึ่งมีผลอย่างมากในการปรับปรุงสมบัติในการป้องกันการยึดติด เนื่องจากทำให้สารป้องกันการยึดติดเมื่อเคลือบแล้ว เกิดการแห้ง และแข็งขึ้น จึงมีโอกาสสูงในการหลุดลอกออก และเกิดการปนเปื้อน จึงทำการลดปริมาณของสเมกไทต์ลง ส่งผลให้สมบัติการยึดติดลดลงด้วย โดยมีส่วนประกอบคือ สเมกไทต์ (A) เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) นอนโตรไนต์ (Nontronite) และแซพโฟไนต์ (Saponite) ทำหน้าที่ในด้านกรยึดเกาะ ซึ่งสารประกอบ A ถูกใช้ในรูปแบบของผงอนินทรีย์ โดยสามารถวัดปริมาณของสเมกไทต์ได้โดยการวิเคราะห์ผ่าน X-ray diffraction จากการคำนวณ Diffraction peak intensity ของสเมกไทต์ที่ปรากฏในช่วง $2\theta = 7^\circ$ ส่วนสารประกอบ (B) เช่น สบู่ของโลหะหนัก (Metallic soap) จากกลุ่ม Zn Mg และ Al เป็นต้น ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในการปรับปรุงสมบัติการป้องกันการยึดติดได้ และสารลดแรงตึงผิว (C) ทำหน้าที่ให้ความสามารถในการเปียกแก่สารป้องกันการยึดติด และการกระจายตัว นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งอื่น ๆ เช่น สารลดฟอง (Antifoaming agent) สารเสริมความเปียก (Wettable adjuvant) และสารเสริมความหนืด (Viscosity adjuvant) เป็นต้น จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานการลอกที่ความเร็วแรงดึง 300 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่ามีความต้านทานการลอกน้อยกว่า 2.0 มิลลิเมตรต่อนาที นั่นคือแผ่นยางสามารถลอกออกได้ดี สารป้องกันการยึดติดมีประสิทธิภาพต่อต้านการยึดติดในเกณฑ์ที่ดีสามารถนำมาใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Eugene Ray Martin และคณะ [55] จดสิทธิบัตรสารถอดแบบที่มีองค์ประกอบเป็นออกาโนพอลิซิลอกเซน (Organopolysiloxane) และสารประกอบซิลิโคนที่มีหมู่อะมิโน ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีต่อแม่พิมพ์โลหะกับยางยูรีเทนที่ผ่านการเชื่อมโยงแล้ว นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น ซิลิโคนเรซิน ออกาโนพอลิซิลอกเซนที่ผสมกับเรซิน และออกาโนพอลิซิลอกเซนเหลว โดยนำมาใช้กับพื้นผิวของแม่พิมพ์โลหะก่อนนำไปใช้ในการขึ้นรูปวัสดุ เนื่องจากสารถอดแบบแบบเก่าที่มีการใช้งานบ่อย ๆ ทำให้พบข้อเสียคือ เมื่อมีการใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเพื่อทำการเชื่อมโยงยางยูรีเทน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถอดแบบลดลง เกิดการยึดติดแม่พิมพ์ในบางส่วน และชิ้นงานเกิดความเสียหาย จึงทำการปรับปรุงสารถอดแบบโดยใช้สารประกอบซิลิโคนที่มีหมู่อะมิโนมาผสมกับพอลิไดเมทิลซิลอกเซนที่มีหมู่ปลายเป็นไตรเมทิลซิลิล และองค์ประกอบอื่น ๆ จากนั้นนำมาใช้ที่พื้นผิวของแม่พิมพ์โลหะ และเตรียมองค์ประกอบของยางยูรีเทนใส่ลงในแม่พิมพ์ ซึ่งมีการให้ความร้อนเป็นระยะเวลาหนึ่ง พบว่ายางยูรีเทนที่มีความยืดหยุ่นไม่ติดกับแม่พิมพ์ และสามารถหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้อย่างง่ายดาย

Tomoi Shusaku และคณะ [56] จดสิทธิบัตรยางที่มีชั้นของเทอร์โมพลาสติกเรซิน หรือเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ เพื่อปรับปรุงสมบัติการถอดแบบจากแม่พิมพ์ระหว่างพื้นผิวด้านในของกรีนไทร์ (Green tire) และถุงลมยาง หรือแบลดเดอร์ (Bladder) เมื่อทำการวัลคาไนซ์ยาง ซึ่งสารถอดแบบที่มีผงของสารอนินทรีย์ (Inorganic powder) เช่น ซิงก์ออกไซด์ (Zinc oxide) ซิลิกา (Silica) ไมกา (Mica) ทัลคัม (Talc) ฯ เป็นส่วนประกอบหลักที่อยู่ในพอลิเมอร์ เพื่อช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง และความสกปรกในบริเวณโดยรอบของแม่พิมพ์ โดยการใช้ชั้นฟิล์มจากเทอร์โมพลาสติกเรซิน หรือเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มากระจายตัวเป็นชั้นป้องกันการซึมผ่านของอากาศ เพื่อแก้ไขปัญหาจากการที่ผงอนินทรีย์ในสารถอดแบบหลุดออกผ่านการผสมส่วนประกอบพอลิเมอร์ลงในสารถอดแบบที่มีผงอนินทรีย์ เพื่อทำการสร้างชั้นฟิล์ม โดยนำมาใช้ในการวัลคาไนซ์ และการขึ้นรูปยาง สำหรับฟิล์มสารถอดแบบต้องมีพอลิเมอร์ในน้ำยางในความเข้มข้น และปริมาณที่เพียงพอหากมีความเข้มข้น และปริมาณที่น้อยเกินไปพอลิเมอร์อาจไม่เพียงพอ ส่งผลให้ผงอนินทรีย์หลุดออกได้ง่าย แต่หากมีความเข้มข้น และปริมาณมากเกินไปน้ำยางอาจเหนียวมาก และกระจายตัวได้ไม่ดี นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบของสารจำพวกซิลิโคนอิมัลชัน น้ำมันซิลิโคน สารลดแรงตึงผิว น้ำสารเติมแต่งต่าง ๆ และผงอนินทรีย์ เช่น ไมกา ทัลคัม ซิลิกา ฯ ซึ่งมีสมบัติในการในการหล่อลื่นลดแรงตึงผิว โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวควรผสมลงในน้ำก่อนใส่สารยึดเกาะ (Binders) จากนั้นจึงใส่น้ำยาง ซิลิโคนอิมัลชัน และผงอนินทรีย์ โดยมีทั้งสูตรที่ใส่ และไม่ใส่น้ำยาง นอกจากนี้ยังมีส่วนของกาวที่ใช้ในการยึดติดเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เข้ากับพื้นผิวของยาง จากนั้นทำการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ และกาว โดยให้ความหนาของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

200 ไมครอน และความหนาของกาวเท่ากับ 50 ไมครอน เมื่อทำการขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วนำมาใช้งาน เมื่อคุณสมบัติความต้านทานน้ำ พบว่า สูตรที่ไม่มีน้ำยางมีความต้านทานต่อน้ำได้ไม่ดี ส่วนสูตรที่มีการใส่น้ำยางมีความต้านทานต่อน้ำที่ดี และเมื่อนำมาใช้งานในอุตสาหกรรม พบว่าสารถอดแบบสูตรที่มีน้ำยางมีความสามารถในการป้องกันยางได้ ซึ่งส่วนที่มีอีลาสโตเมอร์นั้นมีความยืดหยุ่น สามารถต้านทานน้ำได้ มีการยึดเกาะที่ดี และมีความทนทานที่ดี

John M. Allardice และคณะ [57] จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการผลิตยางล้อที่จำเป็นต้องใช้วัสดุในการป้องกันการติดกันของยาง สำหรับสารเคลือบที่พ่นนั้นมักเป็นสารในกลุ่มไกลคอล น้ำมันซิลิโคน ไมกา ทัลคัม และสารเคมีอื่น ๆ เพื่อให้ส่วนที่อยู่ระหว่างถุงลมยางกับกรีนไทร์มีการไล่ออก ในขณะที่ถุงลมยางขยายตัว หากไม่มีช่องของอากาศอาจเป็นสาเหตุให้ถุงลมยางชำรุดได้ แต่วัสดุที่เป็นของแข็งเมื่อกระจายตัวในองค์ประกอบของสารถอดแบบส่งผลให้ไม่สามารถทนต่อสภาวะที่ถุงลมยางมีการหด และขยายตัวตลอดเวลาได้ จึงนำองค์ประกอบนี้มาใช้ภายในกรีนไทร์แทนการใช้ภายในของถุงลมยาง แต่วิธีการนี้ต้องใช้เงินทุน และแรงงานจำนวนมากในการฉีดพ่นกรีนไทร์แต่ละเส้นก่อนนำมาใส่ในเครื่องจักรเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตยาง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานนี้เป็นการทำสารถอดแบบที่เกิดเป็นฟิล์ม และสามารถถอดแบบได้ในจำนวนรอบซ้ำ ๆ โดยคงสมบัติการถอดแบบไว้ได้ตลอดการผลิตยาง ในงานนี้จึงมีวิธีการใช้เดเมทิลพอลิไซลอคเซนที่ตัดแปลงด้วยอะมิโนเมทิลไฮโดรเจนพอลิไซลอคเซน พอลิไดเมทิลไซลอคเซน และตัวทำละลายไตรคลอโรเอทิลีน ทำการผสมกันที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นจึงนำไปพ่นลงบนพื้นผิวภายนอกของถุงลมยาง เมื่อตัวทำละลายระเหยไปจนหมด อุปกรณ์ถูกปิด และถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิเชื่อมโยงจนเกิดการสร้างฟิล์มที่สามารถถอดแบบซ้ำได้ โดยใช้ได้ประมาณ 4 ชั่วโมงก่อนทำการพ่นสารถอดแบบอีกครั้ง พบว่าการทำการทดสอบนี้ในเครื่องจักรในกระบวนการวัลคาไนซียงทั้ง 4 เครื่องเป็นเวลาหลายวัน ล้อยางที่ขึ้นรูปออกมาประมาณ 3000 เส้น มีลักษณะทางกายภาพปกติ และมีเพียงล้อยาง 2 เส้นเท่านั้นที่มีรอยตำหนิ เนื่องมาจากการมีอากาศติดอยู่ภายในยางที่ทำการเชื่อมโยง แต่ไม่พบปัญหาในการติดกันของถุงลมยาง และกรีนไทร์ ซึ่งสารถอดแบบนี้สามารถทนทานต่อการขยายตัว และหดตัวซ้ำ ๆ ของถุงลมยางภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และแรงดันสูงได้

Edwin P. Plueddemann และคณะ [58] จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการยึดเกาะของสารเคลือบที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนที่ทำงานร่วมกับซิลิโคนเรซินที่เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากซิลิโคนเรซินมีสมบัติที่โดดเด่นคือมีความเสถียรต่อความร้อน และความต้านทานต่อสภาพอากาศ โดยทั่วไปซิลิโคนเรซินมีการยึดเกาะที่ดีกับโลหะ เนื่องจากการมีปฏิกิริยากับสารกลุ่มไซลานอลที่อยู่ในซิลิโคนเรซิน จึงส่งผลให้มีการยึดเกาะที่ดี ในด้านความทนทานของซิลิโคน และพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอคเซน โดยส่งผลต่อความต้านทานของน้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารคู่ควบไซเลน และเนื่องจากซิลิโคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างมีความโปร่งใสต่อรังสียูวี จึงส่งผลให้ความว่องไวต่อสภาพอากาศลดลง ซึ่งซิลิโคนมีการนำมาใช้เป็นสารเคลือบถอดแบบสำหรับกาว และเป็นน้ำยาถอดแบบ ซึ่งซิลิโคนเป็นได้ทั้งสารเพิ่มการยึดเกาะ และสารถอดแบบ นอกจากนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารคู่ควบไซเลนที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการยึดเกาะ โดยขึ้นอยู่กับสมบัติทางกล และทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน และเรซินสำหรับสารคู่ควบไซเลนที่เหมาะสมควรเป็นสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน เนื่องจากการมีปฏิกิริยาต่อพื้นผิว และเป็นการเพิ่มอัตราการควบแน่นได้ จึงมีการศึกษาการเติมสารคู่ควบไซเลนลงในพอลิไวนิลคลอไรด์พลาสติกซอล โดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน จากนั้นสังเกตผลของการยึดเกาะ พบว่าที่ปริมาณ 1% ให้ผลของการยึดเกาะที่เหมาะสม แต่ผลของการยึดเกาะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมีปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่ 2-5% เนื่องจากโอลิโกเมอร์ไซลอกเซนมีการกระจายตัวไปยังพลาสติกไซเซอร์ของพลาสติกซอล แต่เมื่อมีการหลอมรวมกันโอลิโกเมอร์ไซลอกเซนจึงถูกส่งไปที่ส่วนเชื่อมต่อที่ยึดติดระหว่างพื้นผิวกับพอลิไวนิลคลอไรด์ ดังนั้นเมื่อมีสารคู่ควบมากเกินไป (>1%) มีส่วนทำให้มีความหนาของชั้นโอลิโกเมอร์ไซลอกเซนในส่วนที่เชื่อมต่อกับพอลิไวนิลคลอไรด์ที่มีการแทรกซึมไม่เพียงพอ ซึ่งประสิทธิภาพที่ส่งผลโดยตรงยังคงเป็นอุณหภูมิหลอมเหลวที่ใช้กับพลาสติกซอลได้สูงสุด 180 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้น ทำให้การมีสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนในปริมาณที่มากส่งผลให้มีการเชื่อมโยงที่มากเกินไปพลาสติกซอล จึงเกิดการแทรกซึมที่ไม่เพียงพอส่งผลให้ไม่เกิดการยึดเกาะที่เหมาะสม

Norio Horiuchi และคณะ [59] จดสิทธิบัตรองค์ประกอบของสารถอดแบบสำหรับใช้ในการขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ รวมถึงเรซินสังเคราะห์ ยาง ซีเมนต์ หรือเซรามิก ซึ่งสารถอดแบบนี้มีการใช้งานก่อนนำวัสดุเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูป เมื่ออายุในการใช้งานของสารถอดแบบสั้น ทำให้ต้องใช้สารถอดแบบในทุกรอบก่อนนำวัสดุไปสู่กระบวนการขึ้นรูป โดยมีการใช้น้ำมันซิลิโคนมากที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการถอดแบบออกมาได้ดี หากการขึ้นรูปนั้นเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มของการยึดเกาะสูง เช่น ยูรีเทน อีพอกซีเรซิน จำเป็นต้องใช้น้ำมันซิลิโคนร่วมกับผงของซิลิกอนออกไซด์ เพื่อปรับปรุงกลไก และความแข็งแรงของฟิล์มสารถอดแบบ ยิ่งไปกว่านั้นต้องทำการเคลือบสารถอดแบบลงในปริมาณมาก จึงนำไปสู่การถ่ายโอนสารถอดแบบไปสู่ชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูป ซึ่งทำให้ไม่สามารถปรับสภาพพื้นผิวของชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ ในงานนี้จึงทำสารถอดแบบที่มีกรดฟอสฟอริก (A) สารเติมแต่งที่มาจากกลุ่มของน้ำมันซิลิโคน และแว็กซ์ (B) และสารพาของเหลว (C) โดยสารถอดแบบนี้ไม่เกิดการถ่ายโอนไปยังชิ้นงาน และมีสมบัติในการหล่อลื่นที่ดีขึ้น สำหรับขั้นตอนในการทดสอบการถอดแบบอีพอกซีเรซินออกจากแม่พิมพ์ โดยสารถอดแบบแต่ละชนิดมีการเคลือบโดยการแปรงบนแม่พิมพ์เหล็ก และเป่าให้แห้งด้วยอากาศ แม่พิมพ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มม. และความลึก 2 มม. สำหรับใช้ในการหล่อขึ้นรูป ซึ่งถูกวางไว้ที่ตำแหน่งตรงกลางของช่องเพื่อให้ชิ้นส่วนที่หล่อขึ้นรูปแล้วถูกนำออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยง่ายหลังจากมีการเคลือบสารถอดแบบ โดยที่เมื่อองค์ประกอบของอีพอกซีเรซินเข้ากันดีแล้วใส่ลงในแม่พิมพ์ จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วให้ความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการดึงด้วยมือเพื่อเอาชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วออกจากแม่พิมพ์ จึงทำการกำหนดความสามารถในการถอดแบบ หรือประสิทธิภาพในการดึงออกตามมาตรฐาน โดยที่ (5) ชิ้นงานขึ้นรูปถูกถอดแบบออกจากแม่พิมพ์ด้วยแรงดึงที่น้อยมาก (4) ดึงออกด้วยแรงดึงเล็กน้อย (3) ดึงออกด้วยแรงดึงปานกลาง (2) ยากต่อถอดแบบออกด้วยแรงดึงที่ปกติ และ (1) ชิ้นงานขึ้นรูปยึดติดกับแม่พิมพ์ และไม่สามารถดึงออกได้ด้วยมือ หลังจากใช้สารถอดแบบเพียงครั้งเดียว อายุการใช้งานของสารถอดแบบถูกกำหนดโดยการทำซ้ำของการดำเนินการของกระบวนการ โดยไม่ต้องใช้สารถอดแบบเพิ่มเติมจนกว่าความสามารถในการถอดแบบลดลงจนถึงระดับ 1 ของมาตรฐานที่มีการกำหนด กล่าวคือมีการใช้สารถอดแบบลงบนแม่พิมพ์ จากนั้นจึงดำเนินการถอดแบบซ้ำโดยไม่ใช้สารถอดแบบเพิ่มเติม ตรวจดูที่แม่พิมพ์ที่ใช้อย่างคงมีการแสดงระดับตามมาตรฐานภายในช่วงไม่ต่ำกว่า 3 สำหรับอายุการใช้งานของสารถอดแบบถูกกำหนดเป็นจำนวนรอบ และไม่เกินระดับมาตรฐาน 2 ความสามารถในการถอดแบบลดลงอย่างกะทันหัน เมื่อจำนวนรอบการขึ้นรูปใกล้ถึงอายุการใช้งานของสารถอดแบบ แต่ยังคงเกือบคงที่ตลอดอายุการใช้งาน ค่าของความสามารถในการถอดแบบ และอายุการใช้งานแต่ละค่านำมาเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้ง โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

Gishar Gerard และคณะ [60] จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับการเคลือบสารหล่อลื่นที่พื้นผิวของถุงลมยาง เพื่อปรับปรุงการลื่นไถล และลดความเสี่ยงในการเกิดการยึดเกาะระหว่างพื้นผิวด้านนอกของถุงลมยาง และพื้นผิวด้านในของกรีนไทร์ โดยสมบัติต่าง ๆ ที่ควรมีอยู่ในองค์ประกอบคือน้ำมันหล่อลื่นเพื่อช่วยใช้มีการหล่อลื่นที่ดีเยี่ยม และมีความทนทานที่ดีเยี่ยม (ความทนทานขององค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นที่สอดคล้องกับจำนวนยางที่ผลิตได้ โดยไม่ทำให้พื้นผิวของถุงลมยางด้านนอกเกิดการเสื่อมสภาพ) โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซนที่มีหมู่ปลายเป็นไฮดรอกซิล ซึ่งไวต่อปฏิกิริยา และสารเชื่อมโยงที่มีหมู่ Si-H ตัวอย่างเช่น มอนอเมทิลไซเลน และไดเมทิลไซเลน แต่ข้อเสียของสารกลุ่มนี้คือความไม่เสถียรในการจัดเก็บ เนื่องมาจากการเกิดความเป็นคริมของอิมัลชัน ซึ่งเกิดจากการหลุดออกของไฮโดรเจน ซึ่งทำให้เกิดความไม่เสถียรขององค์ประกอบจากการสลายตัวของหมู่ Si-H อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะในระหว่างการขนส่ง และการเก็บรักษา ดังนั้นจึงมีความต้องการอย่างมากในการเตรียมส่วนผสมของน้ำมันหล่อลื่นจากส่วนประกอบที่ไม่มีหมู่ Si-H แต่ยังคงมีสมบัติในการหล่อลื่น ความทนทาน และความยืดหยุ่นที่ดีเยี่ยม ในการศึกษาของงานนี้จึงเป็นการปรับปรุงสารเคลือบเพื่อไม่ให้เกิดไฮโดรเจนขึ้น รวมถึงมีการหล่อลื่นที่ดี ความทนทาน และมีความยืดหยุ่นที่ดีเยี่ยม ซึ่งเหมาะกับการใช้ในกระบวนการวัลคาไนซ์ยาง สำหรับวิธีการทดสอบสมบัติขององค์ประกอบน้ำมันหล่อลื่นสามารถประเมินโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทนทาน ซึ่งหากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสามารถสะท้อนได้ถึงสมบัติการลื่นที่ดีเยี่ยม สำหรับการทดสอบนี้ช่วยในการประเมินความสามารถในการหล่อลื่นขององค์ประกอบของสารหล่อลื่นที่มาอยู่ระหว่างพื้นผิวด้านนอกของลูกมยาง และพื้นผิวด้านในของยาง ดำเนินการโดยเคลือบฟิล์มไว้ที่ยางที่มีองค์ประกอบเหมือนกับลูกมยาง แล้วมีโหลดที่เป็นโลหะอยู่ด้านบนแล้วเคลื่อนไป-มาบนพื้นผิวยาง ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ที่ 100 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับความทนทานดำเนินการเป็นจำนวนของยางที่ผลิตขึ้นโดยไม่ทำให้พื้นผิวของลูกมยางเสื่อมสภาพและการทดสอบสิ้นสุดลงเมื่อพื้นผิวทั้งสองเกิดการยึดติดกัน คือองค์ประกอบของสารเคลือบนั้นไม่มีความสามารถในการหล่อลื่นอีกต่อไป จากผลการทดสอบพบว่า องค์ประกอบของฟีนิลไซลลอกเซนที่ไม่ทำปฏิกิริยา (A), หรือพอลิไดเมทิลไซลลอกเซนที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (B), ซิลิโคนเรซินที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (แบบ MDT), เมทิลไตรเอทอกซีไซเลน สารลดแรงตึงผิว และน้ำ ให้ผลการทดสอบของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.07 และให้ค่าความทนทานของจำนวนรอบได้มากกว่า 20 รอบ

Michael J. Hoffman และคณะ [61] จดสิทธิบัตรน้ำยาสารลดแบบสูตรน้ำที่ใช้กระบวนการผลิตยางล้อในขั้นตอนของการขึ้นรูปของยางล้อเกิดการติดกันระหว่างลูกมยางและกรีนไทร์ เนื่องจากการสัมผัสกันที่พื้นผิวด้านนอกของลูกมยางกับพื้นผิวด้านในของกรีนไทร์ เมื่อพื้นผิวด้านในที่มีการบ่มของกรีนไทร์ เพื่อเกิดวัลคาไนซ์แล้วได้ออกมาเป็นยางล้อ ลูกมยางจึงยุบตัวลง และยางล้อที่ได้เกิดการหลุดออก ดังนั้นในกระบวนการนี้จึงจำเป็นต้องมีการหล่อลื่นที่เหมาะสมระหว่างลูกมยางกับพื้นผิวของกรีนไทร์ เพื่อลดการเสียดสีระหว่างลูกมยางกับกรีนไทร์ เพื่อให้กระบวนการขึ้นรูปมีประสิทธิภาพที่ดี จึงมีการใช้น้ำยาสารลดแบบเพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้น โดยมีองค์ประกอบของพอลิไดเมทิลไซลลอกเซนที่มีความหนืด 1000 เซนติพอยซ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ร่วมกับเมทิลไฮโดรเจนพอลิไซลลอกเซนที่มีความหนืด 30 เซนติพอยซ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และพอลิเอทิลีนไกลคอล ในอัตราส่วน 10:4:0.63 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ เช่น สารป้องกันการเกิดฟอง สารฆ่าเชื้อ และสารเพิ่มความหนืด เป็นต้น สำหรับการใช้น้ำยาสารลดแบบนี้ถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วทำการพ่นลงบนพื้นผิวด้านนอกของลูกมยาง ซึ่งผลจากการใช้งานพบว่า ในการพ่นน้ำยาสารลดแบบ 1 ครั้งสามารถทำการถอดแบบยางล้อได้ 30-40 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมี

สมบัติบางประการของยางคอมพาวด์บิวทิล และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

1. ยางคอมพาวด์บิวทิล (CI011) ของบริษัท สยามนวมกรรม (ประเทศไทย) จำกัด
2. ซิลิโคน หรือพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) เกรดทางการค้า จากบริษัท แทคเคมีคอล จำกัด
3. พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (Polymethyl hydrogen siloxane, PMHS) เกรดทางการค้า จากบริษัท โมเมนทีฟ เพอร์ฟอร์แมนซ์ แมททีเรียลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาดีบีที (Catalyst Dibutyl Tin Dilaurate, DBT) เกรดทางการค้า จากบริษัท โมเมนทีฟ เพอร์ฟอร์แมนซ์ แมททีเรียลส์ (ประเทศไทย) จำกัด
5. สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) เกรดทางการค้า จากบริษัท ซินเอทซู ซิลิโคนส์ (ประเทศไทย) จำกัด มีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่
 - อะมิโนไซเลน (2-อะมิโนเอทิล-8-อะมิโนออกทิลไตรเมทอกซีไซเลน, Asi)
 - อีพอกซีไซเลน (3-ไกลซิโดซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน, Esi)
 - เมทาคริลิกไซเลน (3-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน, Msi)
6. สารเพิ่มความเปียก (Wetting agent) กลุ่มพอลิอีเทอร์ (Polyether) เกรดทางการค้า จากบริษัท โคลอสซอล อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
7. ตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane) เกรดทางการค้า บริษัท โกวเนเจอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
8. ตัวทำละลายบิวทานอล (Butanol) เกรดทางการค้า บริษัท เมกกะ เวิร์ด ไวลด์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางคอมพาวด์บิวทิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สมบัติของยางคอมพาวด์บิวทิล	ค่าที่ได้	มาตรฐานการทดสอบ
เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time, t_{s2}) @ 170°C (นาที)	1.26	ASTM D5289
เวลาการเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) @ 170°C (นาที)	6.29	ASTM D5289
เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%)	440	ASTM D2240
ความแข็งแรงดึง (kg/cm^2)	100	ASTM D412 (Type C)
ความแข็งกด (Shore A)	66	ASTM D412 (Type C)
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.14	ASTM D297

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สารเคมี	สถานะทางกายภาพ	สี	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความหนืด (cps)	ปริมาณเนื้อสาร (%)
PDMS	ของเหลว	ไม่มีสี	0.80	-	90.91
PMHS	ของเหลว	ไม่มีสี	1.00	25.00	97.00
DBT	ของเหลว	ไม่มีสี	1.05	10.00	>95.00
Asi	ของเหลว	ไม่มีสี	0.97	-	100.00
Esi	ของเหลว	ไม่มีสี	1.07	3.65	100.00
Msi	ของเหลว	ไม่มีสี	1.05	2.60	>98.00

หมายเหตุ : ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) เป็นเครื่องมือจากโครงการที่ทำร่วมกันระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัท แอ็คมี อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับรายละเอียดบางประการของเครื่องไตรโบมิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.3

2. เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine) รุ่น XLB-Y100T จากบริษัท หยูเหยา ซิตี หัวเฉิง ไฮดรอลิค แมคคานิคอล แอนด์ อิเล็กทริคัล จำกัด

3. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) รุ่น Nicolet iS5 บริษัท เบคไทยกรุ๊ปเทคโนโลยี จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) รุ่น Olympus DSX1000 จากบริษัท ควอลิตี้รีพอร์ท จำกัด
5. เครื่องชั่งดิจิตอล (Analytical balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น PA214 จากบริษัท เอสพีซีแมคคาทรอนิกส์ จำกัด
6. เครื่องผสมเชิงกล (Mechanical stirrers) รุ่น RW 20 digital จากบริษัท แล็บ-วัลเลย์ จำกัด
7. เตาอบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น UN 55 จากบริษัท แล็บวัลเลย์ จำกัด
8. กระจกไขว้ขุ่น
9. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐาน

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดบางประการของเครื่องไตรโบมิเตอร์

เครื่องไตรโบมิเตอร์	รายละเอียด
หัวกด	ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร
ระยะการเคลื่อนที่ของหัวกด	4 มิลลิเมตรต่อ 1 รอบ (ไป-กลับ)
ความเร็ว	5 มิลลิเมตรต่อวินาที
น้ำหนักโหลด	500 กรัม

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งวิธีการดำเนินงานเป็น 4 ส่วน ได้แก่

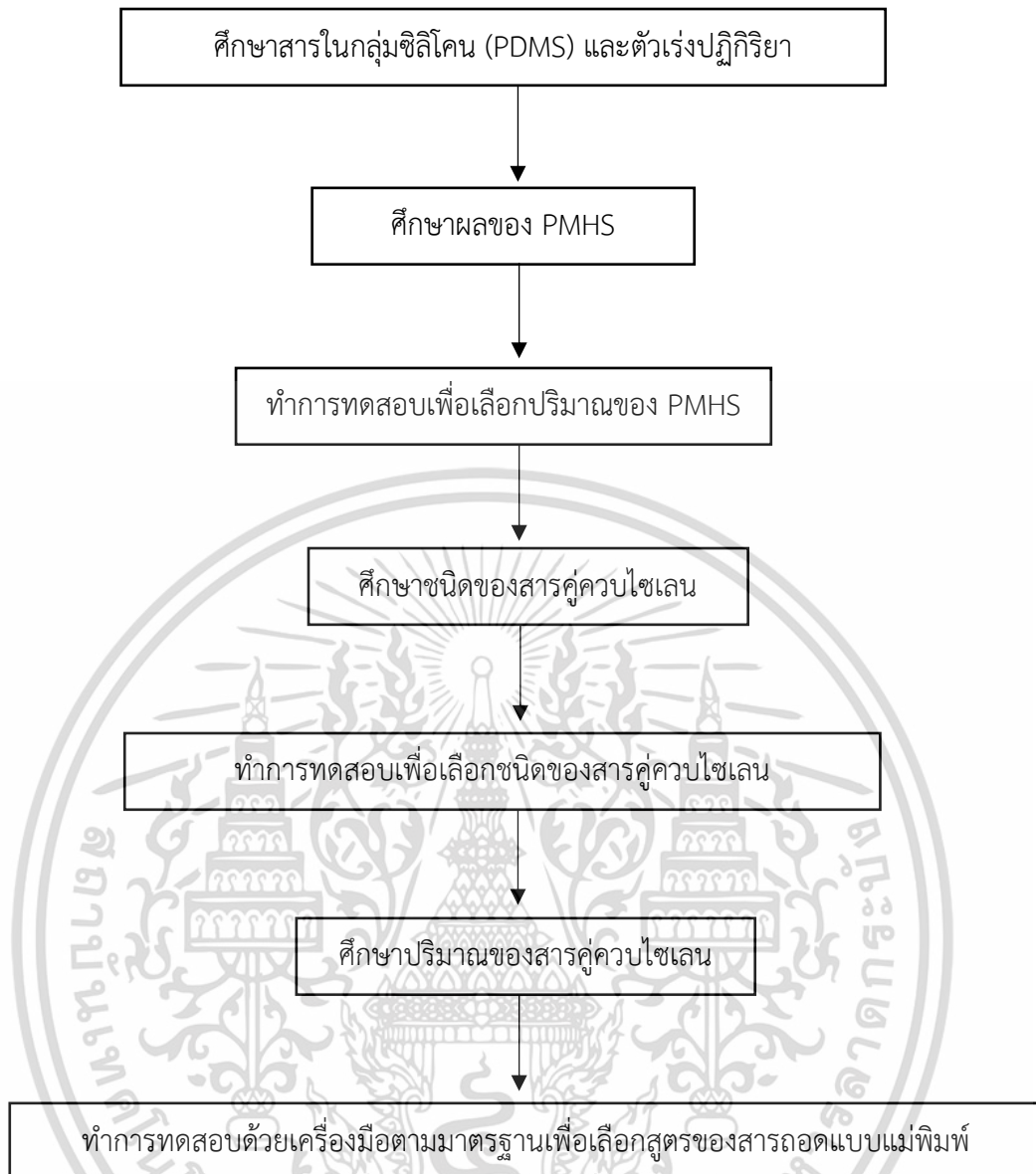
ส่วนที่ 1 การเตรียมน้ำยาสารถอดแบบตามขอบเขตของงานวิจัยที่ทำการศึกษา

ส่วนที่ 2 การเตรียมชิ้นงานยางที่ใช้จำลองทำเป็นถุงลมยาง หรือแบลลดเตอร์ (Bladder) สำหรับใช้ในการทดสอบ

ส่วนที่ 3 วิธีการเคลื่อนน้ำยาสารถอดแบบลงบนชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุงลมยาง หรือแบลลดเตอร์ (Bladder)

ส่วนที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาสารถอดแบบจากการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ การจำลองชิ้นรูปชิ้นงานยางด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป และการถ่ายภาพสภาพพื้นผิวของฟิล์มสารถอดแบบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนผังลำดับขั้นตอนของการวิจัยสูตรสารถอดแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การเตรียมน้ำยาสารถอดแบบ

3.2.1.1 ศึกษาปริมาณของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซนในน้ำยาสารถอดแบบ

1. ชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.4 ตามลำดับ โดยจัดเตรียมภาชนะสำหรับใส่สารเคมี (บีกเกอร์ขนาด 250 ml)
2. ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องผสมเชิงกล โดยมีอัตราเร็ว 300 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 2 นาที
3. ใส่สารเคมีลงภาชนะตามลำดับ จากนั้นทำการปั่นกวนสารตามขั้นตอนในข้อที่ 2 โดยทำซ้ำทุกครั้งเมื่อมีการเติมสาร
4. เมื่อผสมน้ำยาสารถอดแบบเสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการทดสอบ

ตารางที่ 3.4 ปริมาณของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซนในน้ำยาสารถอดแบบ

ชื่อสารเคมี	ปริมาณ* (%wt)			
	5DM	5DM2MH	5DM4MH	5DM6MH
พอลิไดเมทิลไซลอกเซน	5.00	5.00	5.00	5.00
พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน	-	2.00	4.00	6.00
ตัวเร่งปฏิกิริยาดีปีที (Catalyst)	0.03	0.03	0.03	0.03
สารเพิ่มความเปียก (Wetting agent)	0.20	0.20	0.20	0.20
ตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane)	94.77	92.77	90.77	88.77

หมายเหตุ : *ปริมาณสุทธิของเนื้อสาร

3.2.1.2 ศึกษาชนิดของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ในน้ำยาสารถอดแบบจากสูตร 5DM4MH

1. ชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ โดยจัดเตรียมภาชนะสำหรับใส่สารเคมี (บีกเกอร์ขนาด 250 ml)
2. ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องผสมเชิงกล โดยมีอัตราเร็ว 300 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 2 นาที
3. ใส่สารเคมีลงภาชนะตามลำดับ จากนั้นทำการปั่นกวนสารตามขั้นตอนในข้อที่ 2 โดยทำซ้ำทุกครั้งเมื่อมีการเติมสาร
4. เมื่อผสมน้ำยาสารถอดแบบเสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ชนิดของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ที่ปริมาณ 1%wt ในน้ำยา
สารถอดแบบจากสูตร 5DM4MH

ชื่อสารเคมี	ปริมาณ* (%wt)		
	5DM4MH 1Asi	5DM4MH 1Esi	5DM4MH 1Msi
พอลิไดเมทิลไซลอกเซน	5.00	5.00	5.00
พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน	4.00	4.00	4.00
ตัวเร่งปฏิกิริยาดีปีที (Catalyst)	0.03	0.03	0.03
สารคู่ควบไซเลน ชนิด Asi	0.09 (1.00)	-	-
สารคู่ควบไซเลน ชนิด Esi	-	0.09 (1.00)	-
สารคู่ควบไซเลน ชนิด Msi	-	-	0.09 (1.00)
สารเพิ่มความเปียก (Wetting agent)	0.20	0.20	0.20
ตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane)	90.68	90.68	90.68

หมายเหตุ : *ปริมาณสุทธิของเนื้อสาร

**ในวงเล็บคือปริมาณ % ของเนื้อสารเมื่อเทียบกับสารในกลุ่มไซลอกเซน

ตารางที่ 3.6 ชนิดของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ที่ปริมาณ 2%wt ในน้ำยา
สารถอดแบบจากสูตร 5DM4MH

ชื่อสารเคมี	ปริมาณ (%wt)		
	5DM4MH 2Asi	5DM4MH 2Esi	5DM4MH 2Msi
พอลิไดเมทิลไซลอกเซน	5.00	5.00	5.00
พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน	4.00	4.00	4.00
ตัวเร่งปฏิกิริยาดีปีที (Catalyst)	0.03	0.03	0.03
สารคู่ควบไซเลน ชนิด Asi	0.18 (2.00)	-	-
สารคู่ควบไซเลน ชนิด Esi	-	0.18 (2.00)	-
สารคู่ควบไซเลน ชนิด Msi	-	-	0.18 (2.00)
สารเพิ่มความเปียก (Wetting agent)	0.20	0.20	0.20
ตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane)	90.59	90.59	90.59

หมายเหตุ : *ปริมาณสุทธิของเนื้อสาร

**ในวงเล็บคือปริมาณ % ของเนื้อสารเมื่อเทียบกับสารในกลุ่มไซลอกเซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 ศึกษาปริมาณของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ในน้ำยาสาร- ถอดแบบจากสูตร 5DM4MH1Asi

1. ชั่งสารเคมีตามตารางที่ 3.7 ตามลำดับ โดยจัดเตรียมภาชนะสำหรับใส่สารเคมี (ปิ๊กเกอร์ขนาด 250 ml)
2. ทำการปั่นกวนด้วยเครื่องผสมเชิงกล โดยมีอัตราเร็ว 300 รอบต่อนาที (rpm) เป็นเวลา 2 นาที
3. ใส่สารเคมีลงภาชนะตามลำดับ จากนั้นทำการปั่นกวนสารตามขั้นตอนในข้อที่ 2 โดยทำซ้ำทุกครั้งเมื่อมีการเติมสาร
4. เมื่อผสมน้ำยาสารถอดแบบเสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการทดสอบ

ตารางที่ 3.7 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ในน้ำยาสารถอดแบบจาก สูตร 5DM4MH1Asi

ชื่อสารเคมี	ปริมาณ (%wt)		
	5DM4MH 0.5Asi	5DM4MH 1.5Asi	5DM4MH 3Asi
พอลิไดเมทิลไซลอกเซน	5.00	5.00	5.00
พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน	4.00	4.00	4.00
ตัวเร่งปฏิกิริยาดีปีที (Catalyst)	0.03	0.03	0.03
สารคู่ควบไซเลน ชนิด Asi	0.05 (0.50)	0.14 (1.50)	0.27 (3.00)
สารเพิ่มความเปียก (Wetting agent)	0.20	0.20	0.20
ตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane)	90.72	90.63	90.50

หมายเหตุ : *ปริมาณสุทธิของเนื้อสาร

**ในวงเล็บคือปริมาณ % ของเนื้อสารเมื่อเทียบกับสารในกลุ่มไซลอกเซน

3.2.1.4 การศึกษาผลของน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาเปรียบเทียบกับน้ำยาสาร- ถอดแบบทางการค้า

1. จัดเตรียมน้ำยาสารถอดแบบ ดังนี้ 5DM4MH1Asi KLO-200P (Wax-based) และ BCI-024N-250A (Silicone-based)
2. นำสารเคมีที่เตรียมไว้ใส่ลงภาชนะตามลำดับ
3. จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การทำชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุลงมยาง

1. ตัดยางคอมพาวด์บิวทิล เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสความกว้าง 16 เซนติเมตร ความยาว 16 เซนติเมตร ความหนา 1 เซนติเมตร ให้เท่ากับแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 3.2
2. นำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
3. จากนั้นนำชิ้นงานยางที่ได้มาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 2.50 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร เพื่อให้เท่ากับช่องของแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 3.3 สำหรับใส่ชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุลงมยางเพื่อใช้ในขั้นตอนของการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาสารลดแบบ



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์สำหรับทำแบบจำลองถุลงมยาง



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับใส่ถุลงมยางในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วิธีการเคลือบน้ำยาสารถอดแบบบนชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุงลมยาง

1. นำชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุงลมยาง ขนาดความกว้าง 2.50 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร มาเช็ดทำความสะอาดพื้นผิวโดยการหยดบิวทานอล ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร เช็ดด้วยกระดาษไร้ขนจำนวน 2 รอบ ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที จนพื้นผิวของชิ้นงานยางแห้ง

2. ทำการสเปรย์น้ำยาสารถอดแบบจากขวดสเปรย์ลงบนชิ้นงานยาง โดยให้ฟิล์มสารถอดแบบมีความหนาสุทธิต่อกับ 12-14 ไมครอน (Micron) ได้จากการคำนวณปริมาณน้ำหนักของน้ำยาสารถอดแบบที่พ่นลงชิ้นงานยาง แสดงตัวอย่างดังภาคผนวกที่ ข

3. นำชิ้นงานยางที่ใช้จำลองเป็นถุงลมยางที่เคลือบด้วยน้ำยาสารถอดแบบแล้วไปอบที่เตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้น้ำยาสารถอดแบบแห้ง และเกิดเป็นฟิล์มขึ้น

4. นำชิ้นงานยางที่มีการเคลือบน้ำยาสารถอดแบบแล้วไปทำการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำยาสารถอดแบบต่อไป



รูปที่ 3.4 แผนผังการเคลือบน้ำยาสารถอดแบบบนชิ้นงานยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 วิธีการทดสอบน้ำยาสารถอดแบบ

3.2.4.1 การทดสอบสารถอดแบบโดยใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์

เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบ และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ รวมถึงการนำชิ้นงานยาวที่ผ่านการทดสอบการถอดแบบ และเกิดการติดกันของชิ้นงานยาวแล้ว โดยนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เพื่อให้ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีค่าต่ำสุดที่ชิ้นงานยาวสามารถเกิดการติดกันได้

1. เตรียมชิ้นงานยาวขนาดความกว้าง 2.50 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร ที่มีการเคลือบสารถอดแบบแล้ว จำนวน 30 ชิ้น สำหรับใช้ในการทดสอบ โดยจำแนกได้ดังต่อไปนี้

- ชิ้นงานตามปัจจัยการศึกษาปริมาณของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (PMHS) เป็นน้ำยาสารถอดแบบสูตร 5DM 5DM2MH 5DM4MH และ 5DM6MH โดยใช้จำนวน 2 ชิ้นต่อ 1 สูตร รวมทั้งหมดจำนวน 8 ชิ้น

- ชิ้นงานตามปัจจัยการศึกษาชนิดของสารคู่ควบไซเลน เป็นน้ำยาสารถอดแบบสูตร 5DM4MH1Asi 5DM4MH1Esi 5DM4MH1Msi 5DM4MH2Asi 5DM4MH2Esi และ 5DM4MH2Msi โดยใช้จำนวน 2 ชิ้นต่อ 1 สูตร รวมทั้งหมดจำนวน 12 ชิ้น

- ชิ้นงานตามปัจจัยการศึกษาปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน เป็นน้ำยาสารถอดแบบสูตร 5DM4MH0.5Asi 5DM4MH1.5Asi และ 5DM4MH3Asi โดยใช้จำนวน 2 ชิ้นต่อ 1 สูตร รวมทั้งหมดจำนวน 6 ชิ้น

- ชิ้นงานตามการศึกษาเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า คือ KLO-200P (Wax-based) และ BCI-024N-250A (Silicone-based) โดยใช้จำนวน 2 ชิ้นต่อ 1 สูตร รวมทั้งหมดจำนวน 4 ชิ้น

2. ทำการทดสอบ 1 จุดต่อ 1 ชิ้นงาน

3. นำชิ้นงานมาทำการทดสอบบนเครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์ โดยใช้รูปแบบการเคลื่อนที่ของคู่สัมผัสเป็นแบบไป-กลับ (Reciprocating) หัวกดที่ใช้คือ ลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความเร็วในการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที โหลดน้ำหนัก 500 กรัม ระยะเคลื่อนที่ของลูกบอล 2 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G133-05 [9]

4. ทำการทดสอบซ้ำ ตามข้อ 3 โดยเปลี่ยนชิ้นงานใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.2 การทดสอบสารถอดแบบโดยใช้เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)

1. เตรียมอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดสอบน้ำยาสารถอดแบบ ได้แก่ กรรไกร คัตเตอร์ ถุงมือกันความร้อน คีมคีบ และเกรียง
2. นำชิ้นงานยางที่มีการเคลือบน้ำยาสารถอดแบบแล้วในหัวข้อที่ 3.2.3 ไปทำการทดสอบประสิทธิภาพของการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป แสดงดังรูปที่ 3.5
3. นำชิ้นงานยางที่มีการเคลือบน้ำยาสารถอดแบบวางลงในช่องของแม่พิมพ์เหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.6
4. นำเข้าเครื่องกดอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที เป็นการให้ความร้อนครั้งแรกก่อนทำการขึ้นรูป (Pre-heat)
5. เมื่อครบเวลานำกรีนไทร์วางบนชิ้นงานยางที่มีการเคลือบน้ำยาสารถอดแบบ จากนั้นใส่ในเครื่องกดอัดขึ้นรูปภายใต้ความดัน 2 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที สำหรับการถอดแบบ 1 รอบ แสดงดังรูปที่ 3.7
6. เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการดึงยางที่เชื่อมโยงแล้วออกจากชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบ แสดงดังรูปที่ 3.8
7. บันทึกจำนวนรอบที่สามารถถอดแบบได้โดยที่ยางไม่เกิดการติดกัน จากการดึงออกด้วยมือ ซึ่งไม่ต้องใช้แรงในการดึงออก
8. ทำซ้ำตามข้อที่ 5 เมื่อชิ้นงานยางทั้งสองเริ่มเกิดการติดกันจนต้องใช้แรงในการดึงออก หรือมีการขาดของยาง ทำการหยุดการทดสอบทันที



รูปที่ 3.5 เครื่องกดอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์เหล็กสำหรับใช้ในการทดสอบการถอดแบบ

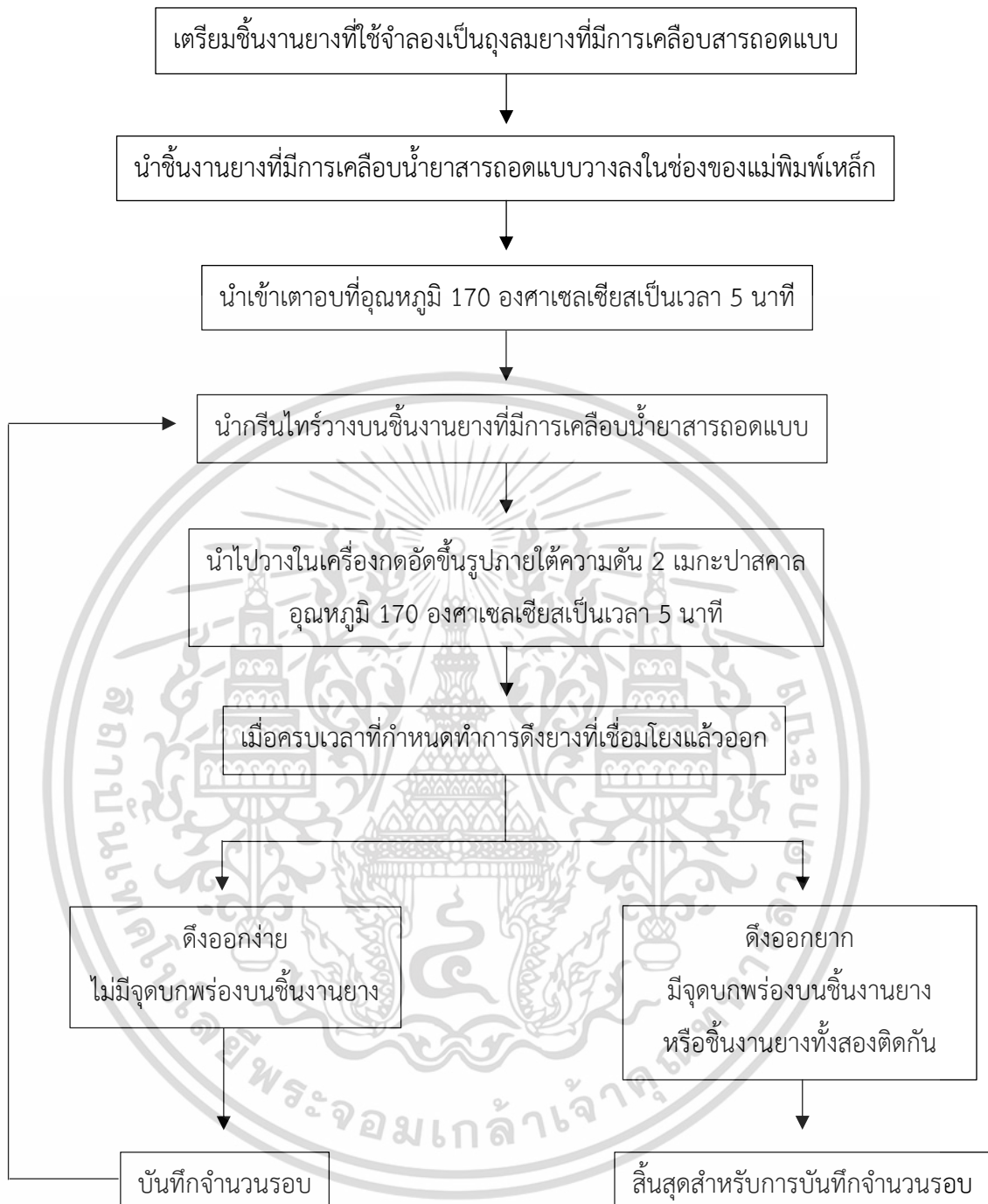


รูปที่ 3.7 นักกรีนไทร์วางบนชิ้นงานยางที่ทำการเคลือบสารถอดแบบ



รูปที่ 3.8 การดึงยางที่เชื่อมโยงแล้วออกจากชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

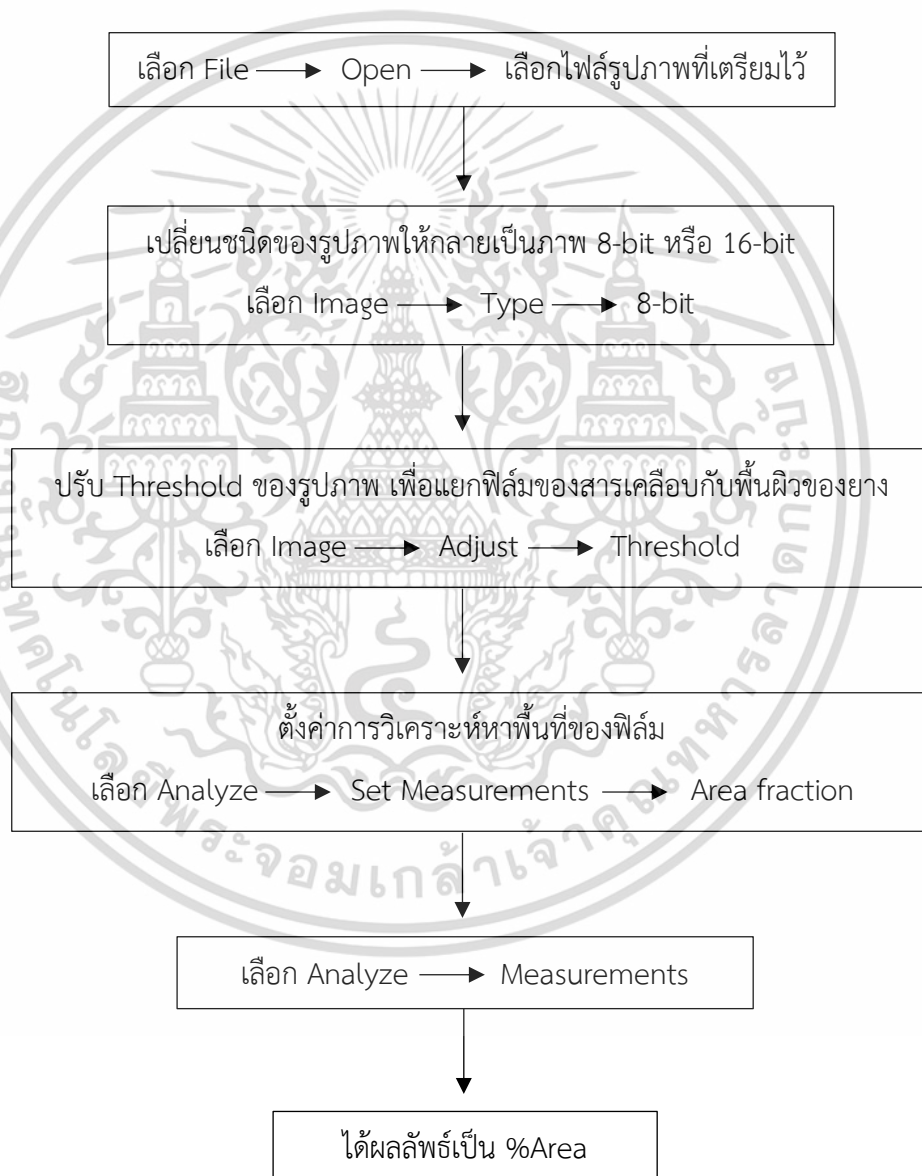


รูปที่ 3.9 แผนผังการทดสอบสารถอดแบบโดยใช้เครื่องกดอัดขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบจากการทดสอบการกัดกัดขึ้นรูปด้วยโปรแกรม ImageJ®

การวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบที่คงเหลืออยู่บนชิ้นงานยางหลังจากที่นำไปทดสอบการขึ้นรูป ซึ่งการทำการตรวจสอบผิวหน้าของชิ้นงานที่ได้จากการเก็บตัวอย่างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่าในการถ่ายภาพ และบันทึกภาพขนาด 2740x2740 pixels จากนั้นนำรูปภาพที่ได้มาวิเคราะห์พื้นที่ฟิล์มสารลดแบบด้วยโปรแกรม ImageJ® สำหรับขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบสามารถสรุปเป็นแผนผัง แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังการวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบด้วยโปรแกรม ImageJ®

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสูตรของสารถอดแบบ สำหรับถลุงมยางในอุตสาหกรรมการผลิตยางล้อ โดยเป็นความร่วมมือระหว่างภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กับบริษัทแอดมี อินเทอร์เน็ต (ประเทศไทย) จำกัด โดยที่สารถอดแบบนี้มีการพัฒนามาจากสารในกลุ่มซิลิโคนที่เป็นพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane, PDMS) ที่มีสมบัติในด้านของการทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูง และมีความยืดหยุ่นที่ดี นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มสมบัติในด้านความลื่นของสารเคลือบบนพื้นผิว และเป็นการเพิ่มการเชื่อมโยงโดยใช้สารในกลุ่มซิลิโคนที่เป็นพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (Polymethyl hydrogen siloxane, PMHS) [10, 62] และสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) โดยนำยาสารถอดแบบที่เตรียมไว้ในรูปแบบของสารละลายที่มีการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปทำการทดสอบ ยังคงไม่เกิดปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีตัวทำละลายเฮกเซนอยู่ในน้ำยาสารถอดแบบ และเมื่อมีการนำน้ำยาสารถอดแบบเข้าสู่ขั้นตอนของการเคลือบลงบนพื้นผิวของชิ้นยาง และนำเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ทำให้เกิดการระเหยไปของตัวทำละลายเฮกเซน หลังจากนั้นองค์ประกอบของสารเคลือบเกิดการเชื่อมโยงกัน และสุดท้ายได้เป็นฟิล์มที่แห้งของสารถอดแบบ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มสารถอดแบบจากการประยุกต์ใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ ซึ่งมีหัวกดเป็นลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์สัมผัสกับฟิล์มสารถอดแบบ และมีการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ โดยให้ผลเป็นแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบจากระยะทางที่หัวกดเคลื่อนที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยการพัฒนาสารถอดแบบมีขั้นตอนในการศึกษา ดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาผลของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (PMHS)

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลน

ตอนที่ 3 การศึกษาผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน

ตอนที่ 4 การศึกษาผลของน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การศึกษาผลของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (PMHS)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสูตรของสารถอดแบบ โดยมีการใช้พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งอยู่ในสารละลายเฮกเซน (Hexane) จากนั้นได้ทำการเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยง และความลื่นของฟิล์มสารถอดแบบโดยการเติมพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (PMHS) โดยปริมาณของ PMHS ที่ทำการศึกษา คือ 0%, 2%, 4% และ 6%wt ตามลำดับ

ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำลงของสารถอดแบบจากองค์ประกอบของน้ำยาสารถอดแบบที่มี PDMS ที่ปริมาณ 5%wt และ PMHS ที่ปริมาณ 2-6%wt และศึกษาผลของ PMHS ที่มีผลต่อความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบที่เพิ่มมากขึ้นจากระยะทางในการเคลื่อนที่ของหัวกดในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ โดยทำการเตรียมฟิล์มสารถอดแบบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อวิเคราะห์ผลจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ในขณะที่ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยางโดยมีการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ

ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ของฟิล์มสารถอดแบบ แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางเมื่อไม่มีการเคลือบด้วยสารถอดแบบมีค่าเท่ากับ 1.05 ถือว่าสูง แต่เมื่อมีการเคลือบสารถอดแบบที่ขึ้นยางส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงอยู่ในช่วง 0.20-0.30 โดยการใช้ PMHS ที่ปริมาณ 2-6%wt ไม่ส่งผลอย่างมีนัยยะต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เนื่องจากฟิล์มสารถอดแบบแต่ละสูตรมีองค์ประกอบหลักในสารถอดแบบเป็นสารชนิดเดียวกันคือ PDMS การใช้ PMHS อาจส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อโครงสร้างตาข่ายของฟิล์ม PDMS

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางที่มีปริมาณของ PMHS ต่างกัน เมื่อทำการเคลือบฟิล์มสารถอดแบบ

ฟิล์มสารถอดแบบ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
ODM (ไม่มีสารถอดแบบ)	1.05±0.01
5DM (0%PMHS)	0.30±0.02
5DM2MH (2%PMHS)	0.25±0.02
5DM4MH (4%PMHS)	0.20±0.01
5DM6MH (6%PMHS)	0.25±0.01

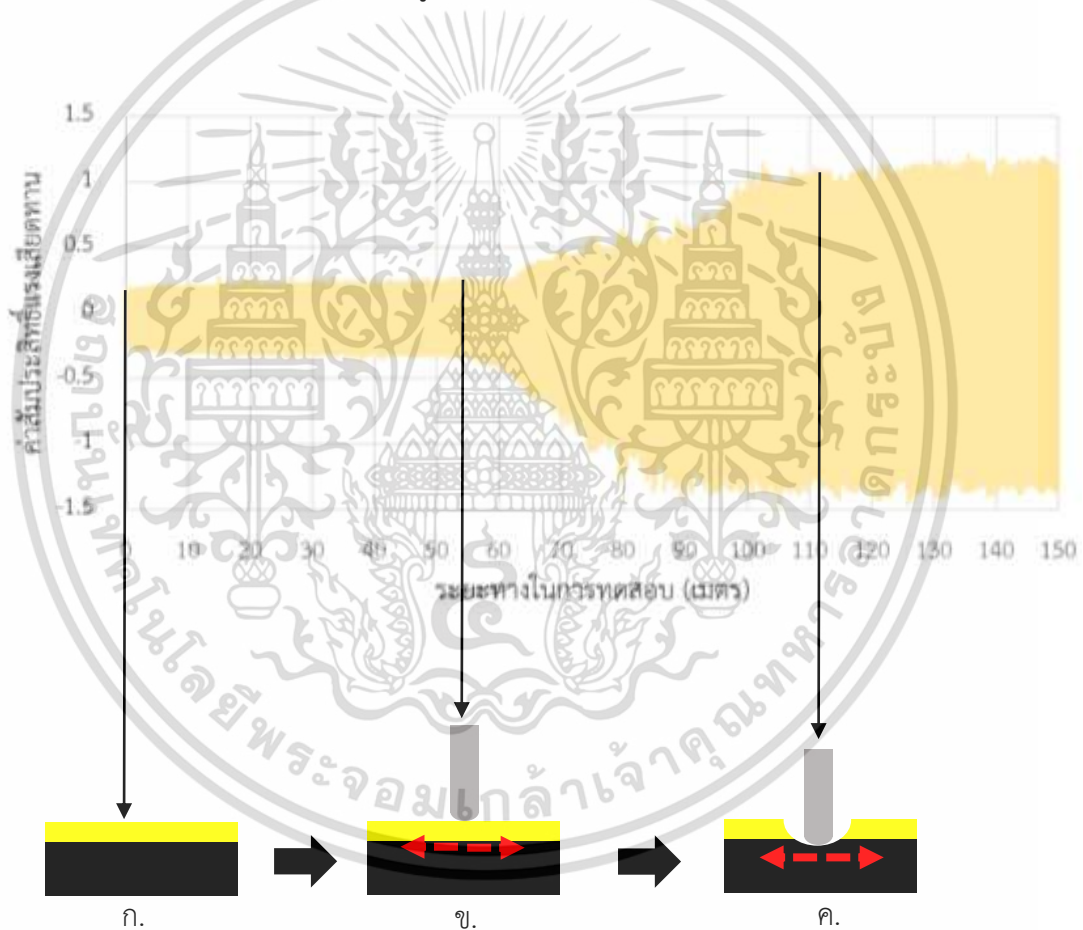
แม้ว่าในฟิล์มสารถอดแบบที่มีปริมาณของ PMHS ต่างกัน มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่แตกต่างกัน แต่ในการทดสอบความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบ พบว่าสำหรับน้ำยาสารถอดแบบ

สูตร 5DM 5DM2MH และ 5DM4MH ที่มีปริมาณของ PMHS เท่ากับ 0%, 2% และ 4%wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชน

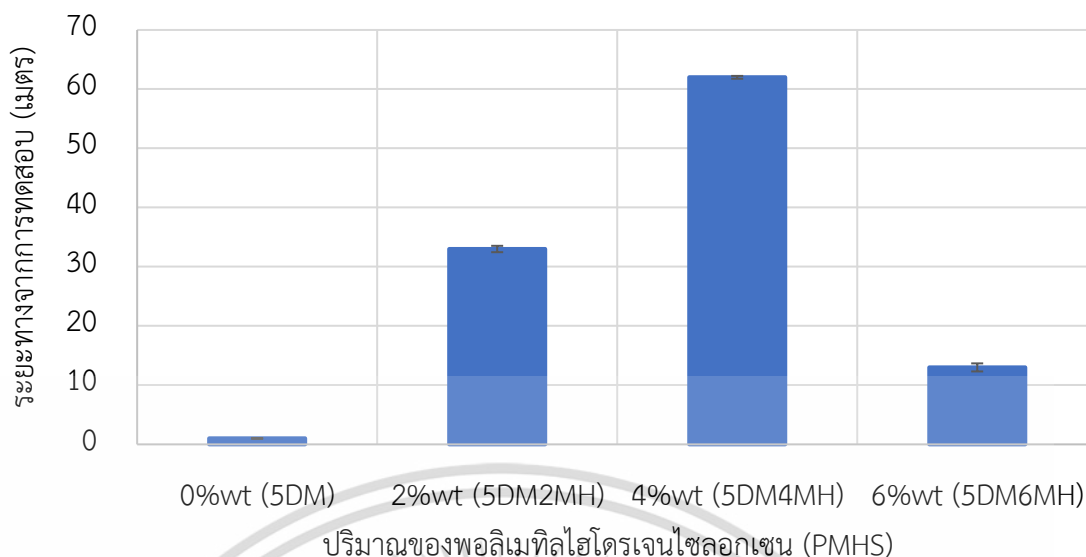
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ มีระยะทางในการทดสอบโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่เท่ากับ 1, 33 และ 62 เมตรตามลำดับ เนื่องจากฟิล์มสารกอดแบบมีการเชื่อมโยงกันระหว่าง PDMS และ PMHS ที่แข็งแรงมากขึ้น [62] ส่งผลให้ค่าความทนทานของฟิล์มสารกอดแบบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่น้ำยาสารกอดแบบสูตร 5DM6MH ที่มีปริมาณของ PMHS สูงขึ้นถึง 6%wt พบว่าความทนทานของฟิล์มสารกอดแบบลดลง โดยมีค่าระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 13 เมตร โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ คาดว่าเป็นผลมาจาก PDMS ที่เกิดการเชื่อมโยงกับ PMHS มากจนไม่สามารถทนต่อการรับแรงกดจากน้ำหนัก และความร้อนที่ถูกสะสมขึ้นระหว่างการสัมผัสกันของฟิล์มสารกอดแบบกับลูกบอล ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีการเคลื่อนที่ไป-กลับซ้ำ ๆ บนฟิล์มสารกอดแบบได้ [66] สำหรับรูปภาพจำลองในการทดสอบ และผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



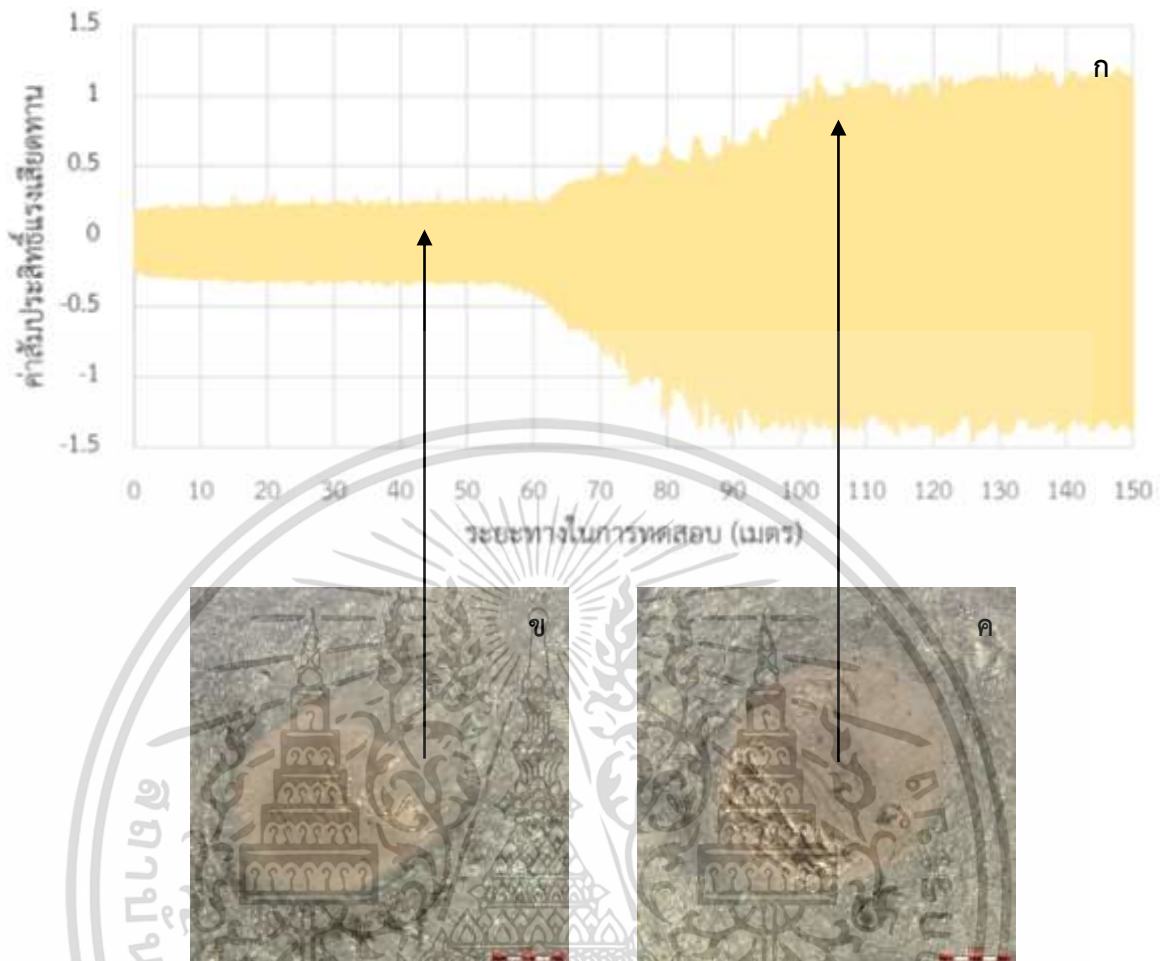
รูปที่ 4.1 (ก) ฟิล์มสารกอดแบบที่ถูกเคลื่อนที่บนชิ้นงานยาง (ข) หัวกดของเครื่องไทรโบมิเตอร์ที่เคลื่อนที่ไป-กลับบนฟิล์มสารกอดแบบในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ (ค) หัวกดของเครื่องไทรโบมิเตอร์ที่เคลื่อนที่ไป-กลับบนฟิล์มสารกอดแบบในระยะเวลาที่นานขึ้นจนฟิล์มสารกอดแบบเกิดการสึกหรองจนถึงพื้นผิวของชิ้นงานยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ผลของปริมาณของ PMHS ที่มีผลต่อค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบแสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไทรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

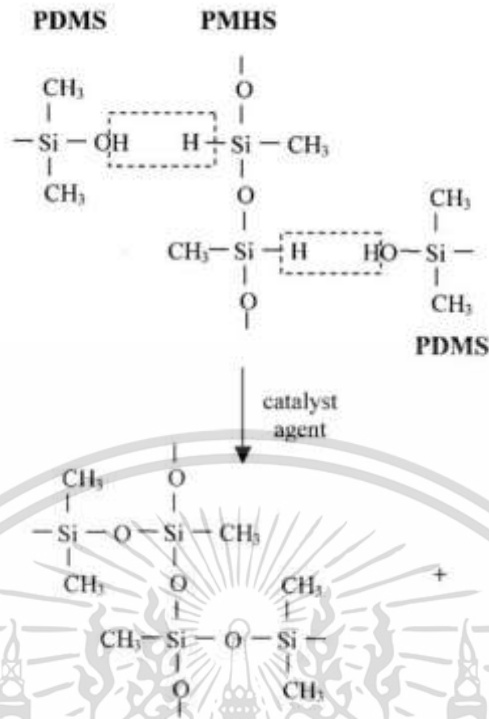
จากการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์น้ำยาสารถอดแบบสูตร 5DM4MH ได้ผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบ ความทนทานของสารถอดแบบ และการประเมินผลความสามารถในการถอดแบบจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อย่างเกิดการติดกัน พบว่าน้ำยาสารถอดแบบสูตร 5DM4MH มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มสารถอดแบบเท่ากับ 0.20 ± 0.01 ที่คงที่จนได้ระยะทางในการทดสอบที่ 0-62 เมตร เห็นได้ว่าเป็นช่วงที่มีฟิล์มสารถอดแบบอยู่บนชิ้นงานยางในระยะของการที่ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์มีเคลื่อนที่ไป-กลับอย่างต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก, ข) โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อมีระยะทางในการทดสอบในช่วง 63-100 เมตร พบว่าฟิล์มสารถอดแบบเกิดความเสียหายจากการสัมผัสของลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีการเคลื่อนที่ไป-กลับซ้ำ ๆ จนมีค่าเท่ากับ 1.05 เมื่อระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 108 เมตร คือลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดสอบมีการสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานยางแล้ว [66] ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ค)



รูปที่ 4.3 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ของน้ำยาสารถอด-
แบบสูตร 5DM4MH (ข) फिल्मสารถอดแบบที่ได้จากกล้อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คงที่
(ค) फिल्मสารถอดแบบที่ได้จากกล้อง OM เมื่อลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง

สำหรับการเชื่อมโยงกันระหว่าง PDMS และ PMHS โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (DBT) เกิดขึ้นเมื่อ
น้ำยาสารถอดแบบมีการเคลือบลงบนพื้นผิวของชิ้นงานยาง และถูกนำเข้าไปเตาอบลมร้อนที่มีอุณหภูมิ
150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ทำให้ตัวทำละลายเฮกเซนระเหยออก และองค์ประกอบของ
น้ำยาสารถอดแบบจึงเกิดปฏิกิริยาแบบควมแน่นของหมู่ปลายไฮดรอกซิล (Si-OH) ของ PDMS ที่มี
Si-H ของ PMHS โดยมีการปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ออกมา และมีการเชื่อมโยงกันระหว่าง
PDMS และ PMHS เป็นแบบโครงร่างตาข่าย 3 มิติ [69] แสดงดังในรูปที่ 4.4

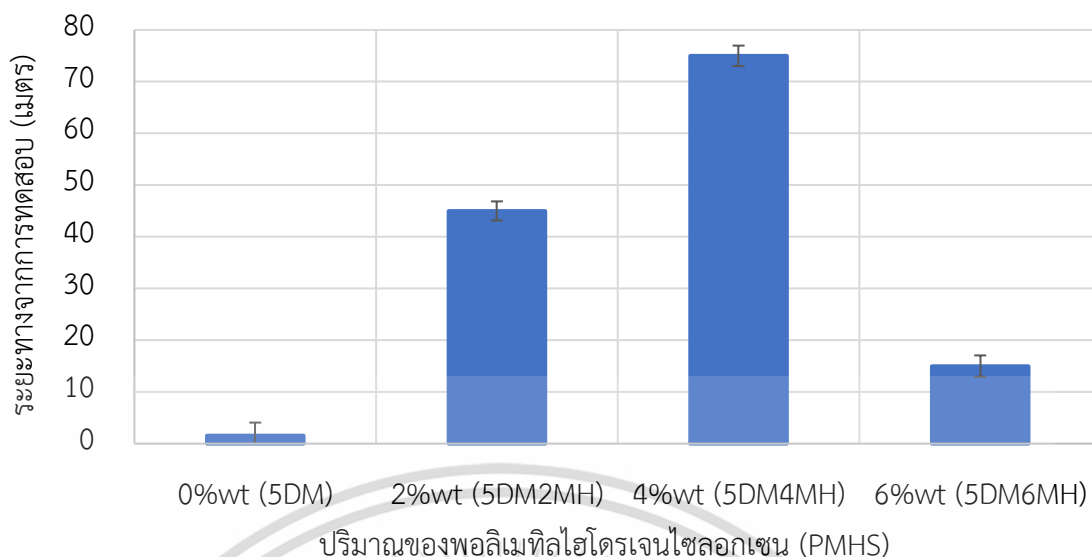
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การเชื่อมโยงแบบโครงตาข่าย 3 มิติของ PDMS และ PMHS [70]

นอกจากนี้ในการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ได้มีการนำชิ้นงานที่มีการเคลือบสาร
 ถอดแบบแล้วไปทำการทดสอบการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป จนถึงรอบแรกที่ชิ้นงานเกิดการ
 การติดกัน จึงนำชิ้นงานที่มีการเคลือบสารถอดแบบ ซึ่งเป็นชิ้นงานที่เป็นตัวแทนของถุงลมยาง
 มาทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ซึ่ง
 เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้ จึงใช้ค่านี้มาเป็นเกณฑ์ในการประเมินผลหาแนวโน้มความทนทานของฟิล์ม
 สารถอดแบบ โดยวิเคราะห์จากระยะทางในการทดสอบ พบว่าปริมาณของ PMHS มีผลต่อค่า
 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อชิ้นงานเกิดการติดกัน เมื่อปริมาณของ PMHS เท่ากับ 0%, 2% และ
 4%wt ฟิล์มสารถอดแบบมีระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 1.5, 45 และ 75 เมตรตามลำดับ แต่เมื่อ
 ปริมาณของ PMHS เท่ากับ 6%wt ส่งผลให้ฟิล์มสารถอดแบบมีระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 15
 เมตร เป็นผลมาจากการเชื่อมโยงกันระหว่าง PDMS และ PMHS ที่หนาแน่นขึ้น ทำให้ฟิล์มสาร-
 ถอดแบบมีความทนทานในระหว่างการทดสอบขณะที่ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง
 ลดลง ส่งผลทำให้ระยะทางในการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ลดลง
 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



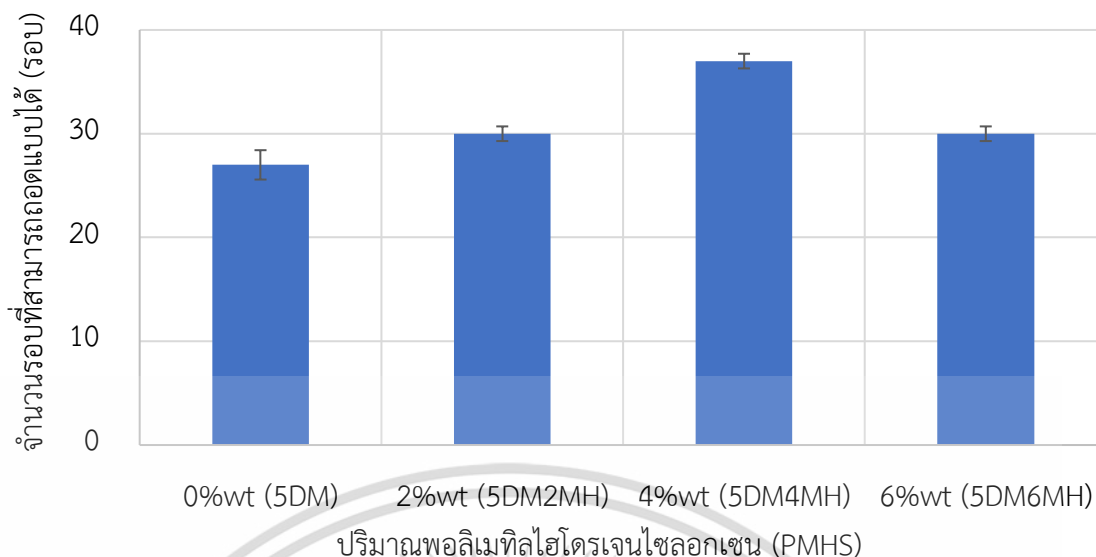
รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณของ PMHS ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

นอกจากระยะทางในการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ทำให้ประเมินผลด้านความสามารถในการติดกันของยางได้ จึงทำการยืนยันผลการทดสอบด้วยการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยทำการตรวจสอบทั้งชิ้นงานยางจากยางวัลคาไนซ์ที่เป็นตัวแทนถลุงมยาง และกรีนไทร์ที่เป็นยางคอมพาวด์ซึ่งเป็นตัวแทนของชิ้นส่วนยางรถยนต์หลังจากแยกชิ้นงานออกจากกัน โดยกำหนดให้ทดสอบการถอดแบบผ่านเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ความดัน 2 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ต่อการถอดแบบ 1 รอบ จากนั้นทำซ้ำจนชิ้นงานยางเกิดการติดกัน หรือเกิดความเสียหาย จึงหยุดการทดสอบ

จากการทดสอบการถอดแบบเมื่อมีการเติม PMHS มีผลต่อความสามารถในการถอดแบบของสารถอดแบบเมื่อเคลือบลงบนชิ้นงานยาง พบว่าปริมาณของ PMHS ที่ 0%, 2% และ 4%wt มีจำนวนรอบในการถอดแบบเท่ากับ 27, 30 และ 37 รอบ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากฟิล์มสารถอดแบบมีการเชื่อมโยงที่มากขึ้น ทำให้มีความทนทานต่อการกดอัดขึ้นรูปร้อน และความสามารถในการถอดแบบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณของ PMHS สูงขึ้นเท่ากับ 6%wt มีจำนวนรอบในการถอดแบบเท่ากับ 30 รอบ เนื่องจากฟิล์มสารถอดแบบมีความทนทานลดลง เมื่อได้รับแรงกดอัดซ้ำ ๆ ในขณะที่ทำการทดสอบการถอดแบบ ดังนั้นประสิทธิภาพในการถอดแบบจึงลดลง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่

4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณของ PMHS ที่มีผลต่อความสามารถในการถอดแบบ

ดังนั้นปริมาณของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (PMHS) มีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำยา-สารถอดแบบเมื่อเคลือบลงบนชิ้นงานยาง โดยน้ำยาสารถอดแบบสูตร 5DM4MH ที่มีปริมาณของ PMHS เท่ากับ 4%wt เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานน้อยที่สุด และมีค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบมากที่สุดเท่ากับ 62 เมตร นอกจากนี้ได้ทำการยืนยันผลด้วยการขึ้นรูปยางกรีนไทร์ได้จำนวนรอบในการขึ้นรูปสูงที่สุดเท่ากับ 37 รอบ

4.2 การศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลน

การทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์จากการเตรียมฟิล์มสารถอดแบบที่มีองค์ประกอบคือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ตัวเร่งปฏิกิริยา และพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซนที่ปริมาณ 4%wt ซึ่งเป็นสารถอดแบบที่ได้จากผลของการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1

สำหรับการศึกษาชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อฟิล์มสารถอดแบบ โดยทำการศึกษาสารคู่ควบไซเลนทั้งหมด 3 ชนิด คือ อะมิโนไซเลน (Asi) อีพอกซีไซเลน (Esi) และเมทาคริลิกไซเลน (Msi) จากนั้นทำการอบฟิล์มสารถอดแบบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบ และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ ซึ่งวิเคราะห์ผลจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ในขณะที่ลูกบอลทั้งสองตัวสัมผัสกับชิ้นงานยางโดยมีการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

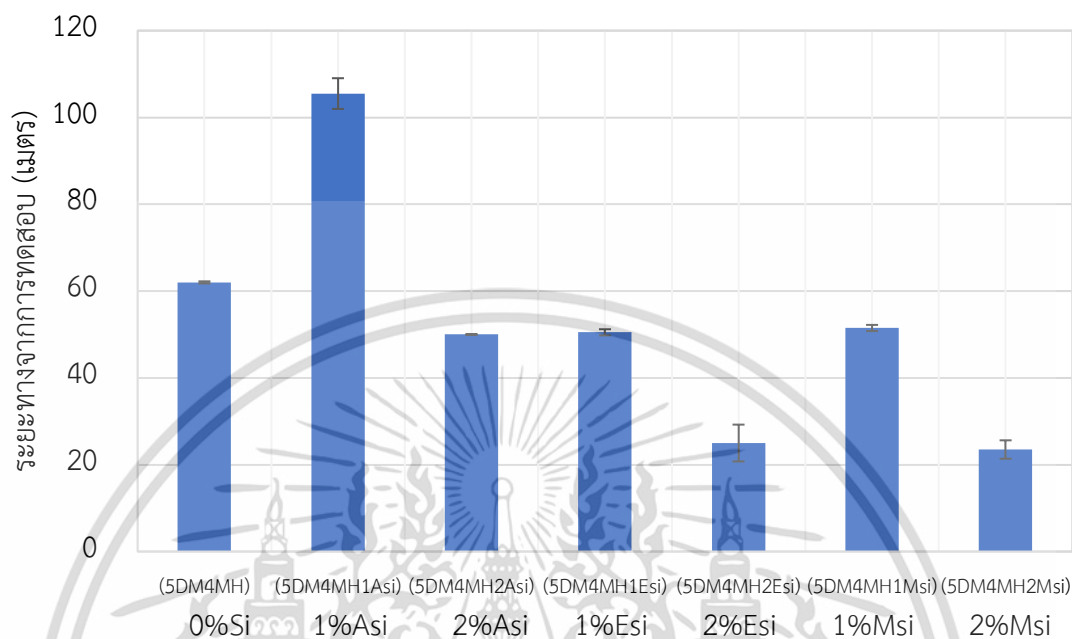
ในการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ของฟิล์มสารลดแบบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางเมื่อไม่มีการเคลือบด้วยสารลดแบบมีค่าเท่ากับ 1.05 ถือว่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารลดแบบ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง โดยผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารลดแบบที่มีชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.25–0.30 ซึ่งเป็นผลมาจากการมีองค์ประกอบหลักในสารลดแบบเป็นสารชนิดเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนที่ 1% และ 2%wt เมื่อทำการเคลือบฟิล์มสารลดแบบ

สารลดแบบ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
0DM (ไม่มีสารลดแบบ)	1.05±0.01
5DM4MH (ไม่มีสารคู่ควบไซเลน)	0.30±0.02
5DM4MH1Asi (1%Asi)	0.25±0.01
5DM4MH2Asi (2%Asi)	0.25±0.01
5DM4MH1Esi (1%Esi)	0.25±0.01
5DM4MH2Esi (2%Esi)	0.25±0.01
5DM4MH1Msi (1%Msi)	0.25±0.01
5DM4MH2Msi (2%Msi)	0.25±0.02

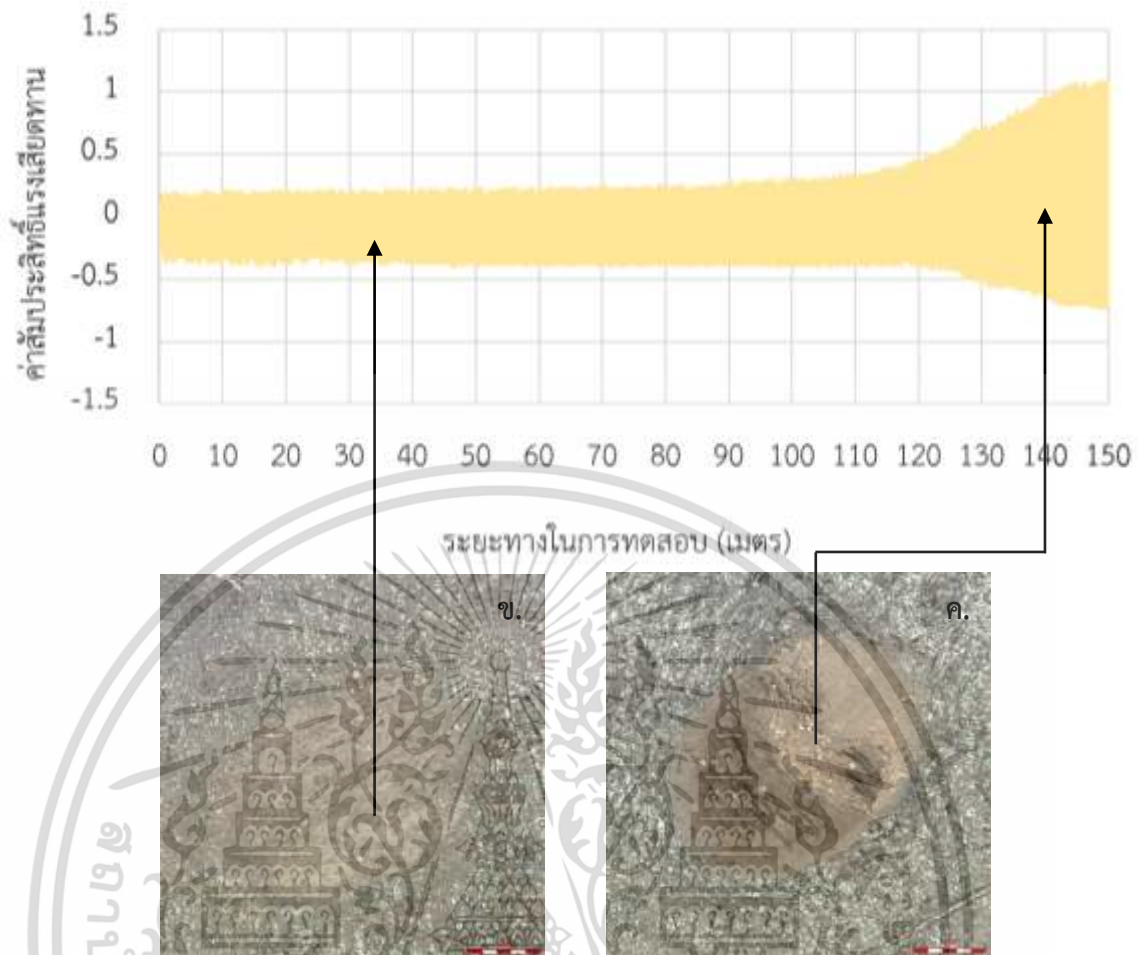
จากผลการทดสอบฟิล์มสารลดแบบที่ผสมสารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสารลดแบบที่ไม่ผสมสารคู่ควบไซเลน แต่ในการทดสอบความทนทานของฟิล์มสารลดแบบเพื่อดูผลของชนิดของสารคู่ควบไซเลนโดยทดสอบที่ปริมาณ 1% และ 2%wt พบว่าการไม่เติมสารคู่ควบไซเลน และการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน อีพอกซี และเมทาคริลิก จากผลการทดสอบมีระยะทางในการทดสอบโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่สำหรับสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1%wt ของน้ำยาสารลดแบบสูตร 5DM4MH 5DM4MH1Asi 5DM4MH1Esi และ 5DM4MH1Msi เท่ากับ 62, 105.5, 50.5 และ 51.5 เมตร ตามลำดับ และผลการทดสอบของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 2%wt ของน้ำยาสารลดแบบสูตร 5DM4MH 5DM4MH2Asi 5DM4MH2Esi และ 5DM4MH2Msi เท่ากับ 62, 50, 25 และ 23.5 เมตร ตามลำดับ จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่ปริมาณ 1%wt แสดงให้เห็นถึงค่าระยะทางจากการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่สูงที่สุดเป็นผลมาจากสารคู่ควบไซเลนในกลุ่มอะมิโนช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงที่ติระหว่งพื้นผิวของชิ้นงานยางกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มสารถอดแบบ ส่งผลให้เกิดการปรับปรุงสมบัติของการยึดเกาะให้ดีขึ้น [58] ผลการทดสอบแสดง ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1% และ 2%wt ที่มีผลต่อค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบแสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไทรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

ดังนั้นจากการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ของสารถอดแบบสูตร 5DM4MH1Asi ทำให้ได้ผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบ ความทนทานของสารถอดแบบ และการประเมินผลความสามารถในการถอดแบบจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อย่างเกิดการติดกันพบว่าสารถอดแบบสูตร 5DM4MH1Asi มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของฟิล์มสารถอดแบบเท่ากับ 0.25 ± 0.01 ที่คงที่จนได้ระยะทางในการทดสอบที่ 0-105.5 เมตร เห็นได้ว่าเป็นช่วงที่มีฟิล์มสารถอดแบบอยู่บนชิ้นงานยางในระยะเวลาของการที่ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์มีการเคลื่อนที่ไป-กลับอย่างต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก, ข) หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มสารถอดแบบเกิดความเสียหายจากการสัมผัสของลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีการเคลื่อนที่ไป-กลับซ้ำ ๆ จนมีค่าเท่ากับ 1.05 ที่ระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 145 เมตร นั่นคือลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดสอบสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานยางแล้ว [66] ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ค) สำหรับผลการทดสอบของสารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซี และเมทาคริลิก แสดงดังภาคผนวก ค

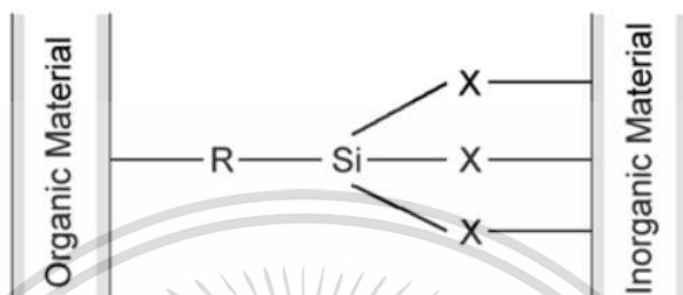


รูปที่ 4.8 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ (ข) फिल्मสารถอดแบบที่ได้จากกล้อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ (ค) फिल्मสารถอดแบบที่ได้จากกล้อง OM เมื่อลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง

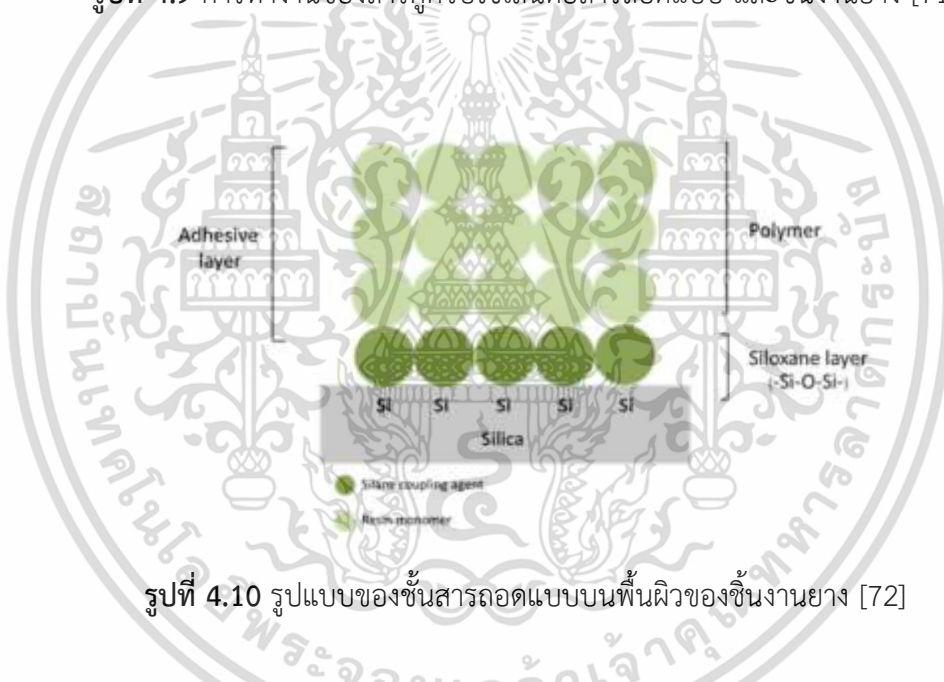
สำหรับการทำงานของสารคู่ควบไฮเลนที่มีผลต่อองค์ประกอบของน้ำยาสารถอดแบบ คือ เมื่อองค์ประกอบของสารถอดแบบมีการเชื่อมโยงเป็นโครงตาข่าย 3 มิติแล้ว สารคู่ควบไฮเลนนี้ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างสารถอดแบบ และพื้นผิวของชิ้นงานยาง โดยปกติแล้วบริเวณปลายข้างที่เกิดการยึดเกาะทางเคมีระหว่างสารคู่ควบไฮเลน และชิ้นงานยางที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบที่เรียกว่าชั้นซิลอกเซน (Siloxane layer, $-Si-O-Si-$) เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกลุ่มซิลานอล (Silanol group, $-Si-OH$) ระหว่างสารคู่ควบไฮเลน และพื้นผิวของชิ้นงานยางที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ และมีปลายอีกข้างเป็นหมู่ R ที่เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์กลุ่มอะมิโน อีพอกซี และเมทาคริลิก จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์แบบรวมตัวสร้างพันธะโควาเลนต์กับสารอินทรีย์คือ PDMS และ PMHS [72] ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในการศึกษาหัวข้อที่ 4.1 และในส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของหมู่ X ที่เป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ทำหน้าที่ยึดติดกับสารตัวเติม เช่น ซิลิกา ที่เป็นองค์ประกอบของชั้นงานยาง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และรูปแบบของชั้นสารถอดแบบบนพื้นผิวของชั้นงานยางที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 การทำงานของสารคู่ควบไซเลนต่อสารถอดแบบ และชั้นงานยาง [71]

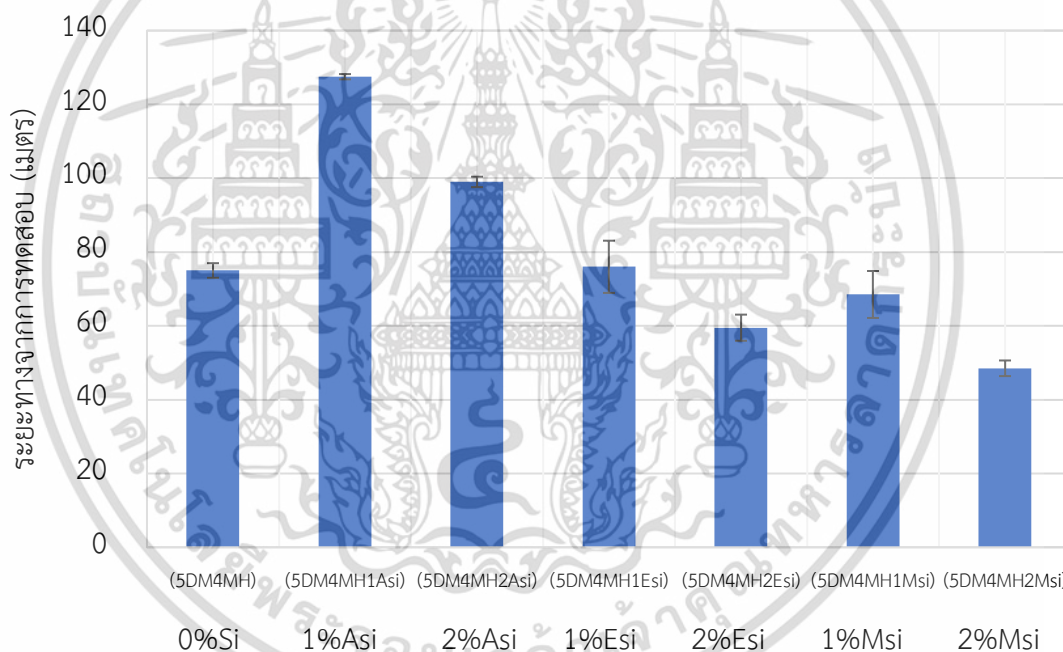


รูปที่ 4.10 รูปแบบของชั้นสารถอดแบบบนพื้นผิวของชั้นงานยาง [72]

นอกจากนี้ในการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ได้มีการนำชั้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบแล้วไปทำการทดสอบการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป จนถึงรอบแรกที่ชั้นงานยางเกิดการติดกัน จึงนำชั้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบ ซึ่งเป็นชั้นงานยางที่เป็นตัวแทนของถุงลมยางมาทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้ จึงใช้ค่านี้มาเป็นเกณฑ์ในการประเมินผลหาแนวโน้มความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบ โดยวิเคราะห์จากระยะทางในการทดสอบ พบว่าการไม่เติมสารคู่ควบไซเลน และการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน อีพอกซี และเมทาคริลิก ได้ผลของระยะทางในการทดสอบโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อชั้นงานยางเกิดการติดกัน สำหรับสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1%wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 75, 127.5, 76 และ 68.5 เมตรตามลำดับ และผลการทดสอบของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 2%wt เท่ากับ 75, 99, 59.5 และ 48.5 เมตรตามลำดับ ทำให้สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ในระยะทางจากการทดสอบสูงที่สุดเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งปริมาณที่ 1% และ 2%wt เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนเกิดการเชื่อมโยงที่ดีระหว่างพื้นผิวของชิ้นงานยาง และฟิล์มสารถอดแบบ เนื่องจากเป็นผลมาจากผลของความเกะกะ (Steric effect) ของหมู่ R ที่แตกต่างกันของสารคู่ควบไซเลนทั้ง 3 ชนิด โดยที่หมู่ฮิพอกซีที่มีวงสามเหลี่ยม และหมู่เมทาคริลิกที่มีพันธะคู่อยู่ 2 ตำแหน่ง ส่วนหมู่อะมิโนเป็นเพียงพันธะเดี่ยว ส่งผลให้สารคู่ควบไซเลนที่มีความเกะกะมากมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่าสารคู่ควบไซเลนที่มีความเกะกะน้อย [72] ทำให้สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนไม่มีความเสถียร และมีสมบัติในการยึดเกาะที่ดี [58] ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.11

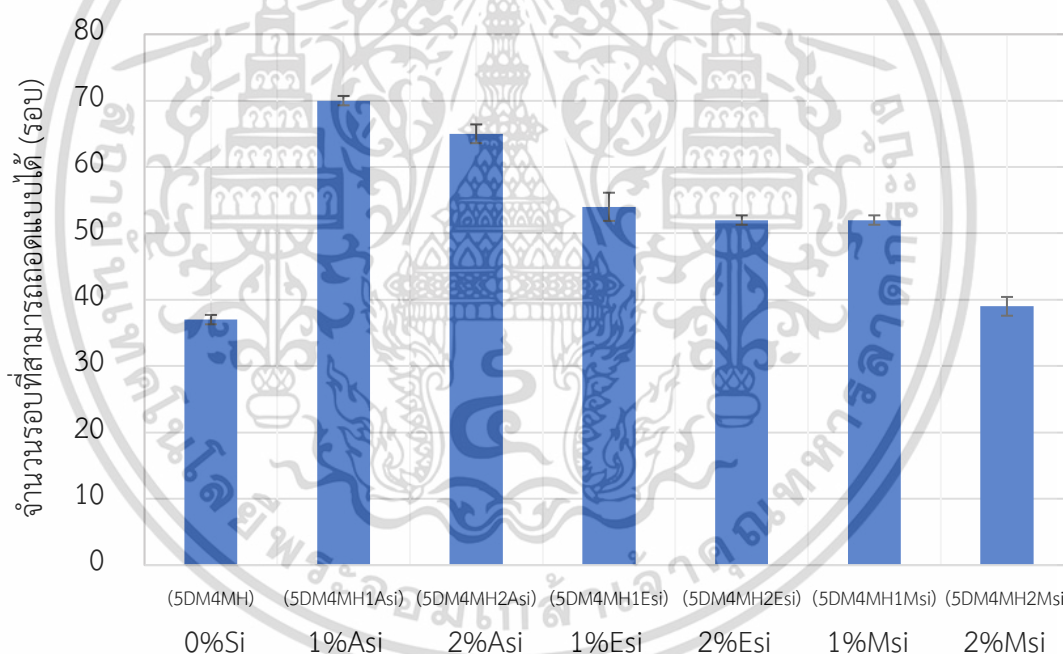


รูปที่ 4.11 ชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1% และ 2%wt ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

นอกจากระยะทางในการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ทำให้ประเมินผลด้านความสามารถในการติดกันของยางได้ จึงทำการยืนยันผลการทดสอบจากการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยทำการทดสอบการถอดแบบจนชิ้นงานยางเกิดการติดกัน หรือเกิดความเสียหายจึงหยุดการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการถอดแบบเมื่อชนิดของสารคู่ควบไซเลนแตกต่างกันต่อความสามารถในการถอดแบบของสารถอดแบบเมื่อเคลือบลงบนชิ้นงานยาง เพื่อดูผลของการไม่เติมสารคู่ควบไซเลนและการเติมสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน อีพอกซี และเมทาคริลิก พบว่าจากผลการทดสอบการถอดแบบของสารถอดแบบที่มีสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1%wt เท่ากับ 37, 70, 54 และ 52 รอบตามลำดับ และสำหรับผลการทดสอบการถอดแบบของสารถอดแบบที่มีสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 2%wt เท่ากับ 37, 65, 52 และ 39 รอบตามลำดับ โดยสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนให้ผลการทดสอบการถอดแบบ โดยมีจำนวนรอบที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารคู่ควบไซเลนที่เป็นชนิดอีพอกซี และเมทาคริลิก โดยที่สารคู่ควบไซเลนในกลุ่มอะมิโนที่มีปริมาณ 1%wt ให้ผลของจำนวนรอบในการถอดแบบสูงที่สุด คาดว่าสารคู่ควบไซเลนในกลุ่มอะมิโนช่วยให้ PDMS และ PMHS ที่เกิดการเชื่อมโยงกันสามารถยึดเกาะกับพื้นผิวของชิ้นงานยางที่ทำการเคลือบได้ดีขึ้น โดยเป็นผลมาจากการใช้สารคู่ควบไซเลนในกลุ่มอะมิโน [58] ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ชนิดของสารคู่ควบไซเลนที่ปริมาณ 1% และ 2%wt ที่มีผลต่อความสามารถในการถอดแบบ

หลังจากการทดสอบการถอดแบบแล้ว จึงได้ทำการวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบ เพื่อดูปริมาณของฟิล์มสารถอดแบบที่เหลืออยู่บนชิ้นงานยางเมื่อทำการถอดแบบต่อเนื่องจนถึงครั้งแรกที่ชิ้นงานยางเกิดการติดกันโดยใช้โปรแกรม ImageJ®

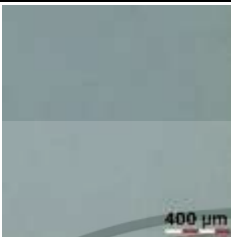
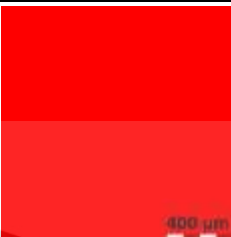



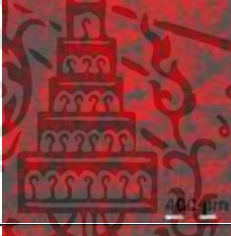
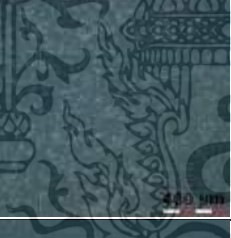

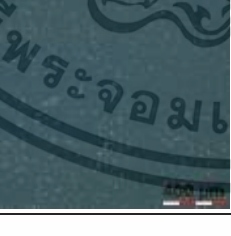
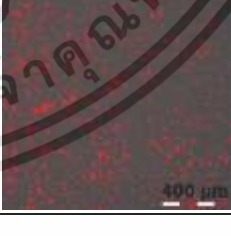
สำหรับฟิล์มสารถอดแบบสูตร 5DM4MH1Asi ก่อนเริ่มทำการทดสอบ พบว่าฟิล์มสารถอดแบบมีการเคลือบบนพื้นผิวของชิ้นงานอย่างครอบคลุมทั่วทั้งชิ้นงานยาง โดยสามารถวิเคราะห์พื้นที่ฟิล์มสารถอดแบบได้เท่ากับ 99.79% แสดงดังตารางที่ 4.3

จากการวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบพบว่า สารถอดแบบสูตร 5DM4MH1Asi มีประสิทธิภาพในการต้านทานต่อการยึดติด และการหล่อลื่น เพื่อไม่ให้ชิ้นงานยางทั้งสองที่อยู่ภายใต้ความดัน และอุณหภูมิเดียวกันเกิดการติดกัน โดยสามารถถอดแบบได้จำนวน 70 รอบ และได้ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบที่เหลืออยู่บนพื้นผิวชิ้นงานยาง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อจำนวนรอบของการถอดแบบ โดยมีชิ้นงานยางก่อนนำไปทำการทดสอบ และชิ้นงานยางหลังการทดสอบการถอดแบบในรอบที่ 7, 14, 35 และ 70 ตามลำดับ จากนั้นใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในการวิเคราะห์พื้นที่ฟิล์มสารถอดแบบที่เหลืออยู่บนชิ้นงานยางแบบผ่านโปรแกรม ImageJ® พบว่า พื้นที่ฟิล์มของสารถอดแบบในรอบที่ 7, 14, 35 และ 70 มีพื้นที่ฟิล์มสารถอดแบบอยู่บนชิ้นงานยางเท่ากับ 68.76, 34.64, 23.16 และ 8.80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบที่เหลืออยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานยางในการถอดแบบรอบที่ 35 สำหรับสารถอดแบบที่มีชนิดของสารคู่ควบไซเลนแตกต่างกัน พบว่าสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนมีพื้นที่ของฟิล์มเท่ากับ 23.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าสารคู่ควบไซเลนชนิดอีพอกซี และเมทาคริลิก โดยมีพื้นที่ของฟิล์มสารถอดแบบเท่ากับ 19.74 และ 16.66 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4


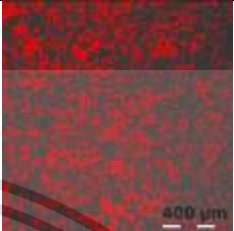
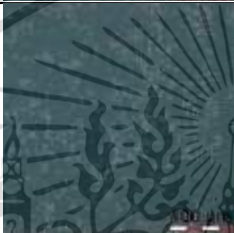

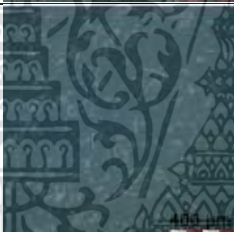

ในระหว่างการทดสอบการขึ้นรูปมีการหลุดลอกออกไปของฟิล์มสารถอดแบบในระหว่างกระบวนการทดสอบการถอดแบบ รวมถึงปัจจัยที่มาจากองค์ประกอบของสารถอดแบบ และพื้นผิวหน้าสัมผัสของยางที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถอดแบบลดลง

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบสูตร 5DM4MH1Asi

จำนวนรอบ การลดแบบ	ลักษณะฟิล์มสารลดแบบจาก ภาพถ่าย	ฟิล์มสารลดแบบ เมื่อแยกพื้นหลังออก ด้วยโปรแกรม ImageJ®	พื้นที่ฟิล์ม (%)
ก่อนทำการ ลดแบบ			99.79
รอบที่ 7			68.76
รอบที่ 14			34.64
รอบที่ 35			23.16
รอบที่ 70			8.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบเมื่อมีสารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน โดยศึกษาในรอบที่ 35 ของการทดสอบการลดแบบ

สารลดแบบ	ลักษณะฟิล์มสารลดแบบ แม่พิมพ์จากภาพถ่าย	ฟิล์มสารลดแบบเมื่อแยกพื้น หลังออกด้วยโปรแกรม ImageJ®	พื้นที่ฟิล์ม (%)
5DM4MH1Aσι			23.16
5DM4MH1Eσι			19.74
5DM4MH1Mσι			16.66

ดังนั้นชนิดของสารคู่ควบไซเลนมีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำยาสารลดแบบเมื่อเคลือบลงบนชิ้นงานยางโดยน้ำยาสารลดแบบสูตร 5DM4MH1Aσι ที่มีสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์พบว่า มีความทนทานของฟิล์มสารลดแบบมากที่สุดเท่ากับ 105.5 เมตร และทำการยืนยันผลด้วยการขึ้นรูปร่างกรีนไทร์ได้จำนวนรอบในการขึ้นรูปสูงที่สุดเท่ากับ 70 รอบ นอกจากนี้ได้นำชิ้นงานยางหลังการขึ้นรูปแล้วมาวิเคราะห์พื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบที่เหลืออยู่พบว่าชิ้นงานยางที่เคลือบสารลดแบบสูตร 5DM4MH1Aσι มีพื้นที่ของฟิล์มสารลดแบบมากที่สุด โดยเป็นผลมาจากการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน

4.3 การศึกษาผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน

การทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์จากการเตรียมฟิล์มสารถอดแบบที่มีองค์ประกอบคือ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน ตัวเร่งปฏิกิริยา พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซนที่ปริมาณ 4%wt และสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน ซึ่งเป็นสารถอดแบบที่ได้จากผลของการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2

สำหรับการศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีผลต่อฟิล์มสารถอดแบบ โดยทำการศึกษาที่ปริมาณ 0–3%wt จากนั้นทำการอบฟิล์มสารถอดแบบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบ และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบ ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ เพื่อวิเคราะห์ผลจากเครื่องไทรโบมิเตอร์ในขณะที่ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยางโดยมีการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ

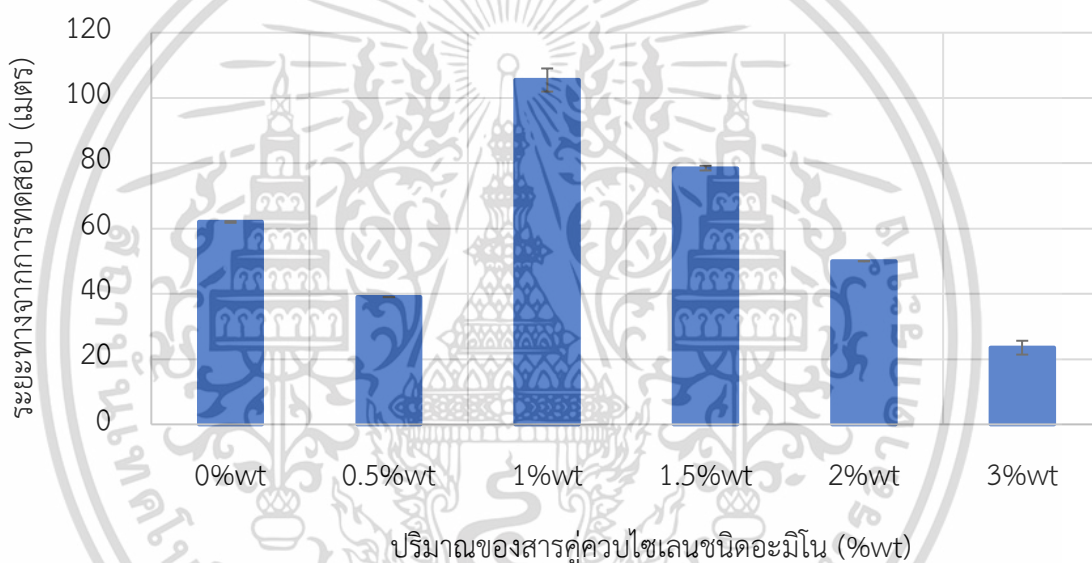
การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ของฟิล์มสารถอดแบบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางเมื่อไม่มีการเคลือบด้วยสารถอดแบบมีค่าเท่ากับ 1.05 ถือว่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง โดยผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบที่มีปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.25–0.30 ซึ่งเป็นผลมาจากการมีองค์ประกอบหลักในสารถอดแบบเป็นสารชนิดเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางที่มีปริมาณของสารคู่ควบไซเลนปริมาณของอะมิโนต่างกัน เมื่อทำการเคลือบฟิล์มสารถอดแบบ

สารถอดแบบ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
ODM (ไม่มีสารถอดแบบ)	1.05±0.01
5DM4MH (ไม่มีสารคู่ควบไซเลน)	0.30±0.02
5DM4MH0.5Asi (0.5%Asi)	0.24±0.02
5DM4MH1Asi (1%Asi)	0.25±0.01
5DM4MH1.5Asi (1.5%Asi)	0.25±0.01
5DM4MH2Asi (2%Asi)	0.24±0.02
5DM4MH3Asi (3%Asi)	0.25±0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบฟิล์มสารถอดแบบที่มีปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่ต่างกันมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานไม่แตกต่างกัน แต่ในการทดสอบความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบเมื่อสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนมีปริมาณ 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% และ 3%wt มีระยะทางในการทดสอบโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่เท่ากับ 62, 39, 105.5, 78.5, 50 และ 23.5 เมตรตามลำดับ พบว่าปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่ให้ผลของค่าความทนทานของฟิล์มสูงที่สุดเท่ากับ 1%wt แต่เมื่อปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนมากกว่า 1%wt สารคู่ควบไซเลนที่มากเกินไปจึงทำปฏิกิริยาได้ค่อนข้างไว และเกิดเป็นอีกหนึ่งชั้นบนฟิล์มสารถอดแบบ และทำให้ฟิล์มสารถอดแบบเกิดการเชื่อมโยงได้ไม่ดีพอบนพื้นผิวของชิ้นงานยาง [58] ผลการทดสอบความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบแสดงดังรูปที่ 4.13

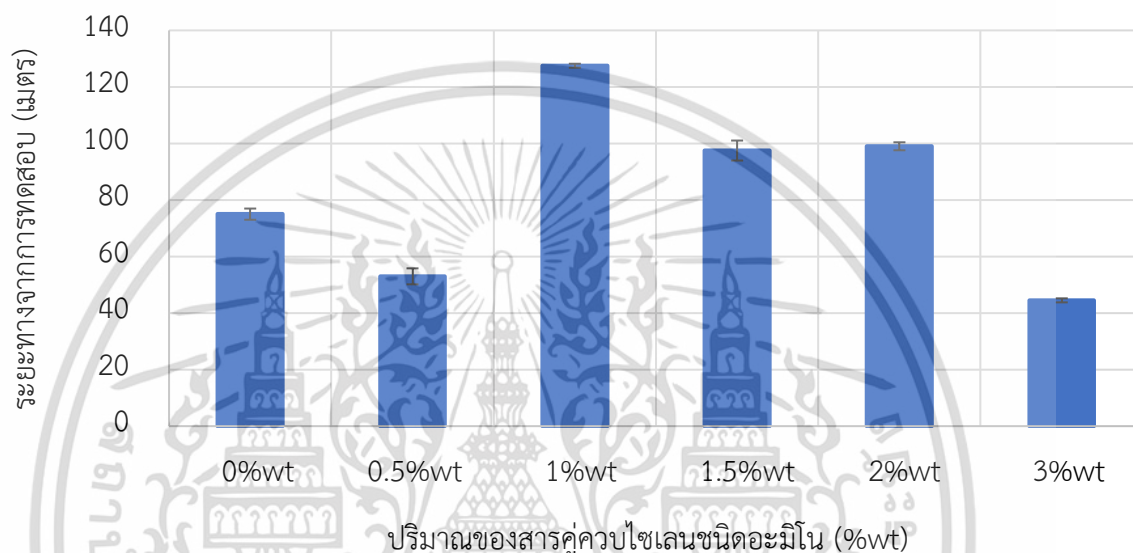


รูปที่ 4.13 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีผลต่อค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบ แสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

นอกจากนี้ในการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ได้มีการนำชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบแล้วไปทำการทดสอบการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป จนถึงรอบแรกที่ชิ้นงานยางเกิดการติดกัน จึงนำชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารถอดแบบ ซึ่งเป็นชิ้นงานยางที่เป็นตัวแทนของถุงลมยางมาทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้ จึงใช้ค่านี้มาเป็นเกณฑ์ในการประเมินผลหาแนวโน้มความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบ โดยวิเคราะห์จากระยะทางในการทดสอบ พบว่าปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อชิ้นงานยางเกิดการติดกัน โดยเมื่อปริมาณของสารคู่ควบไซเลนเท่ากับ 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% และ 3%wt ฟิล์มสารถอดแบบมีระยะทางในการทดสอบเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

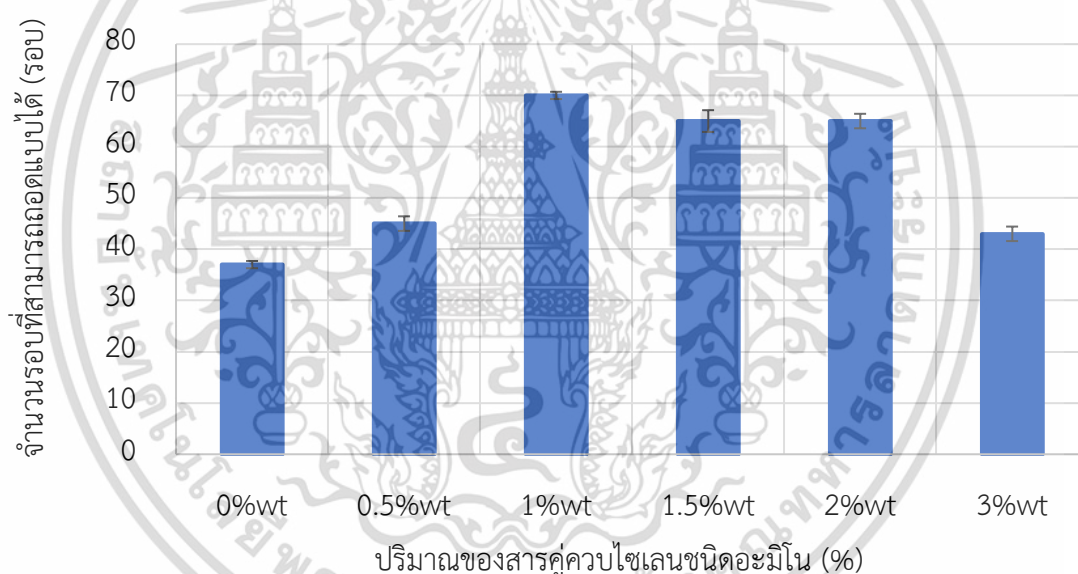
75, 53, 127.5, 97.5, 99 และ 44.5 เมตรตามลำดับ ดังนั้นปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่เหมาะสมคือปริมาณ 1%wt จากผลการทดสอบ และเมื่อปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนมากกว่า 1%wt ฟิล์มสารถอดแบบเกิดเป็นอีกหนึ่งชั้นบนฟิล์มสารถอดแบบ ทำให้การยึดเกาะบนพื้นผิวของชิ้นงานยางลดลง [54] ส่งผลให้ระยะทางจากการทดสอบที่ได้เมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ซึ่งเป็นค่าที่ชิ้นงานยางเกิดการติดกันมีแนวโน้มที่ลดลง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

นอกจากนี้ระยะทางในการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ทำให้ประเมินผลด้านความสามารถในการติดกันของยางได้ จึงทำการยืนยันผลการทดสอบด้วยการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยทำการตรวจสอบทั้งชิ้นงานยางจากยางวัลคาไนซ์ที่เป็นตัวแทนถุงลมยาง และกรีนไทร์ที่เป็นยางคอมพาวด์ซึ่งเป็นตัวแทนของชิ้นส่วนยางรถยนต์หลังจากแยกชิ้นงานออกจากกัน โดยกำหนดให้ทดสอบการถอดแบบผ่านเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ความดัน 2 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาทีต่อการถอดแบบ 1 รอบ จากนั้นทำซ้ำจนชิ้นงานยางเกิดการติดกัน หรือเกิดความเสียหายจึงหยุดการทดสอบ

จากการทดสอบการถอดแบบเมื่อมีปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนต่างกันมีผลต่อความสามารถในการถอดแบบของสารถอดแบบเมื่อเคลือบลงบนชิ้นงานยาง พบว่าปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่ 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2% และ 3%wt มีจำนวนรอบในการถอดแบบเท่ากับ 37, 45, 70, 65, 65 และ 43 รอบ จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่เหมาะสมเท่ากับ 1%wt และหากใส่ในปริมาณที่มากกว่า 1%wt ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถอดแบบลดลงอย่างมีนัยยะ เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนเกิดปฏิกิริยาได้ว่องไวขึ้น และมีชั้นของสารคู่ควบไซเลนหนาขึ้นจากปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งความหนาที่มากเกินไปนี้เกิดเป็นชั้นที่ถูกทำให้แยกออกจากกันได้ง่าย [67, 72] จึงทำให้ฟิล์มสารถอดแบบมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับพื้นผิวของชิ้นงานยางลดลงทำให้ฟิล์มเกิดการหลุดลอกออกได้ไปง่ายจากการทดสอบการถอดแบบในแต่ละครั้ง ส่งผลให้ความสามารถในการถอดแบบลดลงเป็นแนวโน้มเดียวกันเมื่อสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนมีปริมาณมากขึ้น ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่มีผลต่อความสามารถในการถอดแบบ

ดังนั้นปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนมีผลต่อประสิทธิภาพของน้ำยาสารถอดแบบเมื่อเคลือบลงบนชิ้นงานยาง โดยน้ำยาสารถอดแบบสูตร 5DM4MH1Asi ที่มีปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนเท่ากับ 1%wt เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์พบว่า มีค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบมากที่สุดเท่ากับ 105.5 เมตร และทำการยืนยันผลด้วยการขึ้นรูปยางกรีนไทร์ได้จำนวนรอบในการขึ้นรูปสูงที่สุดเท่ากับ 70 รอบ

4.4 การศึกษาผลของน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า

การทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบ โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์จากการเตรียมฟิล์มสารถอดแบบที่มีองค์ประกอบคือ พอลิโดเมทิลไซลอกเซน ตัวเร่งปฏิกิริยา พอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซนที่ปริมาณ 4%wt และสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโนที่ปริมาณ 1%wt ซึ่งเป็นสารถอดแบบที่ได้จากผลของการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 โดยทำการเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า คือ KLO-200P (Wax-based) และ BCI-024N-250A (Silicone-based) โดยทำการอบฟิล์มสารถอดแบบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วทำการทดสอบประสิทธิภาพของสารถอดแบบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบ และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่เพื่อวิเคราะห์ผลจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ในขณะที่ลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยางโดยมีการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ

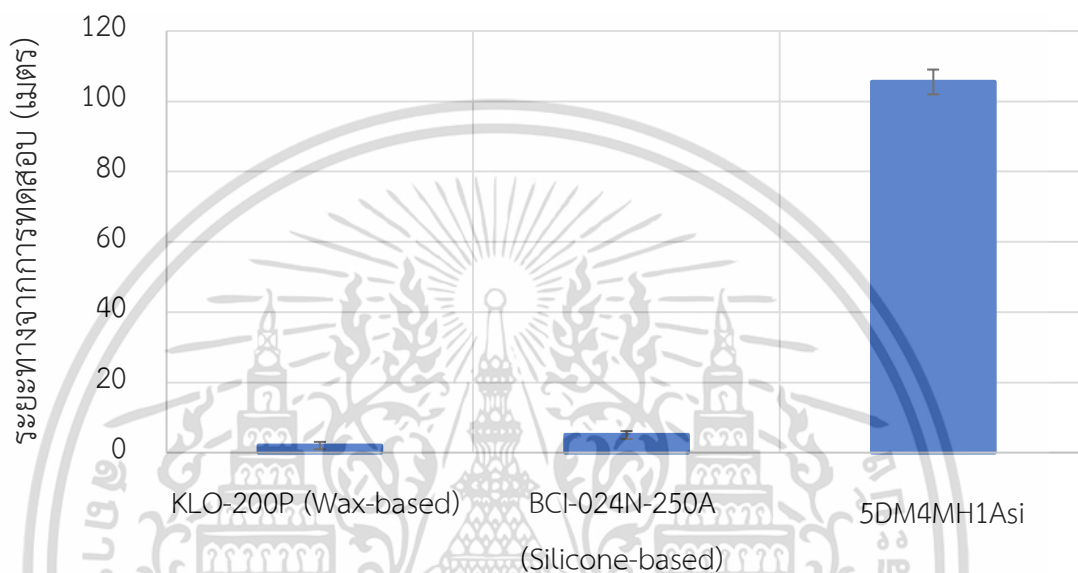
จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ของฟิล์มสารถอดแบบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางเมื่อไม่มีการเคลื่อนที่ด้วยสารถอดแบบมีค่าเท่ากับ 1.05 ถือว่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานยางที่มีการเคลื่อนที่ด้วยสารถอดแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง โดยผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารถอดแบบที่ทำการพัฒนา (5DM4MH1Asi) และน้ำยาสารถอดแบบ BCI-024N-250A (Silicone-based) ทางการค้าของบริษัทอยู่ในช่วง 0.22–0.25 ซึ่งเป็นผลมาจากการมีองค์ประกอบหลักในสารถอดแบบเป็นซิลิโคนเหมือนกัน โดยแตกต่างกับน้ำยาสารถอดแบบ KLO-200P (Wax-based) ทางการค้าของบริษัทที่มีค่าเท่ากับ 0.12 ซึ่งมีองค์ประกอบหลักในสารถอดแบบเป็นแว็กซ์ (Wax) ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นงานยางเมื่อทำการเคลื่อนที่ฟิล์มสารถอดแบบ โดยเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า

สารถอดแบบ	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
ไม่มีสารถอดแบบ	1.05±0.01
5DM4MH1Asi	0.25±0.01
KLO-200P (Wax-based)	0.12±0.02
BCI-024N-250A (Silicone-based)	0.22±0.02

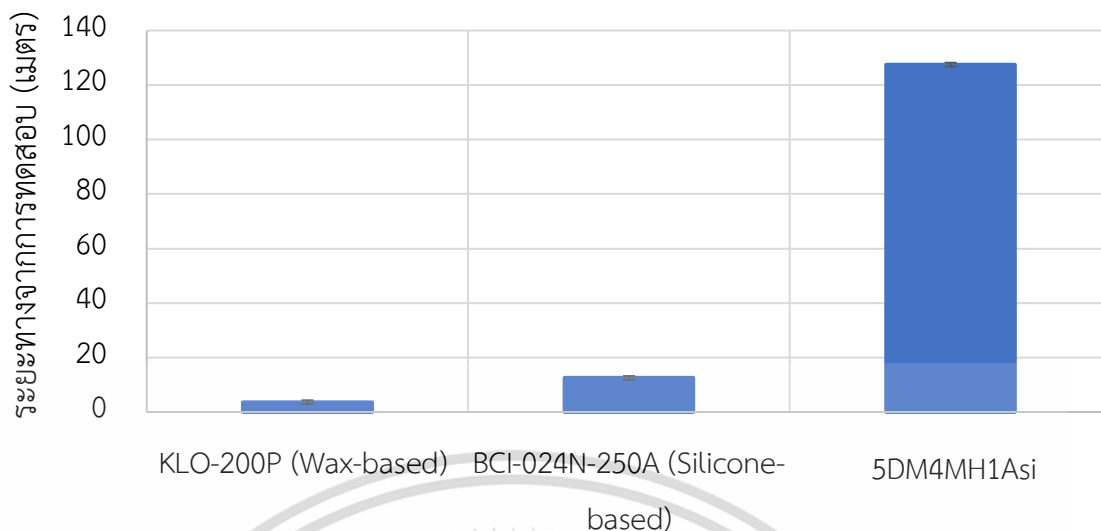
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทดสอบความทนทานของฟิล์มสารลดแบบพบว่า น้ำยาสารลดแบบที่ทำการพัฒนาขึ้น (5DM4MH1Asi) มีระยะทางในการทดสอบโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่เท่ากับ 105.5 เมตร โดยมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยาสารลดแบบ KLO-200P (Wax-based) และ BCI-024N-250A (Silicone-based) ทางการค้า มีระยะทางในการทดสอบโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่เท่ากับ 2 และ 5 เมตร ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบน้ำยาสารลดแบบที่มีผลต่อค่าความทนทานของฟิล์มสารลดแบบ แสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไทรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

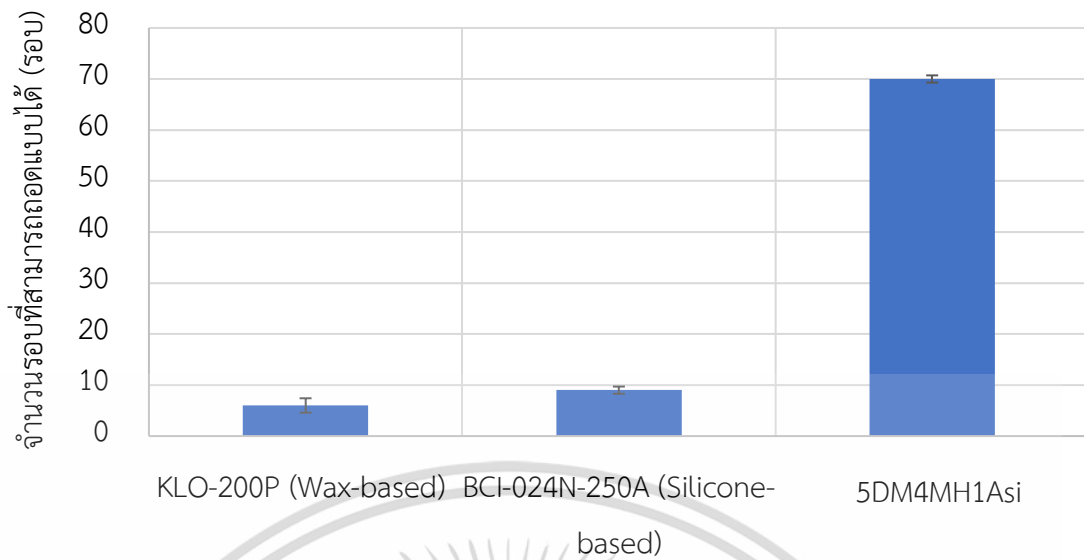
นอกจากนี้ในการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ได้มีการนำชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารลดแบบแล้วไปทำการทดสอบการลดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป จนถึงรอบแรกที่ชิ้นงานเกิดการติดกัน จึงนำชิ้นงานยางที่มีการเคลือบสารลดแบบ ซึ่งเป็นชิ้นงานที่เป็นตัวแทนของถุงลมยาง มาทำการทดสอบด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้ จึงใช้ค่านี้มาเป็นเกณฑ์ในการประเมินผลหาแนวโน้มความทนทานของฟิล์มสารลดแบบ โดยวิเคราะห์จากระยะทางในการทดสอบ พบว่าน้ำยาสารลดแบบที่ทำการพัฒนาขึ้น (5DM4MH1Asi) มีระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 127.5 เมตร โดยมีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยาสารลดแบบ KLO-200P (Wax-based) และ BCI-024N-250A (Silicone-based) ทางการค้า ของบริษัท มีระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 3.6 และ 12.5 เมตร ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบน้ำยาสารบัดกรีแบบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเมื่อเท่ากับ 0.573 ± 0.02 แสดงผลในรูปของระยะทางที่หัวกดไตรโบมิเตอร์เคลื่อนที่

นอกจากระยะทางในการทดสอบเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเท่ากับ 0.573 ± 0.02 ทำให้ประเมินผลด้านความสามารถในการติดกันของยางได้ จึงทำการยืนยันผลการทดสอบด้วยการถอดแบบด้วยเครื่องกดอัดขึ้นร้อนเพื่อหาประสิทธิภาพของสารบัดกรี โดยทำการตรวจสอบทั้งชิ้นงานยางจากยางวัลคาไนซ์ที่เป็นตัวแทนถุงลมยาง และกรีนไทร์ที่เป็นยางคอมพาวด์ซึ่งเป็นตัวแทนของชิ้นส่วนยางรถยนต์หลังจากแยกชิ้นงานออกจากกัน โดยกำหนดให้ทดสอบการถอดแบบผ่านเครื่องกดอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ความดัน 2 เมกะปาสกาล อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ต่อการถอดแบบ 1 รอบ จากนั้นทำซ้ำจนชิ้นงานยางเกิดการติดกัน หรือเกิดความเสียหายจึงหยุดการทดสอบ

จากการทดสอบการถอดแบบของน้ำยาสารบัดกรีแบบที่ทำการพัฒนาขึ้น (5DM4MH1Asi) โดยเปรียบเทียบกับน้ำยาสารบัดกรีทางการค้า คือ KLO-200P (Wax-based) และ BCI-024N-250A (Silicone-based) พบว่ามีจำนวนรอบในการถอดแบบเท่ากับ 70, 6 และ 9 รอบ ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบน้ำยาสารถอดแบบที่มีผลต่อความสามารถในการถอดแบบ

ดังนั้นน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ (สูตร 5DM4MH1Asi) มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า (KLO-200P และ BCI-024N-250A) เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์พบว่า มีความความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบมากที่สุดเท่ากับ 105.5 เมตร และทำการยืนยันผลด้วยการขึ้นรูปอย่างกรีนไทรีได้จำนวนรอบในการขึ้นรูปสูงที่สุดเท่ากับ 70 รอบ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาสารลดแรงเสียดทานแบบถาวร (Semi-permanent bladder release agents) โดยเน้นศึกษาผลของปริมาณของ PMHS ผลของชนิด และปริมาณที่เหมาะสมของสารคู่ควบไซเลนที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ความทนทานของฟิล์มสารลดแรงเสียดทานแบบถาวร และจำนวนรอบในการลดแรงเสียดทาน รวมถึงการทดสอบเปรียบเทียบกับน้ำยาสารลดแรงเสียดทานแบบถาวรทางการค้า สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) จากการศึกษาการประยุกต์ใช้เครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) พบว่าวิธีการทดสอบนี้สามารถให้ผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และแนวโน้มของความทนทานของฟิล์มสารลดแรงเสียดทานแบบถาวรจากระยะเวลาที่เคลื่อนที่ไปของหัวกดในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานคงที่ ซึ่งวิธีการทดสอบในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของประสิทธิภาพของน้ำยาสารลดแรงเสียดทานแบบถาวร จึงมีความเหมาะสมในการใช้สำหรับการประเมินผลเบื้องต้น

2) การศึกษาผลของพอลิเมทิลไฮโดรเจนไซลอกเซน (PMHS) พบว่าปริมาณที่ 0-6%wt ของ PMHS ส่งผลให้ฟิล์มสารลดแรงเสียดทานมีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง และมีแนวโน้มของความทนทานสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง PDMS กับ PMHS โดยที่ปริมาณของ PMHS ที่เหมาะสมเท่ากับ 4%wt เนื่องจากมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของหัวกดมากที่สุดเท่ากับ 62 เมตร ซึ่งบ่งบอกถึงความทนทานของฟิล์ม แต่หากมีปริมาณของ PMHS มากเกินไป อาจส่งผลให้ฟิล์มแข็งแต่เปราะ จึงทำให้ประสิทธิภาพของฟิล์มในด้านความทนทานลดลง

3) การศึกษาผลของชนิดสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) พบว่าความแตกต่างของชนิดของสารคู่ควบไซเลนไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน แต่ส่งผลให้ฟิล์มสารลดแรงเสียดทานมีการยึดเกาะที่ดีขึ้นเมื่อมีการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน (Amino silane coupling agent, Asi) โดยมีแนวโน้มของความทนทานของฟิล์มสารลดแรงเสียดทานแบบถาวร และจำนวนรอบของการขึ้นรูปของยางที่สูงขึ้น

4) การศึกษาผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนชนิดอะมิโน (Amino silane coupling agent, Asi) พบว่าปริมาณของ Asi ที่ 0-3%wt ไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน แต่ปริมาณของ Asi เท่ากับ 1%wt ส่งผลให้ฟิล์มสารลดแรงเสียดทานมีค่าความทนทานของฟิล์มสารลดแรงเสียดทานแบบถาวรโดยวัดจากระยะเวลาที่หัวกดมีการเคลื่อนที่ได้เท่ากับ 105.5 เมตร และมีการยึดเกาะของฟิล์มจากการขึ้นรูปขึ้นงานยางเท่ากับ 70 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การศึกษาผลของน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนา (5DM4MH1Asi) เปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า (KLO-200P และ BCI-024N-250A) ในปัจจุบัน พบว่าน้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ (5DM4MH1Asi) มีผลการทดสอบของค่าความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำยาสารถอดแบบทางการค้า (KLO-200P และ BCI-024N-250A) และมีผลของจำนวนรอบจากการขึ้นรูปขึ้นงานยางเท่ากับ เท่ากับ 6, 9 และ 70 รอบ ตามลำดับ ทำให้น้ำยาสารถอดแบบที่ทำการพัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยการศึกษา และพัฒนาน้ำยาสารถอดแบบสูตรกึ่งถาวร สำหรับอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ สามารถสรุปเป็นข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่น่าสนใจ และอาจเป็นแนวทางในการทำการศึกษาวจัยต่อไป ดังนี้

- 1) การศึกษาผลของการให้อุณหภูมิในขณะการทดสอบด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และความทนทานของฟิล์มสารถอดแบบ
- 2) การศึกษาผลของความหนาของฟิล์มสารถอดแบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการถอดแบบ ซึ่งอาจทำให้น้ำยาสารถอดแบบมีความทนทานที่สูงขึ้น และส่งผลต่อจำนวนรอบในการถอดแบบได้ยาวนานขึ้นต่อการพ่นน้ำยาหนึ่งครั้ง
- 3) ทำการศึกษาหาวิธีการทดสอบจากเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลของประสิทธิภาพของน้ำยาสารถอดแบบให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chaiwat Sowcharoensuk. 2562. **แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2562-2564: อุตสาหกรรมยางพารา**. [Online]. Available : <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Agriculture/Rubber/IO/io-rubber-20>.
- [2] Anonymous. 2562. **สองทิศทางยางพาราไทย ปี 62 รุ่ง หรือ ร่วง**. [Online]. Available : <https://rubberplasma.com>.
- [3] สถาบันพลาสติก. 2563. **เจาะลึกอุตสาหกรรมยางรถยนต์ของไทย**. กรุงเทพฯ : อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน.
- [4] Sri Veeramathi. 2557. **Rubber Curing Bladder**. [Online]. Available : <https://www.indiamart.com/proddetail/rubber-curing-bladder-21074307430.html>
- [5] สิทธิศักดิ์ ตะภา. 2559. **วิธีผลิตยางรถยนต์**. [Online]. Available : http://lnwkom1214.blogspot.com/2016/03/blog-post_20.html.
- [6] อัจจิมา วังเพ็ชร. 2543. “การศึกษาสภาวะในการบ่มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบลด์เดอร์ที่ผลิตจากยาง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] Showa Denko. 2564. **Crosslinking Agent for Improving Heat Resistance and Preventing Degradation of Rubber Products including Bladders**. [Online]. Available : <https://www.mc.showadenko.com/english/kaiketsu/solution/028/index.html>.
- [8] สิทธิพงศ์ มหารณบดี และคณะ. 2561. “**อิทธิพลของสารถดแบบแม่พิมพ์ที่มีต่อการยึดติดของวัสดุแม่พิมพ์**.” กรุงเทพฯ : โครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทยและสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. เอกสารอัดสำเนา.
- [9] ASTM G133-05 Committee on standard. 2016. **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**. PA: ASTM International, 2016.
- [10] Jie Gao et al. 2020. “Environment-Friendly and Two-Component Method for Fabrication of Highly Hydrophobic Wood Using Poly(methylhydrogen)siloxane” *Polymer 2021* : 1-13
- [11] Münch Chemie International GmbH. 2020. **Permanent coating for curing bladder (tire production)**. [Online]. Available : <https://www.muench-chemie.com/en/case-details/permanent-coating-for-curing-bladders-tire-production.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตการคัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] บริษัท โมนีต เอเชีย จำกัด. 2021. **น้ำยาถอดแบบ (Mold Release)**. [Online]. Available : <https://monet.asia/category/chemicals/chemicals/chemicals/moldreleaseagents/>
- [13] บริษัท ทินกร เคมีคอล แอนด์ ซัพพลาย จำกัด. 2021. **Release agent น้ำยาถอดแบบ แม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมรองเท้า และอุตสาหกรรมยานยนต์**. [Online]. Available : <https://www.tinnakorn.com/products/release-agent/>
- [14] บริษัทอีสเทิร์น โพรดิวซ์ แอนด์เซอร์วิส จำกัด. 2021. **น้ำยาถอดแบบสูตรน้ำ ถอดแบบ แม่พิมพ์ Hot press**. [Online]. Available : <https://eastern-produce.com>
- [15] Globalspec. 2018. **Mold Releases and Release Agents Information**. [Online]. Available:https://www.globalspec.com/learnmore/materials_chemicals_adhesive/industrial_oils_fluids/mold_releases_release_agents
- [16] WN Shaw. 2017. **Permanent and Non-Permanent Release Agents**. [Online]. Available : <https://wnshaw.com/permanent-and-non-permanent-release-agents>
- [17] The Physics of Adhesives. Available: http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Connor_Mattson/connor_mattson/physics.html, 25 December 2020.
- [18] National Precast Concrete Association. 2013. **Proper Application of Release Agents**. [Online]. Available : <http://precast.org/wp-content/uploads/2015/03/TechNote-Proper-Application-Form-Release.pdf>
- [19] Swift Supplies. 2021. **Mould Release Agent Spray**. . [Online]. Available : <https://swiftsupplies.com.au/weicon-mould-release-agent-spray-400ml>.
- [20] Supervac Industries. 2020. **Types of Release Agents**. [Online]. Available : <https://www.super-vacoils.com/types-of-release-agents/>
- [21] Ghanim trading LLC. 2018. **Mould Release Agent**. [Online]. Available : <https://www.slide-share.net/ghanimtrading/mould-release-agent-in-uae-ghanimtrading-fuchs-distributorsinuae>.
- [22] Leaf. 2004. **Male worker dipping mold in pulp and water**. [Online]. Available : <https://www.canstockphoto.com/male-worker-dipping-mold-in-pulp-and-36140944.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] รัชภรณ์ ระวังเหตุ. 2558. “ลักษณะจำเพาะของการเสื่อมอายุของยางซิลิโคนสำหรับลูกถ้วยฉนวนพอลิเมอร์ใช้ภายนอกอาคารภายใต้การทดสอบเร่งการเสื่อมอายุ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [24] จักรกฤษณ์ ยิ้มแฉ่ง. 2559. “การวิจัย และพัฒนาผลของอุณหภูมิต่ำที่เกี่ยวข้องต่อการเร่งการแข็งตัวของยางซิลิโคนเหลวชนิด RTV (Room Temperature Vulcanization).” งานวิจัยจากทุนสนับสนุนจากงบ ประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [25] D. J. Campbell. 1999. “Replication and Compression of Bulk Surface Structures with Polydimethylsiloxane Elastomer”. J. Chem. Educ. 76 , 537
- [26] Wayne Breslyn. 2013. **SiH4 Lewis Structure, Molecular Geometry, Hybridization, and Polarity.** [Online]. Available : <https://techiescientist.com/sih4-lewis-structure>.
- [27] วิทวัส วิมลทรง. 2554. “การศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติการนำความร้อนของวัสดุคอมพอสิตระหว่างผงซีลีเนียมกับพอลิคาร์บอนเนต” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [28] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. บุ๊คเน็ต
- [29] E.P.Plueddemann. 1994. **Silane Coupling Agents.** 2nd ed. Plenum. New York.
- [30] ShinEtsu. 2022. Silane coupling agent. Product Information.
- [31] Wacker. 2020. **Organofunctional Silanes.** Technical Data Sheet.
- [32] San nopco limited. 2018. Wetting Agents. [Online]. Available : <https://www.sannopco.co.jp/eng/products/function/function4.php>.
- [33] W. Smitthipong, "Effect of bulk and surface properties on adhesion of rubbers," Kasetart Journal (Natural Sciences) (Thailand), 2008, 42, 318-324,
- [34] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2556. **ชนิดของยาง และการใช้งาน.** กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และศูนย์วิจัยเทคโนโลยียาง.
- [35] Sang Ho Lee et al. 2003. “Synthesis and Characterization of a New Photoconducting Poly(siloxane) Having Pendant Diphenylhydrazone for Photorefractive Applications”. Macromolecular Research, Vol. 11, No. 6, 431-436.
- [36] Masashi, Y., Yoshio, N., Minoru, I. and Masayuki, Y., "Bladder for Tire Production" U.S.Patent : 2009/0081323 A1. Mar. 26, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] Daniel, F. G. and William, L. H., "Rubber Curing Bladders Having Self Release or Low Adhesion to Curing or Cured Hydrocarbon Rubbers" U.S. Patent : 5,527,170. Jun. 18, 1996.
- [38] L. W. McKeen, "Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers", Elsevier Science, 2016.
- [39] K. Holmberg and A. Matthews, "Coatings Tribology "Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering", Elsevier Science, 2009.
- [40] Naichangmashare. 2020. **ทฤษฎีไตรโบโลยี (Tribology)–สำหรับการเสียดทานหล่อลื่น และการสึกหรอในเครื่องจักรกล.** [Online]. Available : <https://naichangmashare.com/2020/08/15/tribology-machinery-basic>.
- [41] Steve Bowditch. 2022. **How to Gain Pump Efficiency with Restoration & Protective Coatings.** [Online]. Available : <https://blog.chesterton.com/wear-protection/industrial-coatings/gaining-pump-efficiency-restoration-protectivecoatings>.
- [42] T. Mang and W. Dresel, "Lubricants and lubrication"., Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007.
- [43] สุรพล ราชภูร์นุ้ย, "วิศวกรรมการหล่อลื่นเบื้องต้น: Introduction to lubrication engineering", กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2549.
- [44] Anonymous. 2564. **วัสดุ เครื่องมือ และวิธีการวิจัย.** [Online]. Available : <http://kb.psu.ac.th:8080/psukb/bitstream/2553/4013/5/ch3.pdf>.
- [45] Netinbag. 2021. **การอัดขึ้นรูปคืออะไร.** [Online]. Available : <https://www.Netinbag.com/th/manufacturing/what-is-compression-molding.html>.
- [46] Mindiamart. 2021. **Compression Moulding Machine.** [Online]. Available : <https://www.indiamart.com/proddetail/compressionmouldingmachine21780581055.html>
- [47] ผศ.ดร.คณศ วงษ์ระวี. 2560. **คู่มือการใช้งานกล้องจุลทรรศน์สมาร์ทโฟนเพื่อการอนุรักษ์.** ชลบุรี : หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [48] Bridgestone. 2020. **Manufacturing process.** [Online]. Available : https://www.bridgestone.com/products/speciality_tires/aircraft/products/process/index.html.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [49] Yoshinori Inokuchi. **Release agent for tire bladder, tire bladder, and molding of pneumatic tire.** Japan. Patent no. EP 3 260 262 B1. Jul. 8, 2019.
- [50] Oliver and H. Brian. **Treated tire curing bladders and method for curing tires.** U.S. patent no. 0 385 919 B1. Jan. 26, 1994.
- [51] Patitsas et al. **Tire cure bladder composition with alkylphenoxypoly (alkyleneoxy) alkanol.** U.S. patent no. 6015525. Jan. 18, 2000.
- [52] Köhler et al. **Process for molding and vulcanizing tires and other rubber articles.** U.S. patent no. 4863650. Sep. 5, 1989.
- [53] Strobridge et al. **Release composition and related method of use.** U.S. patent no. 2003/0055196 A1. Mar. 20, 2003.
- [54] Takao. **Anti-tack agent for unvulcanized rubber and aqueous dispersion of anti-tack agent for unvulcanized rubber.** U.S. patent no. 2019/0016872 A1. Jan. 17, 2019.
- [55] Martin. **Silicone release agent.** U.S. patent no. 3883628. May. 13, 1975.
- [56] H. Shusaku. **Pneumatic tire having flexible protective release layer.** Japan. Patent no. EP 2 022 647 B1. Apr. 11, 2012.
- [57] John M. Allardice et al. **Method and composition for air bladder release during tire production.** U.S. patent no. 4547544. Oct. 15, 1985.
- [58] Edwin p. Plueddemann. 1983. "Silane adhesion promoters in coatings". Progress in Organic Coatings, 297-308.
- [59] Horiuchi et al. **Mold release agent.** U.S. patent no. 4118235. Oct. 3, 1978.
- [60] Gishar Gerard et al. **Method for producing polysiloxane-based lubricant composition that does not generate hydrogen.** Japan. Patent no. JP4313047B2. May. 23, 2001.
- [61] Michael J. Hoffman et al. **Silicone containing emulsions as bladder lubricants.** Patent no. AU595754B2. Feb. 1, 1990.
- [62] Xing Yang et al. 2019. "Application of CH₄/N₂ separation based on poly(styrene-b-isoprene-b-styrene)(SIS)-poly(dimethylsiloxane-co-methylhydrosiloxane)(PDM-S-co-PMHS) crosslinked membrane." Reactive and Functional Polymers.

- [63] Leah M et al. 2013. “Elastomeric microparticles for acoustic mediated bioseparations”. *Journal of Nanobiotechnology*, 1 - 8.
- [64] Samia Hamouni et al. 2019. “Alcohol and Alkane Organic Extraction Using Pervaporation Process”. *Macromolecular Symposia*, 386, 1 – 8.
- [65] V F Arini et al. 2021. “Synthesis of low viscosity of polymethylhydrosiloxane using monomer of dichloromethylsilane”. *Journal of Physics: Conference Series*, 2165, 1-6.
- [66] Girma Biresaw et al. 2008. “Frictional Properties of Organosilane Monolayers and High-Density Polymer Brushes”. *Surfactants in tribology*. CRC Press : 100-102.
- [67] Sunil padhiyar et al. 2013. “Effect of silanes as crosslinking agent with the NBR rubber”. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* Vol.2, 5.
- [68] ShinEtsu. 2020. **Silane Coupling agents**. [Online]. Available : <http://www.shinet-susilicone-global.com/catalog/pdf/SilaneCouplingAgents>
- [69] F. Vilaplana et al. 2004. “Swelling Behavior of PDMS–PMHS Pervaporation Membranes in Ethyl Acetate–Water Mixtures”. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 93, 1384 –1393.
- [70] Ghanshyam L. et al. 2017. “Preparation of bifunctional poly(dimethylsiloxane) membrane by dual X-linking”. *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 4893–4903.
- [71] PCC GROUP. 2017. Silane Coupling Agents. [Online]. Available : https://www.sisib.com/effects/silane_coupling_agents/silane_coupling_agents_introduction.html
- [72] Chutima Sukrapaporn et al. 2017. “Effect of Silane Coupling Agent in Universal Adhesive Agent on Shear Bond Strength between Resin Composite and Lithium Disilicate”. *CM Dent J*, 38, 111-126.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณการใช้สารเคมีตามสูตรที่กำหนดไว้ดังตารางในหัวข้อ 3.2 เมื่อมีปริมาณ
 สุกของเนื้อสารไม่เท่ากับ 100%

ตัวอย่างการคำนวณการใช้ PDMS ที่มีปริมาณของเนื้อสารสุก เท่ากับ 90.91%

ปริมาณสุกของเนื้อสารที่ต้องการ = 5%

สำหรับ PDMS มีปริมาณเนื้อสารสุก = 90.91

ปริมาณของ PDMS ที่ใช้ เพื่อให้ได้เนื้อสารสุกตามที่กำหนดในตาราง

$$= \frac{5 \times 100}{90.91}$$

$$= 5.50$$

ดังนั้น ต้องใช้ปริมาณของ PDMS เท่ากับ 5.50% เพื่อให้ได้มีเนื้อสารสุกของ PDMS เท่ากับ 5%
 ตามที่กำหนด

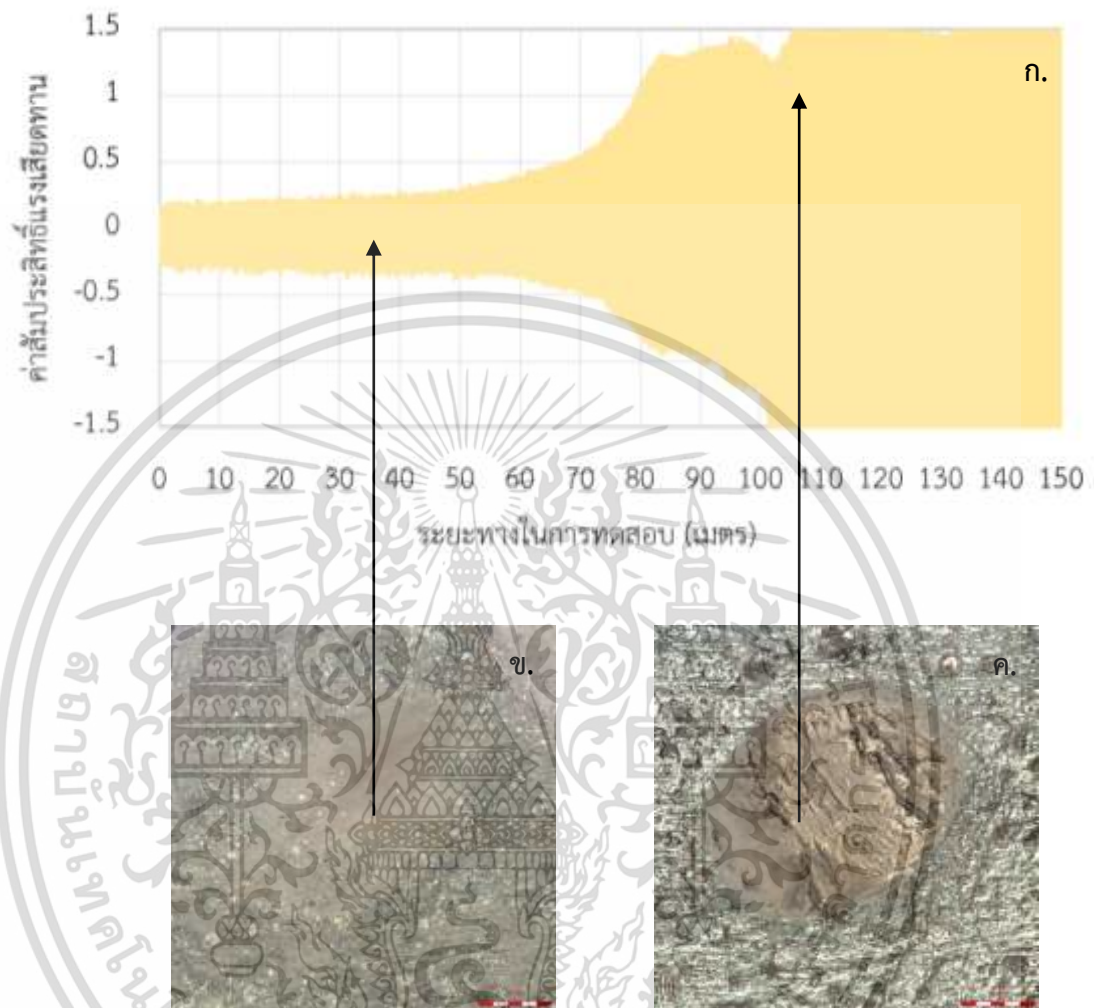
ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณน้ำหนักของน้ำยาสารลดแรงตึงผิวที่พ่นลงชิ้นงานยาง (5DM4MH) เพื่อให้ฟิล์มสารลดแรงตึงผิวมีความหนา 12-14 ไมครอน

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ของชิ้นงานยางที่ต้องการพ่น} &= 2.5 \text{ เซนติเมตร} \times 15 \text{ เซนติเมตร} \\
 &= 37.5 \text{ ตารางเซนติเมตร} \\
 \text{ความหนาที่ต้องการ} &= 12-14 \text{ ไมครอน} \\
 \text{ปริมาณเนื้อสารของน้ำยาสารลดแรงตึงผิว (%ของแข็ง)} &= 9.10\% \\
 \text{ความหนาแน่นของฟิล์มสารลดแรงตึงผิว} &= 1 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \\
 \text{ปริมาณของเนื้อสารสุทธิที่ต้องอยู่บนชิ้นงานยาง (น้ำหนักของฟิล์มสารลดแรงตึงผิว)} &= \text{พื้นที่ของชิ้นงานยาง} \times \text{ความหนา} \\
 &= (37.5 \times 12 \times 10^{-4} \times 1) \\
 &= 0.045 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำหนักของน้ำยาสารลดแรงตึงผิวที่พ่นลงชิ้นงานยาง} &= \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มสารลดแรงตึงผิว} \times 100}{\text{ปริมาณเนื้อสารของน้ำยาสารลดแรงตึงผิว}} \\
 &= \frac{0.045 \times 100}{9.10} \\
 &= 0.495 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

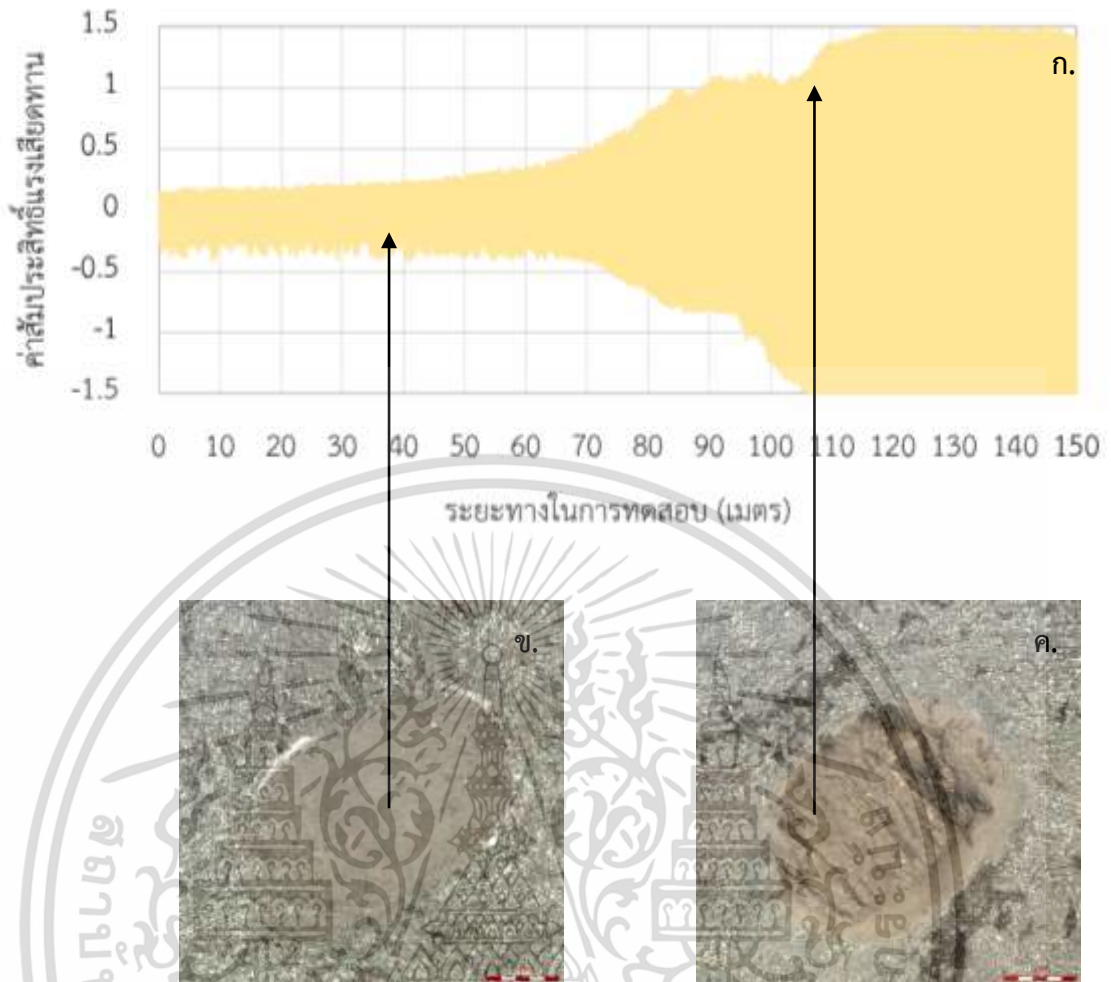
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค



รูปที่ ค.1 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ (ข) फिल्मสารถอดแบบที่ได้จากกล้อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ (ค) फिल्मของสารถอดแบบเมื่อลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 (ก) ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากเครื่องไตรโบมิเตอร์ (ข) फिल्मสารกอดแบบที่ได้จากกล่อง OM ในช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์คงที่ (ค) फिल्मของสารกอดแบบเมื่อลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์สัมผัสกับชิ้นงานยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวนพวรรณ ตันบริภณท์
วัน เดือน ปีเกิด	31 มีนาคม พ.ศ. 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	39/1 หมู่ 5 ต. สวนหลวง อ. อัมพวา จ. สมุทรสงคราม 75110
ประวัติการศึกษา	2561 วิทยาศาสตร์บัณฑิตสาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรตเฉลี่ย 2.96 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2566 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ เกรตเฉลี่ย 3.75 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา (ทุนลดหย่อนค่าธรรมเนียมการศึกษาร้อยละ 50)
ผลงานทางวิชาการ	Tanboriphan, N. Teeraprawatekul, B. Mahathanabodee, S. and Jangchud I. 2022. "Study of bladder release agent formulas and methods to evaluate their efficiencies by using reciprocating tribometer." <i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i> . 1234 : 012005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้