



การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด
ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและไตรโบโลยี

A Study of Recycling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene
Affecting Mechanical and Tribological Properties

รัชพงศ์ กาบจันทร์
Ratchapong Kabjun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2566



การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด
ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและไตรโบโลยี

A Study of Recycling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene
Affecting Mechanical and Tribological Properties

รัชพงศ์ กาบจันทร์
Ratchapong Kabjun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ยืดผล ต่อสมบัติทางกลและไทรโบโลยี
ชื่อ นามสกุล	รัชพงศ์ กาบจันทร์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ประกอบ ขาติภักต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..........ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

..........กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐิภาณ ถิ่นพระบาท)

..........กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชิน)

..........กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี)

..........กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ประกอบ ขาติภักต์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

..........คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางไตรโบโลยี
ชื่อ นามสกุล	รัชพงศ์ กาบจันทร์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและไตรโบโลยี โดยนำผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ ที่ผลิตขึ้นในประเทศไทยเป็นวัสดุตั้งต้นในการศึกษาครั้งนี้ ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดได้รับการตรวจสอบขนาดอนุภาคและรูปลักษณ์สัญญาณ ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยแม่พิมพ์แบบปิด ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการศึกษา การให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ ถูกทำเพื่อศึกษาสมบัติทางกลและไตรโบโลยี ภายใต้ความดันปิดแม่พิมพ์ 5 MPa อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ 140°C นาน 180 นาที มีการใช้กระบวนการหล่อเย็นผ่านแท่น หล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิหลังการอัดขึ้นรูปร้อน ผลการทดสอบพบว่า เมื่อนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผ่านการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ จะให้ค่าความเค้นคราก ค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดแตกหัก แรงกระแทก และจุดหลอมเหลวลดลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย มีค่าความหนาแน่นลดลง มีอัตราการสึกหรอสูงขึ้น จากการตรวจสอบพื้นผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวพบว่า มีร่องรอยของการขีดข่วนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นต้องเสริมอนุภาคเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ สมบัติทางกลและไตรโบโลยีให้กับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และต้องมีการทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางเคมี และไตรโบโลยีใหม่อีกครั้ง

คำสำคัญ : สมบัติทางกล, ไตรโบโลยี, พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด, การนำกลับมาใช้ใหม่

Thesis Title	A Study of Recycling of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Affecting Mechanical and Tribological Properties
Author	Ratchapong Kabjun
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major Program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2023

ABSTRACT

This research focused on studying the recycling of ultra-high molecular weight polyethylene affecting mechanical and tribological properties. Pure ultra-high molecular weight polyethylene powder produced in Thailand was used in this study as an initial material. The particle size and morphology of ultra-high molecular weight polyethylene powder were examined through hot extrusion process with a closed die which was an important process in the study. Three cycles of heating were performed to study mechanical and tribological properties under the closed die with the pressure of 5 MPa and the inside temperature at 140°C for 180 minutes. A cooling process using a cooling press was applied to reduce the temperature after the hot extrusion. The results showed that when the ultra-high molecular weight polyethylene was heated for 3 cycles, the Yield Stress, the Tensile Strength, the Elongation at Break, the impact and the melting point decreased. In addition, the coefficient of friction slightly increased, the density decreased, and the wear rate decreased. Based on the examination of the surface using a surface roughness tester revealed that there were no significant differences in scratch marks when compared to the wear surface of pure ultra-high molecular weight polyethylene. The study showed that there is a need to reinforce the particles to improve the efficiency of mechanical and tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene. Furthermore, mechanical, thermal, chemical and tribological properties shall be tested again.

Keywords : Mechanical Properties, Tribology, Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, Recycling

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเมตตากรุณา ช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากอาจารย์ ดร.ประกอบ ขาติภักต์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณามอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียน ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจรค ที่กรุณาเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ช่วยเตรียม วัสดุสำหรับการทดลอง และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ แจ็ค ชุ่มอินทร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และ อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.ณัฐชานันท์ อังสุเศรษฐี สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ให้ความอนุเคราะห์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ และ ร่วมทดสอบวิเคราะห์ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ คอยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จใน ด้านการศึกษา

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการ ทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากนักน้อยต่อไป

รัชพงศ์ กาบจันทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	5
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 กรอบการวิจัย	36
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	37
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	41
3.2 การดำเนินการเตรียมผงวัสดุ UHMWPE	46
3.3 การอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE	47
3.4 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล	48
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ XRD Pattern สำหรับ UHMWPE	56
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล	57

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	71
ภาคผนวก ก คำสมบัติเชิงกลของวัสดุ	72
ภาคผนวก ข ใบรับรองผลงานนำเสนอ	74
ภาคผนวก ค บทความตีพิมพ์เผยแพร่	78
บทความเรื่อง การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางความร้อน	79
บทความเรื่อง การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ที่ส่งผลต่อไตรโบโลยีและการสึกหรอ	86
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารเพิ่มความทนแรงกระแทกที่สำคัญทางการค้า	13
3.1 สมบัติของ UHMWPE U511	45
3.2 ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่าง ๆ	49
4.1 Mechanical properties of UHMWPE recycle	58
4.2 ค่าความแข็ง UHMWPE Pure Recycle 1,2,3	59
4.3 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจาก UHMWPE Pure Recycle 1,2,,3	61
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหนาแน่นของ UHMWPE Pure Recycle 1,2,3	62



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling)	3
2.1 a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา	8
2.2 แผนผังโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโมโนเมอร์และพอลิเอทิลีน	9
2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE	9
2.4 DSC กราฟของ UHMWPE	11
2.5 โครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE เกรด GUR 1020 ความหนา 100 μm จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	15
2.6 รูปแบบการสึกหรอของพอลิเมอร์; a) การสึกหรอแบบยึดติด b) การสึกหรอแบบขีดถู c) การสึกหรอแบบล้าตัว d) การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล	16
2.7 อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวหลังจากผ่านการลื่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ	19
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น	20
2.9 โครงสร้างผลึกของ PTFE และโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE	21
2.10 การสึกหรอและชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายโอนบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE	22
2.11 กลไกการถ่ายโอนพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่	23
2.12 การรีไซเคิลเชิงกล Mechanical recycling	25
2.13 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D	27
2.14 เครื่องทดสอบแรงดึง	27
2.15 เครื่องทดสอบแรงกระแทก	28
2.16 (a) Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว และ (b) วัสดุเปราะ	28
2.17 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod	30
2.18 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก	31
2.19 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 a) ไดอะแกรมเครื่องทดสอบการสึกหรอ b) ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ	32
2.21 a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ	33
2.22 เครื่องชั่งน้ำหนัก a) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224 สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ และ b) เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.1 g ยี่ห้อ AND รุ่น EK-1200i	33
2.23 เครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์ (Tribometer)	34
2.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Thermo Scientific กำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า	35
2.25 กรอบการวิจัย	36
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	46
3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมผงและการชั่งน้ำหนักผง UHMWPE ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg	46
3.3 เทผง UHMWPE ใส่ในภาตและนำไปเข้าตู้อบลมร้อน	46
3.4 ผง UHMWPE ที่ทำการอบแห้งแล้ว	47
3.5 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 80x100x50 mm	47
3.6 เครื่องอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบ	48
3.7 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D2240	49
3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D และลักษณะการทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D2240	50
3.9 เครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638	50
3.10 ค่าพิกัดของส่วนต่างๆของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638	51
3.11 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D638	51
3.12 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 เครื่องทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E 23	53
3.14 เครื่องชั่งน้ำหนัก Shimadzu digital รุ่น ATX224 ความละเอียด 0.1 mg (0.0001 g) สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ	54
3.15 ชุดอุปกรณ์บันทึกภาพรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ	54
3.16 ลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ	55
4.1 รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	56
4.2 XRD Pattern ของ UHMWPE ที่ใช้ในงานวิจัย	57
4.3 ค่า Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), เปรียบเทียบกับ UHMWPE Purec และ UHMWPE Pure Recycle 1,2,3	60
4.4 ค่า Elongation at Break (%), Modulus of elasticity (MPa), เปรียบเทียบกับ UHMWPE Purec และ UHMWPE Pure Recycle 1,2,3	60



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปี 2567-2569 มีการคาดว่าอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกจะเติบโตต่อเนื่อง โดยมีปัจจัยหนุนจากการฟื้นตัวอย่างค่อยเป็นค่อยไป ของเศรษฐกิจโลกและเศรษฐกิจไทย หนุนความต้องการใช้พลาสติกของอุตสาหกรรมปลายทาง อาทิ บรรจุภัณฑ์ ยานยนต์และชิ้นส่วน เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ก่อสร้างและเครื่องมือแพทย์ ประกอบกับภาครัฐมีนโยบายส่งเสริมการลงทุนในอุตสาหกรรม New S-Curve จึงมีส่วนหนุนอุตสาหกรรมพลาสติกที่อยู่ในห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) ของอุตสาหกรรมดังกล่าว ขณะที่หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงไทย ก็ได้มีการออกนโยบายลดการใช้พลาสติกที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งรวมถึงการห้ามใช้พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง และส่งเสริมการใช้พลาสติกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อลดการปล่อยคาร์บอน ซึ่งจะเพิ่มภาระต้นทุนแก่ผู้ประกอบการ [1]

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่ใช้กันมากในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำเอาพอลิเมอร์มาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องจักรกลมากขึ้น ซึ่งจะเป็นวัสดุทางเลือกที่ดีในอุตสาหกรรมยุคปัจจุบัน พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE เป็นอีกตัวที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรรมและด้านวิศวกรรมเครื่องกล เนื่องจากพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) และ UHMWPE ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแท่งหรือแผ่น Consolidate UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศและไม่มีการผลิตภายในประเทศ [2] พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) มีการใช้งานที่หลากหลายตั้งแต่การใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ จนถึงในทางการแพทย์ รวมไปถึงการใช้งานกับสายไฟและสายเคเบิลข้อดีของ UHMWPE ทนทาน ทนต่อความเครียดได้ดี และทนทานต่อการแตกร้าวสูง มีความต้านทานต่อการสึกหรอและการเสียดสี ทนต่อการเสียดสีได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนถึง 15 เท่า และ ทนทานต่อสารเคมีสูง [3] และเมื่อผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE หรือ UHMW) ถูกใช้อย่างแพร่หลายจึงทำให้ผลิตภัณฑ์พวกนี้กลายเป็นขยะอุตสาหกรรมและยากต่อการทำลาย จากงานวิจัยของ Di Wu [4] พบว่าการเผาที่ไม่ได้รับการควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคกำลังพัฒนา มีการปล่อยก๊าซที่สูงขึ้นมาก (13.1 ± 7.5 กรัม/

กิโลกรัม) และมีความเป็นพิษที่เกิดจากการสูดดมของละอองที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ขยะพลาสติก จึงได้มีการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการรีไซเคิล

พลาสติกที่รีไซเคิลได้หลักๆจะเป็น Thermoplastic โดยเราสามารถสังเกตได้จากสัญลักษณ์ที่พลาสติกนั้นว่าสามารถรีไซเคิลได้ ซึ่งก็มีการแยกประเภทของพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลได้ อีก 7 ประเภท

การนำพลาสติกกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ จุดสำคัญคือ การแยกประเภทของพลาสติกก่อนที่จะนำไปรีไซเคิล และการคัดแยกสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป โดยปกติแล้วพลาสติกผสมเกือบทุกประเภทจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป เนื่องจาก Polymer ที่แม้จะมีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกัน แต่ไม่สามารถเข้ากันได้เสมอไป (Incompatible) เช่น Polyester ที่ใช้ทำขวดพลาสติก จะเป็น Polyester ที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า เมื่อเทียบกับ Polyester ที่ใช้ในการผลิตเส้นใย (Fiber)

นอกจากนี้ ยังมีสารเติมแต่งในการผลิตพลาสติก พวก Compatibilizer ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการรีไซเคิลของพลาสติก สารเติมแต่งนี้ จะช่วยให้เกิดพันธะทางเคมี ระหว่าง Polymer 2 ประเภท ที่เข้ากันไม่ได้ ดังนั้น Compatibilizer จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรีไซเคิล [5]

ในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีโดยแบ่งเป็น 4 ประเภทคือ

การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) เป็นการนำขวดหรือเศษพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อน ที่เกิดในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่เพื่ออัตราส่วนต่างๆ [5]

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด บด หลอมและขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นหลายเทคนิค คือ

การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) เป็นเทคนิคที่ง่ายสุด และนิยมที่ใช้มากสุดในปัจจุบัน เป็นการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งาน มาคัดแยกตามประเภท และสี มาล้างทำความสะอาด ก่อนนำไปบดเป็นชิ้นเล็กๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกรีไซเคิล เพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบ หรือนำมาผสมเม็ดใหม่ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ ก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป ปัญหาที่เกิดขึ้นกับกระบวนการรีไซเคิลนี้ คือ ได้พลาสติกคุณภาพต่ำลง สายโซ่โมเลกุลขาด สาเหตุที่สำคัญมาจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก พวกฉลาก เศษกาว ทำให้เม็ดพลาสติกมีสีเข้มขึ้น หรือมีความใสลดลง นอกจากนี้ยังมีเรื่องความชื้นในพลาสติก และความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติก ทำให้พลาสติกมีสีเหลือง และมีสมบัติเชิงกลลดลง [5]



รูปที่ 1.1 การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) [5]

การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical modification) เนื่องจากเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติ การขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้น การปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดกรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี [5]

การหลอมอัดรีดรวมและการฉีดรวม (Coextrusion and Coinjection moulding) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบทุติยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดีและมีสีสม่ำเสมอ ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกกรีไซเคิล [5]

การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน [5]

การรีไซเคิลทางเคมี (Chemical recycling) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerisation) ได้มอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพลาสติกใหม่ [5]

การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis) โครงสร้างของพลาสติกสามารถเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน เรียกว่า Thermolysis แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และ การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) [5]

แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นเป็น ของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic crude oil) สามารถนำกลับไปใช้ในโรงกลั่นและส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการ[5]

แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของเพทเกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า Pyrolysis ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ Syngas ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง แต่ถ้าทำการแยกก่อนนำมาใช้ในรูปของสารเคมีจะมีมูลค่าสูงขึ้น 2 – 3 เท่า[5]

การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสายโซ่พอลิเมอร์ของเพทจะถูกทำให้แตกหรือขาดออกจากกันด้วยความร้อนและสัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินไปที่ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ จนเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) และเกิดการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล[5]

การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary recycling) เป็นการนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ [5]

ในการรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) เป็นการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภท และสี มาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิล เพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่ เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป แต่พลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งจะมีคุณภาพต่ำลง เนื่องมาจากมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ฉลากเล็กๆ หรือเศษกาวทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมี สีเข้มขึ้นหรือมีความใสลดลง ในกระบวนการที่ 5 (Melting by heat and Pressure) ดังรูปที่ 1.1 ความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือกระตุ้นเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติกทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิล มีสีเหลืองและ มีสมบัติเชิงกลและไตรโบโลยีลดลง ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และมีราคาถูกลง เรื่อย ๆ จนบางครั้งไม่คุ้มต่อการลงทุน [5] [6] [7]

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและไตรโบโลยี ในกระบวนการรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) โดยการทดสอบ ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าความเค้นคราก ค่ายังโมดูลัส ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด และไตรโบโลยี ซึ่งประกอบด้วย การเสียดทาน (Friction) การ

สึกหรอ (Wear) การหล่อลื่น (Lubrication) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE
- 1.2.2 เพื่อศึกษาไทรโบโลยีในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWP

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 วัสดุตั้งต้นคือผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด
- 1.3.2 ไม่มีการผสมสารฟิลเลอร์ใดๆ
- 1.3.3 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติทางกล (ประกอบด้วย ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าความเค้นคราก ค่ายังส์โมดูลัส ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด)
- 1.3.5 ศึกษาไทรโบโลยี ซึ่งประกอบด้วย การเสียดทาน (Friction) การสึกหรอ (Wear)

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้ข้อมูลอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE
- 1.4.2 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารและในงานประชุมสัมมนาทางวิชาการ
- 1.4.3 ได้ความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการทำงาน การเก็บข้อมูล หลักการวิเคราะห์ข้อมูลวิธีการสรุปผลและหลักการนำเสนองาน

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- 1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: 09 8279 5855

1.5.2 สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร1381 ถนนประชากรราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138
โทรศัพท์มือถือ: 09 8279 5855

1.5.3 สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
71 ถนน นนทบุรี บางกระสอ อำเภอเมืองนนทบุรี นนทบุรี 11000
โทรศัพท์: 035 709 101



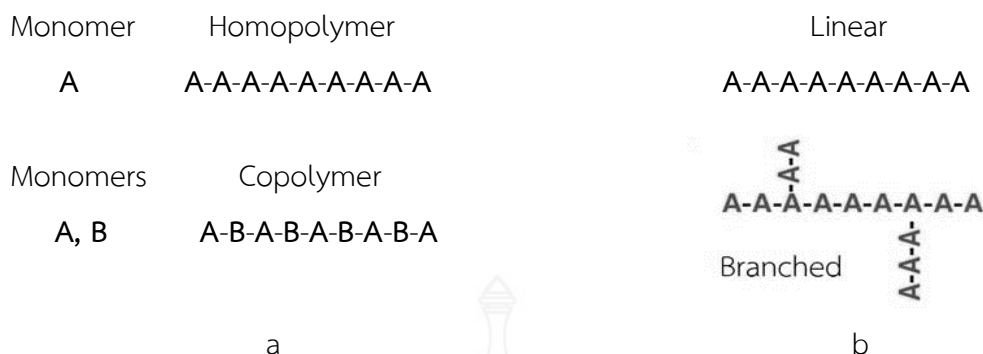
บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีของพอลิเมอร์และ UHMWPE พอลิเมอร์

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สมบัติความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทกเฉื่อยทนต่อการเสียดสีได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนถึง 15 เท่า และ ทนทานต่อสารเคมีสูง การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เพื่องเกียร์ แบร็งค์ ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีการนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหินหรือพื้นกระเบรรถบรรทุกเป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ (Total joint replacement) สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ [2],[3],[9] พอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยของไฮโดรเจนและคาร์บอนหลายโมเลกุล (Poly) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งแต่ละโมเลกุลย่อยหรือที่เรียกว่า “โมโนเมอร์ (Monomer)” ของพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบเหมือนกันเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจะเรียกว่า Homopolymer แต่ถ้าแต่ละส่วนหรือแต่ละโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันมีความแตกต่างกันจะเรียกว่า Copolymer ดังลักษณะแผนภาพการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.1a โดยที่สัญลักษณ์ A, B คือ โมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน โมโนเมอร์ของพอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวกันเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.1b ซึ่งแนวโน้มของการเกิดการจัดเรียงตัวแบบกิ่งก้านสาขานี้ขึ้นอยู่กับความควบคุมสภาวะของขบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นสิ่งที่ควรจำและทำความเข้าใจก็คือรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ดังลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่แสดงในรูปที่ 2.1 a และ 2.1 b ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างง่าย ๆ ของโครงสร้างพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Copolymer มีความเป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างย่อยหรือโมโนเมอร์ย่อยต่างชนิดกันตามชนิดของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไป แต่ในทางปฏิบัติในอุตสาหกรรมพอลิเอทิลีนรวมทั้ง UHMWPE จะเป็น Copolymer ที่เกิดร่วมกับโมโนเมอร์อื่นๆ (ตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) [2], [8], [9]

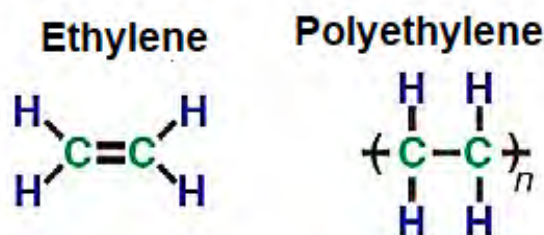


รูปที่ 2.1 a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b)

แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา [2], [8], [9]

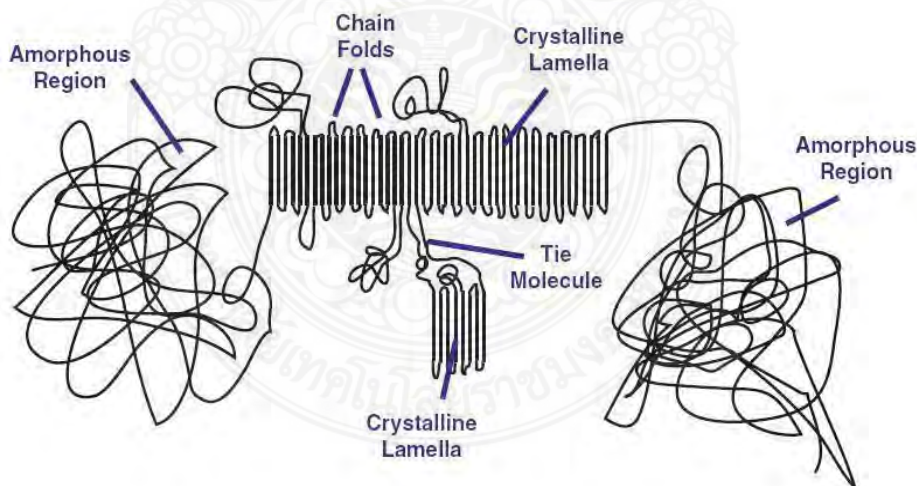
เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ สมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นและเห็นได้ชัดของพอลิเมอร์ที่แตกต่างจากวัสดุอื่นๆ (เช่น โลหะชนิดต่างๆ และเซรามิกส์) คือขนาดโมเลกุล (Molecular size) ในกรณีที่เป็นโลหะผสมและเซรามิกองค์ประกอบย่อยที่เป็นส่วนประกอบคืออะตอมของธาตุโลหะชนิดต่างๆ (ตัวอย่างเช่น Co, Cr, Mo และอื่นๆ) หรืออาจจะเป็นพันธะโมเลกุลเล็กๆเช่น คาร์ไบด์หรือออกไซด์ของโลหะแต่สำหรับขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์อาจประกอบด้วยโมโนเมอร์หลายๆชนิดรวมกันมากกว่า 100,000 โมโนเมอร์ซึ่งมีผลทำให้มวลโมเลกุล (Molecular weights) ของพอลิเมอร์สามารถปรับขนาดเพิ่มขึ้นเป็นล้านกรัมต่อโมล (106 g/mol) และนอกจากนี้รูปแบบการก่อตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ย่อยๆเชื่อมต่อเข้าด้วยกันทำให้พอลิเมอร์มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของพอลิเมอร์

2.1.1.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) เป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ก่อตัวหรือสังเคราะห์จากแก๊สเอทิลีนโมโนเมอร์ (Ethylene monomer (C₂H₄)) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28, สูตรเคมีโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีน คือ - (C₂H₄)_n- โดยที่ n คือ degree of polymerization ซึ่งแผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและ พอลิเอทิลีน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2 สำหรับพอลิเอทิลีนสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยเอทิลีนโมโนเมอร์ตั้งแต่ 200,000 หน่วยเรียงต่อกันซ้ำๆหรือในอีกหนึ่งความหมายสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนมากถึง 400,000 อะตอมซึ่งพอลิเอทิลีนยังสามารถแบ่งชนิดแยกย่อยออกได้หลายชนิด (LDPE, LLDPE, HDPE, PE1000 และ UHMWPE) ตามขบวนการสังเคราะห์ โดยพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมามีขนาดของมวลโมเลกุลและรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน ตามขบวนการสังเคราะห์ โดยพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมามีขนาดของมวลโมเลกุล [2], [8], [9]



รูปที่ 2.2 แผนผังโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโมโนเมอร์และพอลิเอทิลีน [2], [8], [9]

และรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลที่ต่างกัน สำหรับในส่วนของ LDPE and LLDPE จะหมายถึง low-density polyethylene และ linear low density polyethylene ตามลำดับลักษณะการจัดเรียงโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นแบบกิ่งก้านสาขาและเป็นเส้นตรงตามลำดับและนอกจากนี้มวลโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดจะต่ำกว่า 50,000 g/mol HDPE สายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีมวลโมเลกุลสูงถึง 200,000 g/mol สำหรับในส่วนของ PE1000 และ UHMWPE เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆพบว่า PE1000 และ UHMWPE จะมีมวลโมเลกุลสูงประมาณ 1×10^6 g/mol แต่ในความเป็นจริงมวลโมเลกุลที่สูงมากๆเช่นนี้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดาต่างๆไปแต่จะทำการวัดเปรียบเทียบกับอนุมาณแทนด้วยค่า intrinsic viscosity (IV) [2], [8], [9]



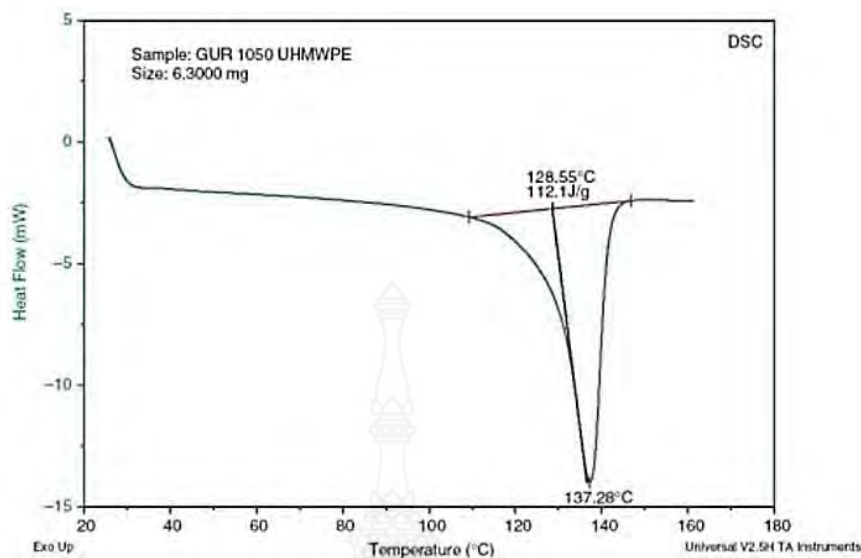
รูปที่ 2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE [2], [8], [9]

2.1.1.2 สภาพความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (Crystallinity of polymer) วิธีการหนึ่งที่ช่วยให้สามารถจินตนาการเห็นสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE คือสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นเชือก

หรือสายโซ่ที่พันกันยุ่งเหยิงคล้ายสปาเก็ตตี้ที่มีความยาวมากกว่าหนึ่งกิโลเมตร เนื่องจากสายโซ่จะไม่อยู่นิ่งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและมีการดูดซับพลังงานความร้อนภายในตลอดเวลาส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point) สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE มีแนวโน้มที่จะเกิดการสับเปลี่ยนพันธะของ C-C และทำให้เกิดการพับของสายโซ่ (Chain fold) การพับงอของสายโซ่กลับไปกลับมาเช่นนี้ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Ordered) เฉพาะบางช่วงบริเวณ, บริเวณที่มีการพับงอสายโซ่เป็นแผ่นนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและเรียกว่า “ผลึกแผ่น (Crystalline lamella)” ที่มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกบางๆ โดยผลึกแผ่นเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ในบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) และสามารถที่จะเชื่อมต่อกับผลึกแผ่นข้างเคียงได้ด้วยพันธะโมเลกุล (Tie molecule) ซึ่ง UHMWPE มีลักษณะรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลและความเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [2], [8], [9]

2.1.1.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal transition of polymer)

วิธีการหนึ่งที่ใช้จำแนกหรือทำให้เห็นความแตกต่างของลักษณะจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดคืออุณหภูมิที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เหล่านั้นในที่นี้จะขอย้อนกล่าวไปถึงรูปแบบของสายโซ่โมเลกุล UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นสปาเก็ตตี้ที่ยาวและพันกันยุ่งเหยิง ซึ่งสามารถจินตนาการได้ถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกลับไปกลับมาและเกิดการบิดงอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนหรืออาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะต้องเผชิญกับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน 3 ด้านหลักๆ คือ อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature; T_g), อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point temperature; T_m) และอุณหภูมิไหลตัว (Flow temperature; T_f) อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature; T_g) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีพฤติกรรมเปราะคล้ายแก้ว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนไม่เพียงพอที่จะเลื่อนผ่านสายโซ่อื่นได้และมีวิธีเดียวที่วัสดุจะตอบสนองต่อความเค้นทางกลที่มากระทำคือการยืดออกหรือแตกออกจากพันธะที่ประกอบกันเป็นสายโซ่โมเลกุลในกรณีของ UHMWPE, T_g จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 160°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิ T_g สายโซ่โมเลกุลบริเวณพื้นที่ที่เป็นอสัณฐานภายในพอลิเมอร์จะเคลื่อนตัวได้มากขึ้นและเมื่ออุณหภูมิของ UHMWPE เพิ่มขึ้นสูงกว่า $60-90^{\circ}\text{C}$ ผลึกที่มีขนาดเล็ก หรืออนุภาคที่เล็กกว่าผลึกในพอลิเมอร์จะเริ่มหลอมละลายซึ่งพฤติกรรมการหลอมละลายของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi crystalline polymer) รวมทั้ง UHMWPE ถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดปริมาณของผลึกของพอลิเมอร์หรือที่เรียกว่า “สภาพความเป็นผลึก (Crystallinity)” และสามารถวัดได้ด้วยการใช้ differential scanning calorimeter (DSC) โดย DSC จะวัดปริมาณความร้อนจำเพาะที่จำเป็นต้องใช้ต่อการเพิ่มอุณหภูมิของพอลิเมอร์ตัวอย่าง DSC data



รูปที่ 2.4 DSC กราฟของ UHMWPE [2], [8], [9]

สำหรับ UHMWPE มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4 DSC traces สำหรับ UHMWPE ประกอบด้วย 2 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งของเส้นโค้งเป็นจุดสูงสุดของอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 137°C และสอดคล้องกับจุดที่เป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline regions) ที่มีการหลอมละลาย ซึ่งอุณหภูมิหลอมละลายของ UHMWPE สะท้อนให้เห็นถึงความหนาของผลึกหรือความสมบูรณ์ของผลึก โดยความหนาแน่นและความสมบูรณ์ของผลึก UHMWPE ยิ่งมาก มีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิหลอมละลายสูงกว่าผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือผลึกที่มีขนาดเล็กกว่าบริเวณพื้นที่ด้านล่างภายใต้จุดหลอมละลายสูงสุด คือ สัดส่วนของสภาพความเป็นผลึกหรือปริมาณผลึกที่เรียกว่า ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) นอกจากนี้ DSC ยังสามารถวัดปริมาณพลังงานความร้อนสุทธิต่อหน่วยมวล (ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้สำหรับการหลอมละลาย (Enthalpy) หรือ (Hemotherm) ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการหลอมละลายบริเวณส่วนที่เป็นผลึกภายในขั้นตอนสอบโดยเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy ของขั้นตอนที่มีความสมบูรณ์ของผลึก 100% (Enthalpy ของ UHMWPE บริสุทธิ์ $H_f = 291 \text{ J/g}$) และคำนวณออกมาเป็นปริมาณผลึกสำหรับก้อนวัสดุ UHMWPE ส่วนใหญ่จะมีปริมาณผลึกประมาณ 50-55% ในขณะที่อุณหภูมิของพอลิเมอร์กึ่งผลึกถูกทำให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลายพอลิเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดการไหลตัว (Flow transition, T_f) และกลายเป็นของเหลว สำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า $500,000 \text{ g/mol}$ สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมการไหลได้ง่ายแต่อย่างไรก็ตามสำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า $500,000 \text{ g/mol}$ ด้วยสายโซ่โมเลกุลที่มีปริมาณมากกว่าและซับซ้อนมากกว่าจะเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการไหลส่งผลให้ UHMWPE ไม่แสดงพฤติกรรมการไหลตัวหรืออาจกล่าวได้ว่า “ไม่มีจุดไหลตัว” เหมือนพอลิเอทิลีนชนิดอื่น ๆ [2], [8], [9]

2.1.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์บริสุทธิ์ส่วนใหญ่มีสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอต่ำซึ่งบางครั้งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เหล่านี้ด้วยการผสมสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆ เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานและนอกจากนี้ยังมีการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูป ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูปนี้โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่าพอลิเมอร์คอมพาวด์ (Polymer compound) สารเติมแต่งที่ใช้ผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ประกอบด้วยฟิลเลอร์ (Filler) สารประสาน (Coupling agents) สารเพิ่มความทนแรงกระแทก (Impact modifiers) สารก่อผลึก (Nucleating agents) พลาสติไซเซอร์ [2], [8]

2.1.2.1 ฟิลเลอร์ (Filler) หมายถึง สารเติมแต่งที่ผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มเนื้อหรือปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ (บางครั้งเรียกว่า สารเพิ่มเนื้อ (Insert fillers)) และปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ (หรือเรียกว่าสารเสริมแรง (Reinforcing fillers)) และนอกจากนี้ฟิลเลอร์ยังมีส่วนช่วยลดต้นทุนการผลิตชิ้นงานที่ทำจากพอลิเมอร์ซึ่งเรียกฟิลเลอร์ชนิดนี้ว่า เอกเทนเดอร์ (Extenders) [2], [8] , [9]

2.1.2.2 สารประสาน (Coupling agents) สารที่ทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมการเกาะยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์ ซึ่งบางครั้งเรียกว่าสารช่วยยึด (Adhesion promoters) และนอกจากนี้ในการใช้สารประสานบางครั้งอาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้สารปรับปรุงพื้นผิวฟิลเลอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือความแข็งแรงของการเกาะยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์ สารประสานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปประกอบด้วย สารโครเมียมเชิงซ้อน (Chromium complexes) ซิลเลน (Silanes) ไททานेट (Titanates) และเซอร์โคเนียมอะลูมินेट (Zirconium aluminates) [2], [8] , [9]

2.1.2.3 สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers) พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติเปราะและขาดความเหนียว (Toughness) และความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ต่ำการทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะลดลงและมีความทนทานต่อแรงกระแทกหรือมีความเหนียวเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการผสมสารเติมแต่งที่เรียกว่า สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers) ตัวอย่างสารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 2.1 [2], [8] , [9]

2.1.2.4 ก่อผลึก (Nucleating agents) เป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่ช่วยเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์ โดยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมหรือนิวเคลียสก่อผลึกซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางกลสูงขึ้น ในขณะที่นิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ (โครงสร้างผลึกมีความละเอียด) ส่งผลให้แสงผ่านได้มากขึ้นพอลิเมอร์จึงมีสมบัติโปร่งแสงขึ้น [2], [8] , [9]

ตารางที่ 2.1 สารเพิ่มความทนแรงกระแทกที่สำคัญทางการค้า [2],[8] , [9]

สารเพิ่มความทนแรงกระแทก	องค์ประกอบ / สัณฐานวิทยา	ใช้งานกับ
EPDM	เอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์	PP ,PS
Functionalized polyolefins	พอลิโอเลฟินส์ถูกดัดแปลงด้วยกรด	PA,PC
เทอร์โมพลาสติก-พอลิเอสเตอร์ อี ลาสโตเมอร์	โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (soft polyether/hard polyester)	PET,PBT
SBS	สไตรีน-บิวตะไดอีน บล็อกโคพอลิเมอร์ (Triblock, soft polybutadiene /hard PS)	PS,PP,PPO
Acrylic (core-shell)	Polyacrylic 'core'/polymethacrylic 'shell'	PVC,PC,PET
MBS (core-shell)	Polybutadiene or polybutadiene/styrene 'core' Polymeethacrylic 'shell'	PVC, PC, PET,PBT
ABS	อะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน เทอร์พอลิเมอร์	PVC,PC, PUR,PET
EVA	เอทิลีน-ไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์	PVC
SBR	ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน	PS
NBR	อะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอีนโคพอลิเมอร์	PVC
CPE	คลอรีเนตโคพอลิเอทิลีน	PVC

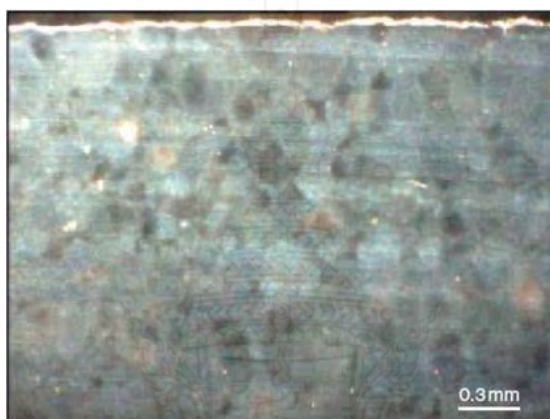
2.1.2.5 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) กระบวนการเพิ่มความอ่อนนุ่มให้กับพอลิเมอร์ หรือที่เรียกว่าพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่ผสมเข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้ เรียกว่าพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Extensibility or stretch ability) ของพอลิเมอร์ [2], [8] , [9]

2.1.3 กระบวนการขึ้นรูป UHMWPE [2], [8] , [9]

จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆที่ประกอบไปด้วย C และ H ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นเพียงแค่ความรู้พื้นฐานขององค์ประกอบทางเคมีเท่านั้น แต่ถ้าต้องการอธิบายให้ลึกซึ้งจนสามารถจินตนาการออกมาเป็นก้อนวัสดุ UHMWPE ที่สามารถจับต้องและนำไปใช้งานได้จะต้องอธิบายให้เห็นภาพขั้นตอนต่างๆ ของกรรมวิธีการผลิต โดยขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตขึ้นงาน UHMWPE นั้นมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยน ethylene gas ให้เป็นผง UHMWPE ด้วยกระบวนการ polymerization ขั้นตอนที่สองคือผง UHMWPE ถูกทำให้อยู่ในรูปของแข็งเป็นแผ่น แท่ง ก้อนหรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จ (Semi-Finished

Product) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จด้วยวิธีการตัดเฉือน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.5c สำหรับในกรณีของชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กอาจจะทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีการตัดเฉือนซึ่งขบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปนี้เรียกว่า “direct compression molding (DCM)” แต่ละขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตพื้นฐานทั้ง 3 ขั้นตอนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของ UHMWPE ตัวอย่างเช่นในกรณีของการตัดเฉือนขึ้นรูปการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปร่างภายนอกและปรากฏผิวเท่านั้น แต่การเปลี่ยนแปลงของขบวนการ polymerization จะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของ UHMWPE และผลิตภัณฑ์ทั้งหมดการขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัสดุก่อน UHMWPE จะต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง เนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดสูงดังที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ซึ่ง UHMWPE จะไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ จากเหตุผลนี้ทำให้ UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปทั่วไปที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติก อาทิเช่นการฉีดขึ้นรูปการอัดรีดด้วยสกรู หรือการเป่าขึ้นรูป แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion การก่อตัวเป็นของแข็งจากการขึ้นรูปวัสดุก่อน UHMWPE ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion เกิดขึ้นภายใต้สภาวะของการรวมกันของอุณหภูมิความดันและเวลาที่เหมาะสม โดยความแม่นยำเที่ยงตรงของการรวมกันของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรที่เป็นค่าเฉพาะของ UHMWPE ถูก นำมาใช้ในการผลิตวัสดุก่อน UHMWPE เชิงพาณิชย์ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปตามหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ [2],[9],[10]-[24] ว่ากลไกที่ควบคุมการก่อตัวเป็นของแข็งคือการแพร่ของอะตอมที่เป็นเนื้อหลัก (Self-diffusion) ในขณะที่สายโซ่โมเลกุล UHMWPE (หรือบางส่วนของสายโซ่) ของอนุภาคเกิดการแทรกตัวเข้าหากันในระดับโมเลกุล โดยจลศาสตร์ของการแพร่บริเวณขอบเกรนที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมประสานของขอบเกรนบริเวณที่อยู่ติดกัน (ที่ความดันสูง) และความร้อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวยของสายโซ่พอลิเมอร์ (ที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งส่งผลให้ขบวนการแพร่มีข้อจำกัดเนื่องจากการก่อตัวเป็นของแข็ง UHMWPE จะเกิดขึ้นด้วยภายใต้อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE หลังจากการก่อตัวขึ้นรูปเป็นของแข็งผง UHMWPE จะยังคงรักษาสภาพการเป็นเม็ดอนุภาคภายในโครงสร้างเม็ดเกรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการผสม Calcium-Stearate ในผง UHMWPE [2], [9],[10],[12], [21], [24] จะสังเกตเห็นโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนที่มีลักษณะจำเพาะของ UHMWPE ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยขึ้นทดสอบจะต้องผ่านการเตรียมด้วยวิธีการเฉพาะที่แตกต่างกัน วิธีมาตรฐานที่ใช้สำหรับการเตรียมขึ้นทดสอบได้มีการอธิบายไว้อย่างละเอียดในมาตรฐาน ASTM F648 โดยขึ้นทดสอบจะถูกเตรียมให้เป็นแผ่นบางๆคล้ายแผ่นฟิล์มที่มีความหนาในหน่วยไมโครเมตรจากนั้นจึงนำไปทำการวิเคราะห์ตรวจสอบ

ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในโหมด Dark field [2], [24] แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันไม่มีการผสม Calcium-Stearate ในผง UHMWPE ส่งผลให้การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ความหนา 100 μm จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [25]ทำได้ยากขึ้น ดังลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคจากการก่อตัวเป็นของแข็งของผง UHMWPE เกรด GUR 1020 (ของ Rolf Kaldeweyer, Ticona, Inc.) โดยชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ความหนาประมาณ 100 μm [2], [12]



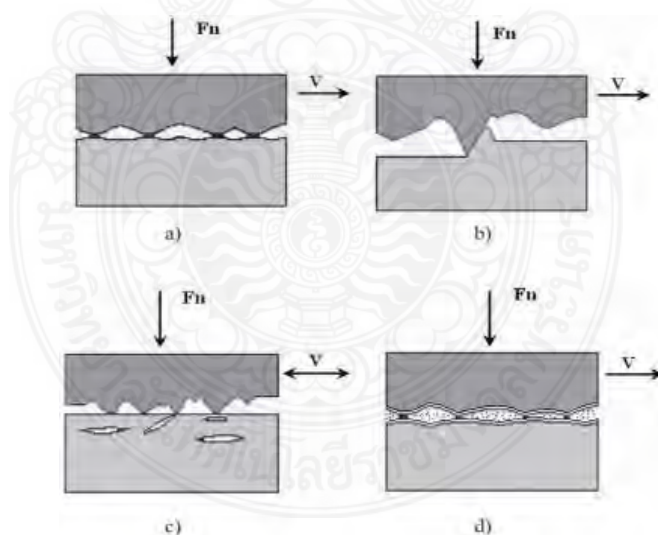
รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE เกรด GUR 1020

นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ UHMWPE ยังสามารถทำการตรวจสอบได้โดยการนำชิ้นทดสอบไปแช่แข็งในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการหักทำลายชิ้นทดสอบ [2], [10] หรือตามด้วยการกัดด้วยกรดเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นอาณาบริเวณขอบเกรนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น [2], [24] หลังจากนั้นจึงนำชิ้นทดสอบไปทำการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโดยการตรวจสอบพื้นผิวรอยแตกหักหลังจากผ่านการแช่แข็งหรือพื้นผิวหลังจากผ่านการกัดกรด ความแตกต่างของขอบเกรนที่เกิดขึ้นเป็นตัวสะท้อนลักษณะโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนของ UHMWPE โดยความบกพร่องของวัสดุ UHMWPE จะเพิ่มขึ้นถ้าสถานะของการก่อตัวขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็งไม่เหมาะสม (อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่ไม่เหมาะสม) [2], [26] ซึ่งโดยส่วนใหญ่ความบกพร่องที่พบจะอยู่ในรูปของเม็ดอนุภาคเดี่ยวๆ ที่ไม่มีการเกาะยึดเชื่อมประสานติดกับเม็ดอนุภาคอื่นๆ หรือมีบางอาณาบริเวณของการก่อตัวเป็นของแข็งแยกตัวหรือไม่มีการเชื่อมประสานกับอาณาบริเวณข้างเคียงสำหรับในส่วนของเทคนิคและวิธีการมาตรฐาน (ASTM F648) เกี่ยวกับการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ UHMWPE ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ตรวจสอบความบกพร่องของการหลอมรวมผง UHMWPE และนอกจากนี้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายซึ่งประกอบด้วย laser candling และ ultrasound ที่ใช้

สำหรับการตรวจสอบในอุตสาหกรรมได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE เกรดทางการแพทย์ด้วยเช่นกันแต่เทคนิคการตรวจสอบดังกล่าวไม่ใช่วิธีการมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ

2.1.4 การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์

พื้นผิวของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองรับ (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสีจะเกิดการสึกหรอจากการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสที่แข็งกว่า การประยุกต์ใช้งานวัสดุคู่สัมผัสโลหะแข็งขัดถูเสียดสีกับพื้นผิวพอลิเมอร์นั้นถูกกำหนดตามความต้องการของการออกแบบทางกลและรวมถึงข้อเท็จจริงที่ว่าพอลิเมอร์สามารถต้านทานการเสียดสีกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสได้ดีกว่าการลื่นไถลเสียดสีตัวมันเองโดยรูปแบบพื้นฐานการสึกหรอของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เริ่มต้นจากก่อกำเนิดของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายโอน (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสโลหะที่แข็งกว่า ซึ่งการก่อกำเนิดของชั้นฟิล์มนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางด้านไตรโบโลยีของพอลิเมอร์ [2], [27] การสึกหรอของพอลิเมอร์โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มรูปแบบการสึกหรอออกเป็น 4 รูปแบบประกอบด้วยการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) และการสึกหรอแบบไตรโบเคมีคอล (Tribochemical wear) [2], [28]-[30] ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6 [2], [12]



รูปที่ 2.6 รูปแบบการสึกหรอของพอลิเมอร์; a) การสึกหรอแบบยึดติด b) การสึกหรอแบบขัดถู c) การสึกหรอแบบล้าตัว d) การสึกหรอแบบไตรโบเคมีคอล [28]

2.1.4.1 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) การสึกหรอแบบยึดติดเป็นรูปแบบการสึกหรอที่มีลักษณะปรากฏเป็นจุดเชื่อมประสาน (Micro welds) ระหว่างพื้นผิวของวัสดุสองชิ้นที่

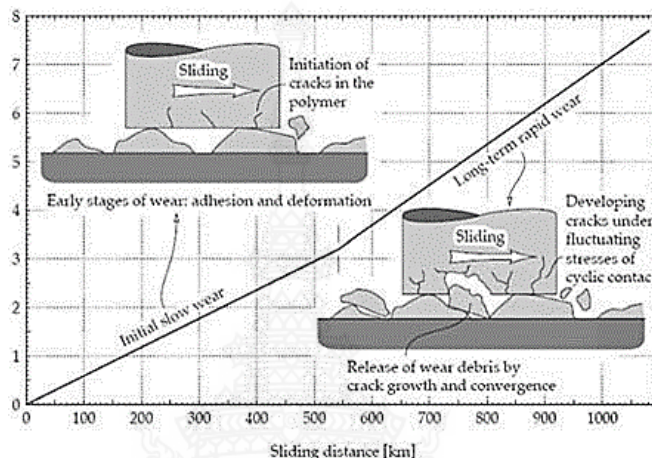
นำไปสู่การเสียดทานดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6a โดยจุดเชื่อมประสานเหล่านี้อ่อนแอและเกิดการฉีกขาดบริเวณรอยต่อเชื่อมประสานของพื้นผิวทั้งสอง ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่จุดเชื่อมประสานมีความแข็งแรงสูงพื้นผิวของวัตถุที่อ่อนกว่าจะถูกฉีกและส่งผลให้เกิดการถ่ายเนื้อวัสดุไปยังพื้นผิววัตถุที่แข็งแรงกว่า กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการไถเสียดทานของพื้นผิวพอลิเมอร์บนพื้นผิววัสดุต่างกัน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะ) ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่ความแข็งแรงของการยึดติด (adhesive bonds) ที่ก่อตัวขึ้นระหว่างพื้นผิววัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันมีความแข็งแรงมากกว่าความแข็งแรงเหนียวแน่น (cohesive strength) ของเนื้อพอลิเมอร์จะมีผลทำให้เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เกาะยึดติดบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและในขณะเดียวกันฟิล์มพอลิเมอร์บางส่วนเกิดการหลุดร่อนออกจากอาณาบริเวณของความเสียดทานกลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ (wear debris) [2], [31] ผลของการสึกหรอแบบยึดติดที่เกิดจากการฉีกขาดของจุดเชื่อมประสานความเสียดทานจะค่อยๆ ขยายขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นรอยร้าวที่มีขนาดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการเสียดทานของจุดเชื่อมประสานที่ยึดติดกันซึ่ง Belyi และคณะได้เสนอแนวคิดไว้ว่า “การถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เป็นลักษณะจำเพาะที่สำคัญของการสึกหรอแบบยึดติดของวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบฐาน” [2], [32] ปรากฏการณ์การถ่ายเทความเสียดทานนั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากวัสดุเกือบทุกชนิด โดยผลที่ตามมาของปรากฏการณ์การถ่ายเนื้อวัสดุอาจมีความแตกต่างกันถ้าขนาดของอนุภาคการถ่ายเนื้อวัสดุจากพื้นผิววัสดุหนึ่งไปยังวัสดุอื่นมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร อัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นก็จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [2], [33]–[35] ในกรณีของการสึกหรอภายใต้สภาวะการควบคุมคงที่การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะปรากฏเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ของวัสดุที่อ่อนกว่าถ่ายเนื้อไปยังพื้นผิววัสดุที่แข็งแรงกว่า ตัวอย่างเช่นการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะในขณะที่เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะนี้จะเกิดการหลุดออกของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากพื้นผิวโลหะควบคู่กันไปด้วย ถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์หลุดออกจากพื้นผิวโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสที่กล่าวถึงนี้อาจมีผลต่อการเกาะยึดของชั้นฟิล์มซึ่งการแพร่กระจายของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะจะส่งผลทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดแต่การสึกหรอเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

2.1.4.2 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบขัดถูเป็นรูปแบบการสึกหรอที่มีการตัดฉีกเนื้อวัสดุเกิดขึ้นโดยเกิดจากวัสดุที่แข็งแรงกว่าตัดฉีกเนื้อวัสดุที่อ่อนกว่า ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6b ซึ่งหลักฐานการสึกหรอแบบนี้จะปรากฏเป็นรอยขีดข่วน ร่องรอยการครูดหรือขูดออกของเนื้อวัสดุที่นำไปสู่การสูญเสียเนื้อวัสดุ กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบขัดถูนี้เกิดขึ้นจากจุดปลายความหยาบพื้นผิวที่แข็ง (Hard asperities) บนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส

และหรืออนุภาคแข็งเคลื่อนที่ตัดเฉือนพื้นผิวพอลิเมอร์ด้วยความหยาบพื้นผิวหรือความขรุขระของพื้นผิวเป็นปัจจัยที่กำหนดแรงเสียดทานซึ่งผลของการขัดถูจะแสดงออกมาในรูปของรอยขีดข่วน รอยแฉะและร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการขัดถูส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างเป็นเศษที่ถูกตัดเฉือนออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ คล้ายๆ กับเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดในงานตัดเฉือนด้วยเครื่องมือกลแต่จะมีขนาดที่เล็กกว่า การสึกหรอแบบขัดถูมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างเรขาคณิตของจุดปลายความหยาบพื้นผิว (Asperity) ของวัสดุคู่สัมผัสที่แข็งกว่าและส่งผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับรูปร่างและมุมปลายของจุดหรือบริเวณที่เกิดการขัดถูบนพื้นผิวของวัสดุคู่สัมผัส [2], [31] ในขณะที่เกิดการขัดถูเมื่อจุดปลายความหยาบพื้นผิวหรืออนุภาคขัดถูกระทำกับพื้นผิวพอลิเมอร์มีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียรูปซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบที่สำคัญคือ แบบที่หนึ่งเกิดการเซาะเป็นร่องบนพื้นผิวพอลิเมอร์ซึ่งบ่อยครั้งจะมีการกล่าวอ้างถึงการไถครูดที่เกิดจากการผลึกหรือตันอนุภาคและวัสดุไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นรอยไถครูดทางยาวและตันเนื้อวัสดุออกด้านข้างที่ส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นสันไถลๆ กับรอยไถครูดและต่อมามีการพัฒนาเกิดเป็นร่องโดยไม่มีเนื้อวัสดุถูกเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิว แบบที่สองเรียกว่า “เกิดการตัดเฉือน” เนื่องจากมีลักษณะคล้ายๆ กับการตัดเฉือนในระดับไมโครซึ่งเนื้อวัสดุถูกตัดเฉือนออกเป็นอนุภาคการสึกหรอขนาดเล็กที่ถูกขจัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ (Chip)

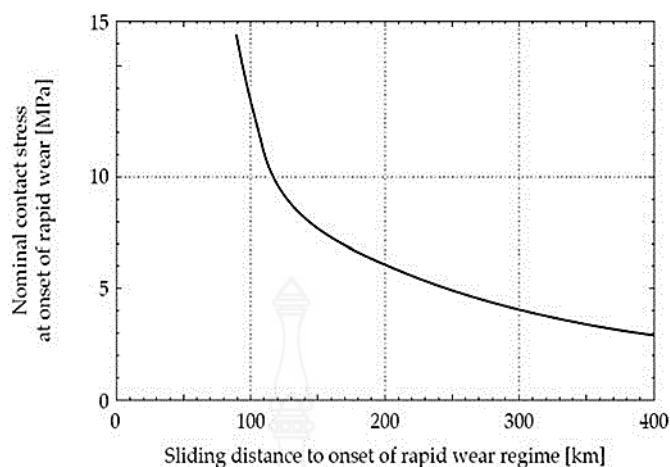
2.1.4.3 การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความเค้นวัฏจักรส่งผลให้เกิดความเครียด (Strain) ภายในเนื้อวัสดุบริเวณใต้ชั้นผิวและก่อให้เกิดเป็นรอยร้าวเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุขนานกับพื้นผิวดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6c และเมื่อไหร่ก็ตามที่รอยร้าวเหล่านี้มีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงขนาดวิกฤติจะทำให้เกิดการหลุดออกมาของแผ่นชั้นส่วนย่อยหรือเกล็ดที่เป็นอนุภาคการสึกหรอ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มักถูกกล่าวถึงว่าเป็นการสึกหรอที่เกิดจากการแตกออกของชั้นพื้นผิว (Delamination wear) กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการแพร่ขยายของรอยร้าวบริเวณที่มีการแปรรูปซ้ำๆ จากการเสียดทานโดยอนุภาคการสึกหรอ (Wear debris) เกิดจากการขยายตัวและการฉีกขาดของรอยร้าวขนาดเล็กบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการสั่นไถล โดยการสึกหรอแบบล้าตัวนี้เกิดขึ้นหลังจากพอลิเมอร์สัมผัสกับการเสียดทานเป็นเวลานานซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อพอลิเมอร์เนื่องจากความเค้นภายในที่เกิดขึ้นซ้ำๆ และสะสมภายใน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นซ้ำๆ และสะสมอยู่ภายในไม่สามารถขจัดออกให้หมดไปได้แต่จะมีปริมาณสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเป็นตัวเร่งที่พัฒนาไปสู่การเกิดการแตกร้าวของพอลิเมอร์ การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายอาณาบริเวณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณความเค้นสะสมที่เพิ่มขึ้นซึ่งขบวนการที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า “ความล้าเสียดทาน (Friction fatigue)” และมีความแตกต่างจากความล้าของวัสดุก่อนเนื่องจากความล้าเสียดทานเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นผิวและใต้พื้นผิวของวัสดุเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการแตกร้าวจากความล้านี้

จะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณจุดเล็กๆบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นจุดสัมผัสความเค้นหรือเกิดการดัดแปรรูปสูงสุด จากทฤษฎีและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้อาณาบริเวณที่รับภาระจะเป็นตำแหน่งจุดสัมผัสความเค้นสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์จะทนต่อวัฏจักรความเค้นจากการลื่นไถลกลับไปกลับมาซ้ำๆ



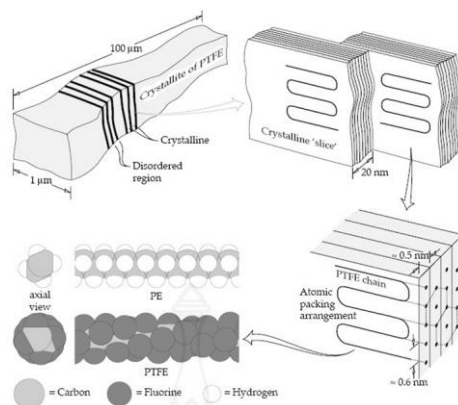
รูปที่ 2.7 อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัว หลังจากผ่านการลื่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ [36]

จำนวนหลายรอบและต่อมาส่งผลให้บริเวณผิวสัมผัสเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวโดยพฤติกรรมการสึกหรอแบบล้าตัวนี้สามารถสังเกตเห็นได้จากตัวอย่าง UHMWPE ที่มีการลื่นไถลต้านกับพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะที่มีความเรียบผิวสูง โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการลื่นไถลเสียดสีเป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร [2], [36] ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 ความเสียหายหรือการสึกหรอของพื้นผิวจากการสึกหรอแบบล้าตัวพบว่าจะเกิดขึ้นหลังจากพื้นผิวพอลิเมอร์ลื่นไถลเป็นระยะทางไกลๆ โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นพร้อมๆกับการขยายตัวของรอยร้าวและอนุภาคการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของการสึกหรอจะอยู่ในรูปของเศษอนุภาคการสึกหรอที่แตกออกเป็นเศษลอนขึ้นเล็กๆบนชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้องลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของขบวนการสึกหรอแบบยึดติดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอจากการสึกหรอแบบยึดติดเป็นการสึกหรอแบบล้าตัวนั้นถูกควบคุมด้วยความเค้นสัมผัส (Contact stress) ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีความเค้นสัมผัสต่ำกว่า 1 MPa การลื่นไถลเป็นระยะทางอนันต์จะทำให้การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเสมอและนอกจากนี้การสึกหรอ[2], [36]



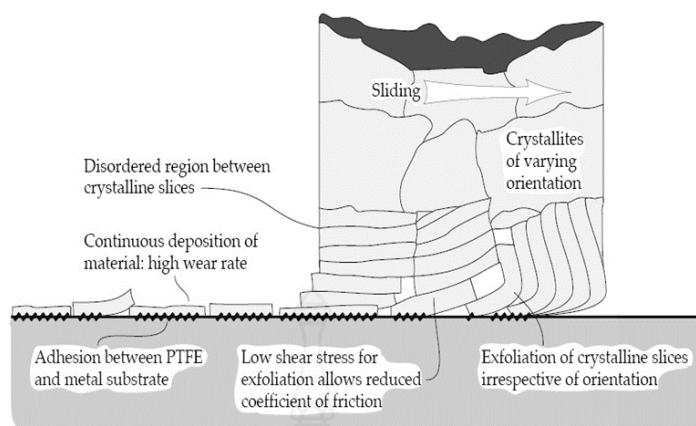
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น [36]

การลื่นไถลเป็นระยะทางอนันต์จะทำให้การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเสมอและนอกจากนี้การสึกหรอแบบล้าตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับการรับภาระที่สูงลื่นไถลบนพื้นผิวที่เรียบและไถลด้วยระยะทางไกลๆ อีกด้วยซึ่งรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการทดสอบการล้าตัวของวัสดุ UHMWPE ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของการสึกหรอแบบล้าตัวภายใต้ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นต่อระยะทางของการไถล การสึกหรอของวัสดุโดยทั่วไปจะมีความแตกต่างของปรากฏการณ์ของการสึกหรอที่เกิดขึ้น 3 ระยะ [2], [37] คือการสึกหรอระยะเริ่มต้น (Running-in) การสึกหรอระยะคงตัวหรือสม่ำเสมอคงที่ (Steady state) การสึกหรอระยะรุนแรง (Wear out) สำหรับในกรณีของการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสระหว่างโลหะ-พอลิเมอร์ ในระยะแรกจะหมายถึงการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ้าย่นไถลบนพื้นผิวโลหะโดยสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสขึ้นอยู่กับสมบัติของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ้าย่นไถลบนพื้นผิวโลหะซึ่งประกอบด้วยสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของวัสดุ ความแข็งแรงของการเชื่อมประสานหรือเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวของโลหะบริเวณหรือส่วนของพื้นที่พื้นผิวโลหะที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ความรุนแรงของปฏิกิริยาเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะซึ่งสมบัติจำเพาะต่างๆ เหล่านี้ถูกยืนยันด้วยผลการทดลองและรายงานผลการศึกษาวิจัยที่นำเสนอโดยนักวิจัยหลายๆ ท่าน [2], [30], [38], [39] ดังที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าพอลิเมอร์เกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวแข็งของโลหะด้วยวิธีการดูดซับ [2], [40] ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าส่วนประกอบที่เกาะยึดติดแน่นอยู่ด้วยกันของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับดูดซับในระดับไมโครโมเลกุล (Micro molecules) ที่จำกัดการเคลื่อนที่ของหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) โดยการจำกัดการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลจะมีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อพฤติกรรมทางด้านไทรโบโลยีของพอลิเมอร์



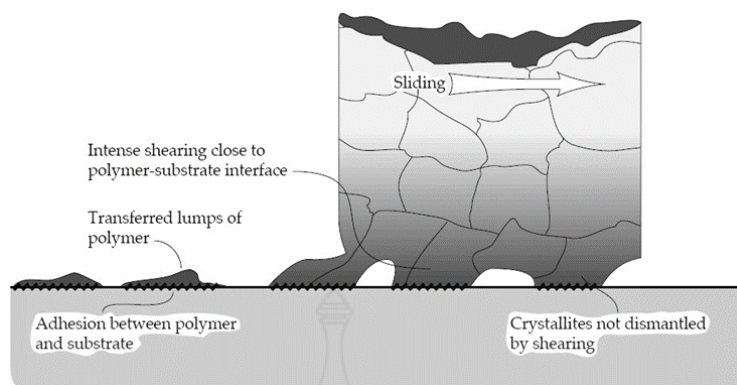
รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของ PTFE และโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE [41]-[43]

สำหรับการอธิบายการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื่อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของการลื่นไถลแล้วส่งผลให้เกิดการสึกหรอของพอลิเมอร์ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเตตราฟลูออโรเอทีลีนหรือเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื่อบนพื้นผิวโลหะที่แสดงในรูปเป็นตัวอย่างชั้นฟิล์ม PTFE ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศที่มีการยึดเกาะแนบติดกับพื้นผิวโลหะอย่างแข็งแรง [2], [45] ปรากฏการณ์เกาะยึดแนบติดที่เกิดขึ้นนี้มีความเข้าใจว่าเป็นปฏิกิริยาทางเคมีของบริเวณจุดที่สัมผัสกันระหว่างฟลูออรีน (Fluorine) และคาร์บอนกับพื้นผิวโลหะที่ลื่นไถลต้านกัน [2], [45], [46] ถึงแม้ว่าอาจจะมีความเป็นไปได้ว่าการเกาะยึดแนบติดที่แข็งแรงสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ แต่โครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเฉพาะของ PTFE ทำให้เกิดกลไกของการถ่ายเนื่อฟิล์มพอลิเมอร์ที่เป็นลักษณะเฉพาะสำหรับ PTFE จากการที่มีช่องว่างหรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกทำให้มั่นใจได้ว่าโมเลกุลของ PTFE สามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่อยู่ภายใต้ความเค้นสำหรับในส่วนของโครงสร้างผลึกของ PTFE จะประกอบด้วยชั้นของส่วนที่เป็นผลึกถูกชั้นกลางด้วยชั้นของเนื้อวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) ซึ่งอ่อนแอและเสียรูปได้ง่ายส่งผลให้ PTFE เกิดการแปรรูปได้ง่ายในชุดของชั้นแผ่นผลึกและอสัณฐานที่ต่อเนื่องกัน [2], [42] โดยบริเวณของ PTFE ที่ลื่นไถลสัมผัสกับพื้นผิวที่แข็งกว่าจะเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุในรูปของชั้นแผ่นเนื้อวัสดุที่ลื่นไถลออกมา ซึ่งส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำแต่มีอัตราการสึกหรอสูง [2], [43], [44] กลไกการสึกหรอของ PTFE มีลักษณะดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.10 กลไกการถ่ายชั้นฟิล์ม (Film transfer mechanism) พอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสมีพฤติกรรมคล้ายๆ กับการถ่ายชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ของ PTFE ซึ่งปัจจุบันยังไม่พบในพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.10 การสึกหรอและชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายโอนบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE [28]

โดยปริมาณชั้นฟิล์มพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สะสมบนพื้นผิวโลหะที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นจะกระตุ้นให้เกิดขบวนการถ่ายโอนพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) เมื่อมีการสั่นไถ่ต้านกับพื้นผิวของแข็ง [2], [47] แต่กลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนมีข้อยกเว้นสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) และ Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) [2, 38] เนื่องพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะคล้ายกับ PTFE ทำให้เป็นที่เข้าใจว่ามีสาเหตุมาจากลักษณะจำเพาะของรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เรียบ (Smooth molecular profile) หรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ [2], [48] แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการสั่นไถ่ของ PTFE HDPE และ UHMWPE มีอิทธิพลมาจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Static coefficient of friction) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic coefficient of friction) ประมาณ 50% [2], [49] เนื่องจากในช่วงแรกของการเริ่มต้นการสั่นไถ่มีความจำเป็นต้องใช้แรงที่สูงกว่าเป็นพิเศษสำหรับการเริ่มก่อตัวเพื่อสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์และถ่ายโอนลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส สำหรับในส่วนของกลไกการถ่ายโอนพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) จะมีลักษณะของการเกิดพฤติกรรมการถ่ายโอนพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นเป็นก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดจากการหลุดออกมาของแผ่นผลึกและเกิดการเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส ขนาดของก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากกลไกการถ่ายโอนพอลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ $1\ \mu\text{m}$ [2], [43] เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่เกิดการสัมผัสมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของฟิล์มของ PTFE ที่ถ่ายโอนลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส ดังนั้นจึงส่งผลให้



รูปที่ 2.11 กลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่ [27]

ประสิทธิภาพการรับภาระของก้อนพอลิเมอร์เป็นการรับภาระของฟิล์ม PTFE ที่มีขนาดเล็ก ลักษณะหรือรูปแบบของการถ่ายเนื้อชั้นฟิล์มพอลิเมอร์นี้ไม่ทำให้ลักษณะจำเพาะของการสึกหรอและความเสียหายของการลื่นไถลสัมผัสดีขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่แสดงพฤติกรรมการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนจะไม่ใช่วัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่มีประสิทธิภาพมากนัก เมื่อไหร่ก็ตามที่วัสดุพอลิเมอร์ลื่นไถลต้านกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆพอลิเมอร์ที่มีการเกาะยึดแนบติดกันอย่างอ่อนแอหรืออ่อนแอกว่า จะเกิดการสึกหรอมากกว่า โดยเกิดการก่อดำเนินถ่ายเนื้อเป็นชั้นฟิล์มบนพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงของการเกาะยึดแนบติดเข้าด้วยกันมากกว่า ซึ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอที่สังเกตพบในวัสดุที่ไม่ใช่พอลิเมอร์ [2], [50]

2.1.4.4 การสึกหรอแบบไตรโบเคมี (Tribochemical wear) การสึกหรอแบบไตรโบเคมีเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การขยายตัวของชั้นฟิล์มถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวต่างๆ ที่มีการสัมผัสกันและสภาพแวดล้อมที่ล้อมรอบหนึ่งในรูปแบบส่วนใหญ่ของการสึกหรอแบบแบบไตรโบเคมีคือ การสึกหรอในลักษณะไตรโบออกซิเดชัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากการเสียดทานเป็นตัวเร่งให้เกิดการขยายปริมาณออกไซด์ฟิล์มโดยออกไซด์ฟิล์มแยกออกจากพื้นผิววัสดุเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจนถึงความหนาวิกฤตกลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.6d กลไกการสึกหรอแบบไตรโบเคมีเกิดจากการขาดหรือแยกตัวออกของสายโซ่พอลิเมอร์และหมู่เคมีที่อยู่บริเวณด้านข้างของสายโซ่หลักและต่อมาจะเกิดการก่อดำเนินของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่การก่อดำเนินของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะและกลายเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาไตรโบออกซิเดชัน (Tribo oxidation) บนพื้นผิวโลหะแล้วถ่ายทอดไปยังพื้นผิวพอลิเมอร์โดยอยู่ในรูปของอนุภาคที่ถ่ายทอดใน

ระดับไมโครและนอกจากนี้ปฏิกิริยาไทรโบเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวขัดขวางการเกาะยึดติดของอนุภาคที่เกิดการถ่ายเทในระดับไมโครกับพื้นผิวสัมผัสของลูกกลิ้ง [2], [51]

2.1.5 ประเภทของพลาสติกพลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

2.1.5.1 Thermosetting เป็นพลาสติกที่เกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อนำไปขึ้นรูป พลาสติกประเภทนี้ ไม่สามารถนำไปหลอม เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ตัวอย่าง เช่น อีพอกซี (Epoxy), ฟีนอลิก (Phenolic), เมลามีน (Melamine)

2.1.5.2 Thermoplastic เป็นพลาสติกที่อ่อนตัว เมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง พลาสติกประเภทนี้ สามารถนำมาหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ ตัวอย่าง เช่น โพลีเอทิลีน (PE), โพลีโพรพิลีน (PP), โพลีสไตรีน (PS), โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) [5]

2.1.6 ทฤษฎีการรีไซเคิลพลาสติก

ในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ

2.1.6.1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ (Primary recycling) เป็นการนำขวดหรือเศษพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกันและไม่มีสิ่งปนเปื้อน ที่เกิดในกระบวนการผลิตหรือขึ้นรูปกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่างๆ [5]

2.1.6.2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ (Secondary recycling) การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด บด หลอม และขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็นหลายเทคนิค คือ [5]

การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) เป็นการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภทและสีมาล้างทำความสะอาดก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกกรีไซเคิล เพื่อนำกลับไปใช้ เป็นวัตถุดิบในการผลิต เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่ แต่พลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งจะมีคุณภาพต่ำลง ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก คือหลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก อนุภาคเล็กๆ หรือเศษกาวทำให้เม็ดพลาสติกกรีไซเคิล มีสีเข้มขึ้นหรือมีความใสลดลง นอกจากนี้ความชื้น ในพลาสติกและความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญ ที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือ เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติกทำให้เม็ดพลาสติกกรีไซเคิล มีสีเหลืองและ มีสมบัติเชิงกลและไทรโบโลยีลดลง ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และมีราคาถูกลง เรื่อย ๆ จนบางครั้งไม่คุ้มต่อการลงทุน [5] [6] [7]



รูปที่ 2.12 การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) [5]

การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical modification) เนื่องจากเม็ดพลาสติกกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติ การขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้น การปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวหรือทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสม ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี [5]

การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Coextrusion and Coinjection moulding) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งของการรีไซเคิลแบบทุติยภูมิซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นๆ เหมือนแซนด์วิช โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดีและมีสีสม่ำเสมอ ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกกรีไซเคิล [5]

2.1.6.3 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิ (Tertiary recycling) การรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน [5]

การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling) เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerisation) ได้มอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูงซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นพลาสติกใหม่ [5]

การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis) โครงสร้างของเพทสามารถเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน เรียกว่า Thermolysis แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และ การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) [5]

แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นเป็น ของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic crude oil) สามารถนำกลับไปใช้ในโรงกลั่นและส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการ[5]

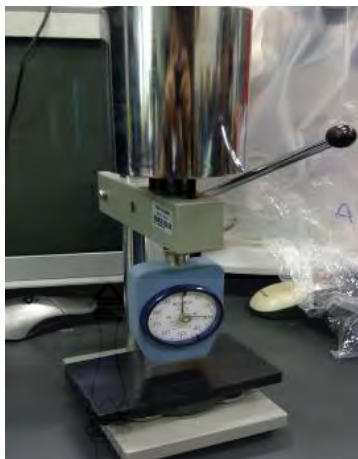
แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของเพทเกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า Pyrolysis ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ Syngas ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง แต่ถ้าทำการแยกก่อนนำมาใช้ในรูปของสารเคมีจะมีมูลค่าสูงขึ้น 2 – 3 เท่า [6]

การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสายโซ่พอลิเมอร์ของเพทจะถูกทำให้แตกหรือขาดออกจากกันด้วยความร้อนและสัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินไปที่ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ จนเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) และเกิดการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล [5]

2.1.6.4) การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ (Quaternary recycling) เป็นการนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ [5]

2.1.7 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกล

2.1.7.1 การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์ สามารถทำได้ 2 แบบขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่าตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆรวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอทิลีน สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้คณะผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D

2.1.7.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบโดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วย เครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 1 kN ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X Plus ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์ คอมโพสิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการ ทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบนความหนาไม่เกิน 7 mm โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงขึ้น ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638

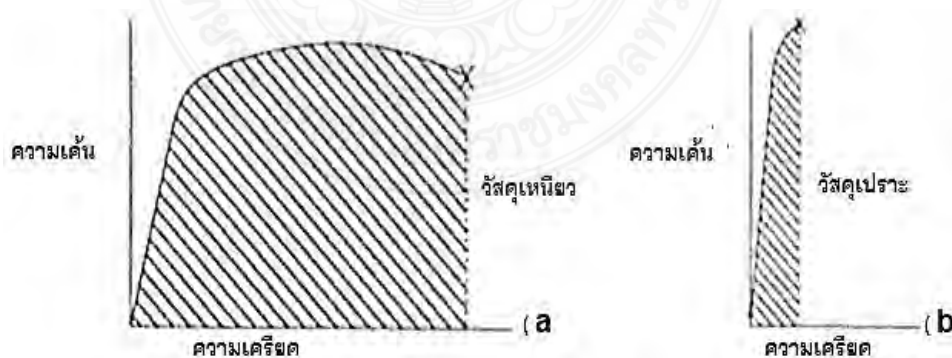


รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบแรงกระแทก GOTECH testing Machines Inc.
โมเดล GT-7045-HML แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM E 23

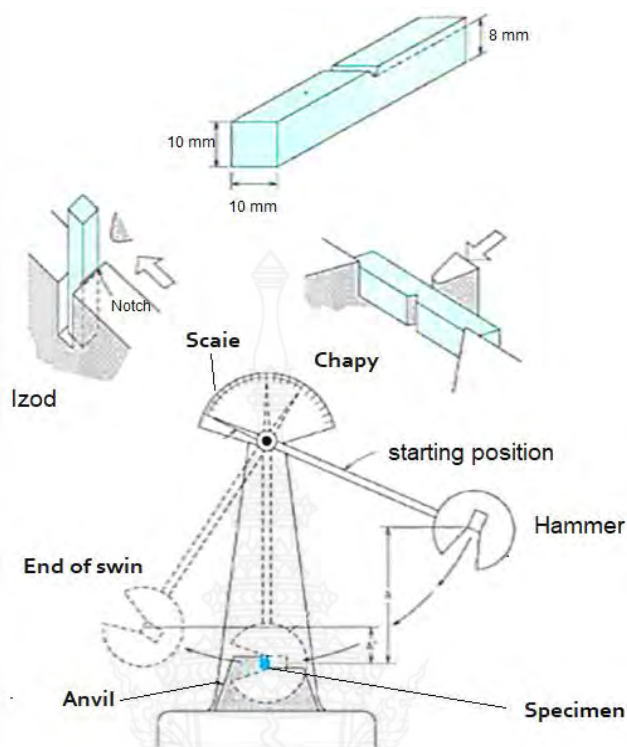
2.1.7.3 การทดสอบแรงกระแทก เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนียวที่ทนต่อการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบโดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงกระแทกยี่ห้อ GOTECH testing Machines Inc. โมเดล GT-7045-HML แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D256 ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [52] ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานบางประเภทวิศวกรจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุเพื่อประเมินโอกาสการแตกหักเสียหายและความปลอดภัยในขณะที่ใช้งานในสภาวะต่างๆ เช่น การใช้งานเหล็กกล้าทนสึกของรถดั้มพ์ที่ต้องรับแรงกระแทกจากการบรรทุกหิน เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนหรือเหล็กสำหรับงานท่อความดันที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.16 (a) Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว และ (b) วัสดุเปราะ [52]

ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรามักจะประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of Toughness ซึ่งกำหนดให้มีความเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น - ความเครียด ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งค่า Modulus of Toughness นี้จะแสดงถึงพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหายวัสดุที่มีความเหนียวสูงกว่าจะใช้พลังงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่สูงกว่าในการทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย วิธีการทดสอบความเหนียวที่นิยมใช้คือ การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อทำการวัดค่า Impact Energy, Impact Transition Temperature (ITT) และศึกษาผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของวัสดุโดยการตีขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐานจนเกิดการแตกหัก จุดประสงค์ในการทำการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic Load) ของวัสดุ สำหรับค่าที่นิยมวัดมากที่สุดในการทดสอบแรงกระแทกคือ ค่า Impact Energy ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก (Dynamic Impact Force) จนเกิดการแตกหัก โดยมีวิธีการทดสอบมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test เครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17

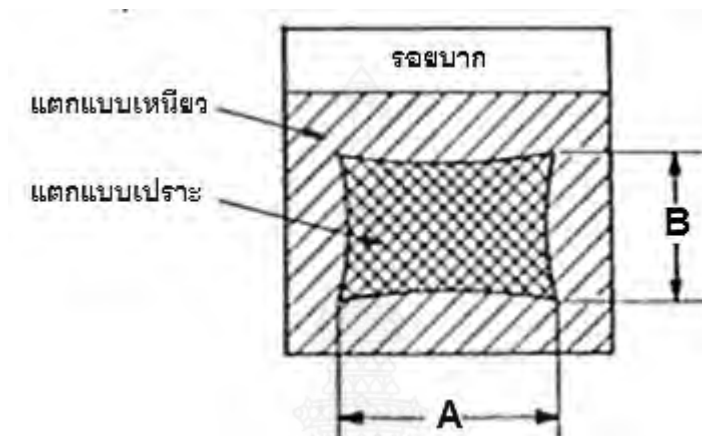
วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกันคือจะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกขึ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบขึ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ขึ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy นั่นเอง มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูลส์ ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบากขึ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีรอยบากอยู่ตรงกลางรอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปругูญแจขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุมีความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจจะเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ถ้านำค่า Impact Energy มาพลอตกับอุณหภูมิจะพบว่ามีอุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact Energy ลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.18 ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact Transition Temperature (ITT) โดยค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะคือ เปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีค่าพลังงานสูงมาเป็นวัสดุ เปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ ค่า Impact energy จะไม่นำมาใช้โดยตรงในการออกแบบแต่มีประโยชน์



รูปที่ 2.17 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [52]

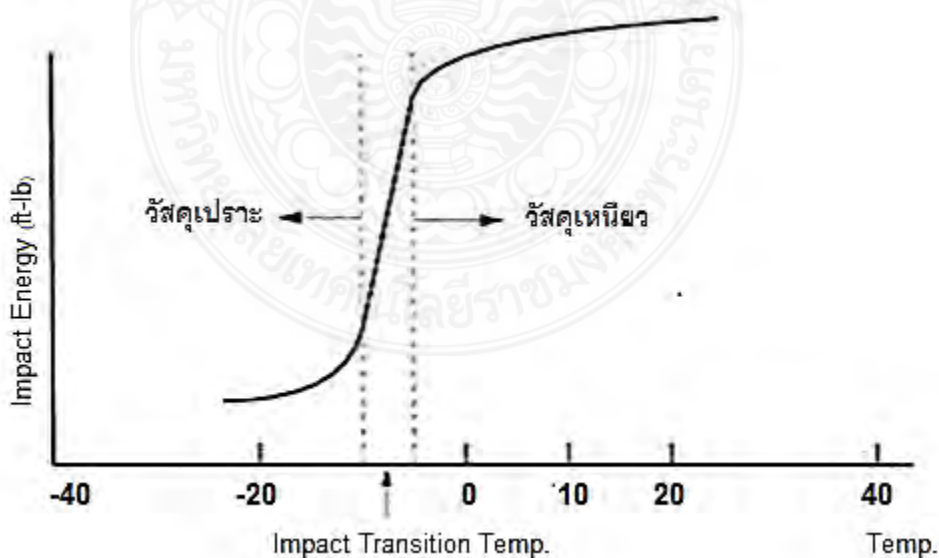
ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุโดยเฉพาะพวกเหล็กที่มีค่า ITT อยู่ใกล้กับอุณหภูมิห้องเราจะต้องระมัดระวัง ไม่ใช้งานวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า ITT ของมัน โดยทั่วไปเราจะกำหนดค่า ITT เป็นค่าเดียว ไม่ใช่ช่วงอุณหภูมิดังที่แสดงในรูป 2.19) โดยวิธีในการกำหนดค่า ITT มีอยู่หลายวิธี เช่น การตรวจสอบผิวรอยแตก (Fracture Surface) ของชิ้นงานที่แตกหักจากการทดสอบแรงกระแทกหรือการกำหนดค่า ITT โดยใช้อุณหภูมิที่ผิวรอยแตกของชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีสัดส่วนของพื้นที่ที่เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle Fracture) กับพื้นที่ที่แสดงการแตกแบบเหนียว (Ductile Fracture) เป็น 50:50 พอดี (ซึ่งมีชื่อเรียกเฉพาะว่า Fracture Appearance Transition Temperature - FATT) สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ กำหนดค่า Impact Energy ค่าหนึ่งขึ้นมาเป็นเกณฑ์ โดยควรจะมีค่ามากกว่าพลังงานที่วัสดุจะได้รับในระหว่างการใช้งาน ถ้าวัสดุใดทดสอบแล้วมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดก็ถือว่าเป็นวัสดุเปราะซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ง่ายจึงไม่ควรจะนำมาใช้งานและกำหนดค่า ITT โดยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบได้ค่า Impact Energy เท่ากับเกณฑ์ที่กำหนดพอดี (ITT ที่กำหนดโดยวิธีนี้เรียกว่า Ductility Transition Temperature) ค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใช้เป็นเกณฑ์ คือ 20 J สำหรับการทดสอบ Charpy V-

Notch (ชิ้นงานมีรอยบากรูปตัว V) ดังนั้นวัสดุที่จะนำไปใช้งานจึงควรมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดหรืออาจใช้ค่า Ductility Transition Temperature ในการกำหนดสภาวะการใช้งาน คือควรจะใช้งานวัสดุในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า Ductility Transition Temperature



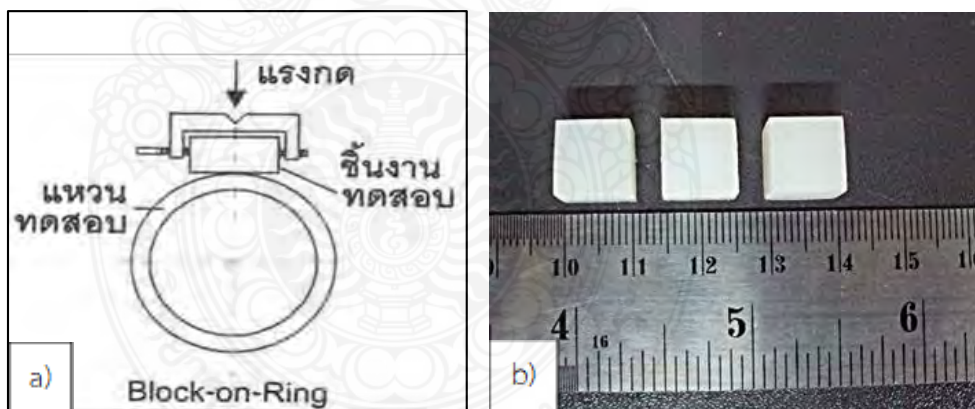
รูปที่ 2.18 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก [49]

เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบจะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกัน ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกัน ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการเลือกใช้มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบ

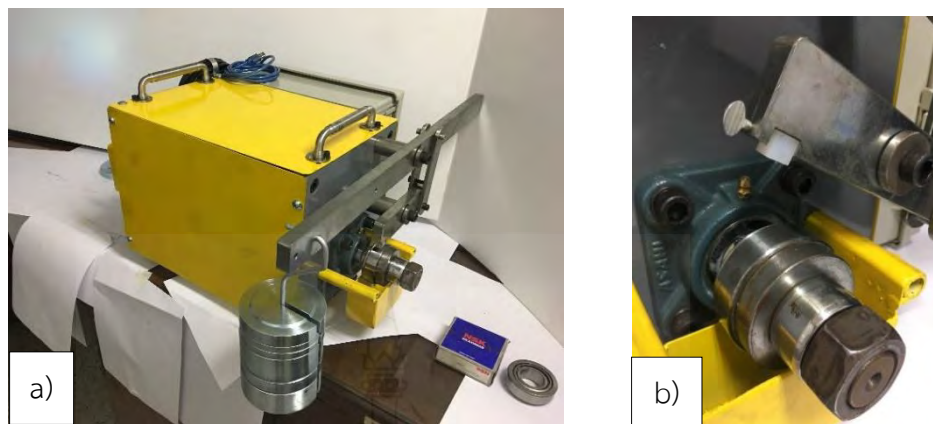


รูปที่ 2.19 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ [52]

2.1.7.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบวิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบดังลักษณะไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.20a โดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ 10x10x10 มิลลิเมตร ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.20b วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน 0.2 μm ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการไทรโบลอยอุตสาหกรรม การ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่น กำหนดความเร็วของการเสียดทาน 0.3 m/sec แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N และทำการทดสอบด้วยระยะเวลา 180 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg และนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดชิ้นทดสอบและระยะทางของการทดสอบ ($\text{Wear rate} = V_{\text{loss}} / N.d$) [2]



รูปที่ 2.20 a) ไดอะแกรมเครื่องทดสอบการสึกหรอ
b) ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ [9]



รูปที่ 2.21 a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ [9]



รูปที่ 2.22 เครื่องชั่งน้ำหนัก a) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224 R สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ และ b) เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.1 g ยี่ห้อ AND รุ่น EK-1200i

2.1.7.5 การทดสอบสมบัติทางไตรโบโลยี เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุ สามารถทำการทดสอบได้ในสภาวะที่มีสารหล่อลื่นและปราศจากสารหล่อลื่น ด้วยเครื่องไตรโบมิเตอร์ (Tribometer) ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เครื่องทดสอบไตรโบมิเตอร์ (Tribometer)

2.1.7.6 การคำนวณและวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบหลังจากชิ้นทดสอบผ่านการทดสอบการสึกหรอสามารถหาได้จากการคำนวณหาอัตราการสูญเสียปริมาตรของชิ้นทดสอบเทียบกับแรงกดชิ้นทดสอบ คูณระยะทางของการทดสอบ ซึ่งสามารถหาคำนวณได้จากสมการที่ (2.1)

$$W = \frac{V_{loss}}{N.d} \quad (2.1)$$

โดย

W = อัตราการสึกหรอ ในหน่วย mm^3/Nm

V_{loss} = ปริมาตรที่สูญเสีย หน่วย mm^3

N = แรงกดชิ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการสึกหรอ หน่วย N

d = ระยะทางที่ทำการทดสอบ หน่วย m

ซึ่ง V_{loss} ได้จากสมการ

$$V_{loss} = V_o - V_f \quad (2.2)$$

โดย

V_o = ปริมาตรชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ

V_f = ปริมาตรชิ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากปริมาตร (V) ของชิ้นทดสอบได้จากสมการ

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.3)$$

ดังนั้น สมการอัตราการศึกษาหรือของขึ้นทดสอบคือ

$$W = \frac{m_o - m_f}{\rho \cdot N \cdot d} \quad (2.4)$$

โดย

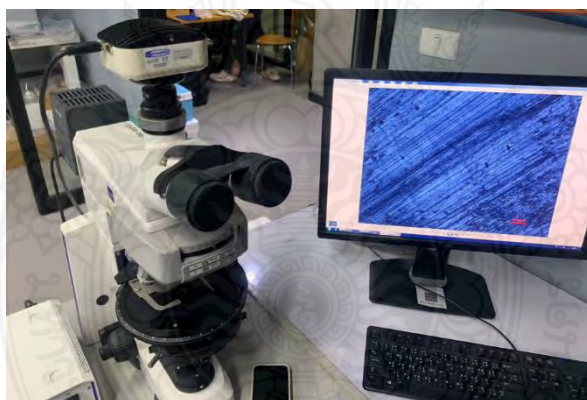
m_o = มวลของขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบการศึกษาหรือ หน่วย g

m_f = มวลของขึ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการศึกษาหรือ หน่วย g

ρ = ค่าความหนาแน่นของขึ้นทดสอบ หน่วย g/cm³

N = แรงกดขึ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการศึกษาหรือ หน่วย N

d = ระยะทางที่ทำการทดสอบ หน่วย mm

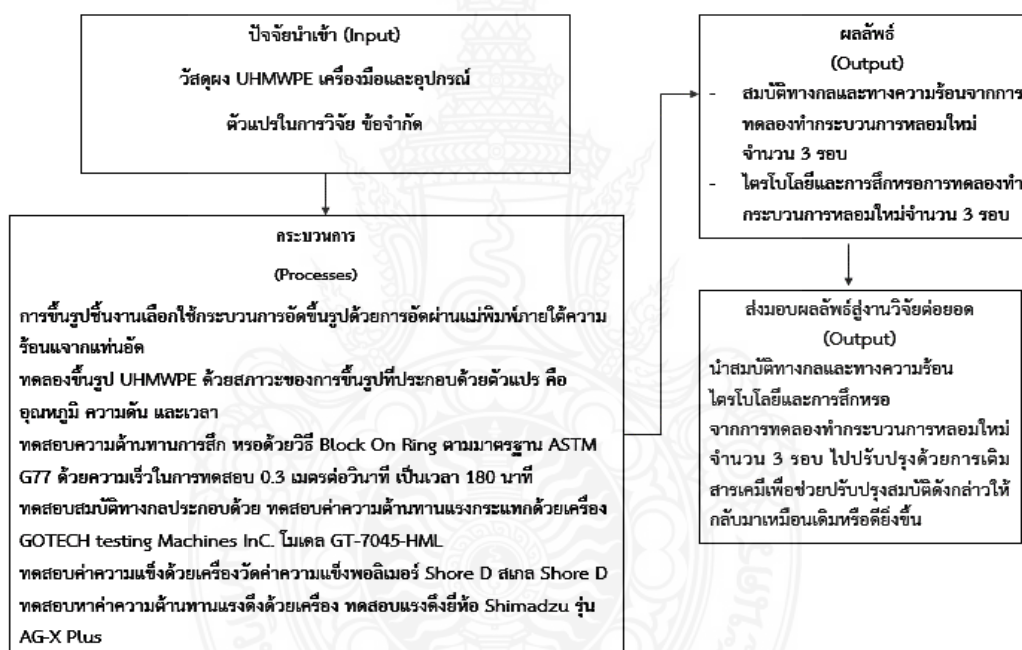


รูปที่ 2.24 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ Thermo Scientific
กำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า

2.1.7.8 กล้องจุลทรรศน์สำหรับงาน Polarization Microscopy และ Material Sciences
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สำหรับศึกษาสมบัติทางกายภาพ พื้นผิวและองค์ประกอบ
ภายใน ตรวจสอบพื้นผิวและสิ่งปนเปื้อนพื้นผิวด้านนอก ชนิดตั้งโต๊ะพร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุ (FESEM
with EDS) ยี่ห้อ Thermo Scientific ประสิทธิภาพสูง มีกำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า เลนส์วัตถุ
เป็นระบบ ICS กำลังขยาย 5X, 10X, 20X, 50X และ 100X ชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพสี เป็นกล้อง Digital
CCD Color

2.2 กรอบการวิจัย

สำหรับกรอบการวิจัย (Conceptual Framework) จะเป็นการวางแผนความคิดของกระบวนการ การทำวิจัยที่จะต้องกล่าวถึงตัวแปรต้นและตัวแปรตามต่างๆ ที่ใช้ในแต่ละกรอบ ซึ่งจะต้องมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันที่จะต้องสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานของทฤษฎีต่างๆ มุ่งเน้นไปที่การทดสอบสมบัติทางกลและและทางไทรโบโลยี โดยกระบวนการเริ่มต้นจากการทำการเตรียมผง UHMWPE ทำการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปหลังจากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงานทดสอบตามลักษณะมาตรฐาน ทดสอบความต้านทานแรงดึง ทดสอบการยืดตัวที่จุดขาด ทดสอบความแข็ง ทดสอบแรงกระแทก และโมดูลัสความยืดหยุ่น จากนั้นนำไปทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลซึ่งจะมีแนวคิดดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กรอบการวิจัย

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

Harsha Raghuram et al [53] ได้ศึกษากระบวนการรีไซเคิลพอลิเมอร์ PE-HD และทดสอบทางกลและไทรโบโลยี โดยใช้อุณหภูมิที่ 180 °C และความดันที่ 50 บาร์ ในการอัดขึ้นรูป และการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึงและการกระแทก การสึกหรอ และรอยขีดข่วน ชิ้นงานจะมีขนาด ความหนา 1.8–1.9 มม. และความหนา 1.1–1.2 มม.ตามมาตรฐาน ISO 527–2-A5 สำหรับชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม. และความหนา 1.2 มม. สำหรับการทดสอบไทรโบโลยีของแต่ละตัวอย่างจะมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 140 × 80 × 2 มม. ผลปรากฏว่า PE-

HD ที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลและขึ้นรูปจำนวน 10 ครั้ง มีกลไกการสึกหรอและรอยสึกหรอที่คล้ายกันกับตัวอย่าง PE-HD บริสุทธิ์และไม่ต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ของ PE-HD บริสุทธิ์ โดยที่วัสดุทั้งหมดมีค่า $\mu < 0.1$ PE-HD มีอัตราการสึกหรอ และ μ คล้ายกับของ PE-UHMW ซึ่งบ่งชี้ว่าการประมวลผลซ้ำหลายครั้งในระหว่างการผลิตไม่ส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางไดรโบลยีของ PE-HD หรือศักยภาพในการนำไปใช้ในการใช้งานด้านไดรโบลยี แสดงให้เห็นถึงค่า Young's modulus E และ elongation at break เพิ่มขึ้น 3–4% และ 3–9% ตามลำดับ สำหรับ PE-HD ที่ผ่านการรีไซเคิลและทดสอบที่ 10 ครั้ง อาจจะไม่เหมาะกับการใช้งานทางวิศวกรรม หลายๆอย่าง

J.J Wu et al [54] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลในการอัดขึ้นรูปผง UHMWPE บริสุทธิ์ Montell Hifax 1900 H ใช้ในทางการแพทย์ โดยอัดเป็นทรงกระบอก 2 ขนาด โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มม หนา 15 มม และ ขนาด ศูนย์กลาง 100 มม หนา 14 มม ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 145-200°C ใช้เวลา 10-90 นาที และทำการวัดความหนาแน่น ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ประเมินสมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึง พบว่าการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 145 °C – 175 °C จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการยึดตัวและปริมาณความเป็นผลึกของวัสดุพอลิเมอร์

งามพรณ ชะโล [55] ได้ทำการทดสอบทดสอบสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบและหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักกับอลูมิเนียมออกไซด์ โดยส่งผลให้สามารถใช้ผลิตล้อรันแฟลท และให้ทราบสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมภายใต้กระบวนการขึ้นรูปล้อรันแฟลทวัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและมีสารเติมแต่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ก้อนวัสดุสำหรับการทดลองประกอบด้วย แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิ เวลา รวมถึงสัดส่วนระหว่างโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับอลูมิเนียมออกไซด์ การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 type I การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลที่ได้คือสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 °C นาน 90 นาที ด้วย Al₂O₃ เกรด HTM 30 ร้อยละ 5 ซึ่งมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมออยู่ในช่วง 2 ถึง 5 μm ผลการทดสอบทางแรงดึงประกอบด้วยความเค้นที่จุดคราก (Yield Stress) เท่ากับ 20.52 MPa, Ultimate Tensile Strength เท่ากับ 29.96 MPa, Breaking Strength เท่ากับ 22.83 MPa, Elongation at Break เท่ากับ 265.8% และ Modulus of elasticity เท่ากับ 784.46 MPa มีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 62 shore D มีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงเท่ากับ 586.8 J/m และมีอัตราการสึกหรอของขึ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยส่วนผสม UHMWPE ผสมกับ Al₂O₃ เกรด HTM-30 ที่ 5% มี

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าอัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.12, 8.66×10^{-11} mm³/N.m, และ 1.2446958 g/cm³

Weston Wood and Wei-Hong Zhong [56] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE กับผงเส้นใยนาโนคาร์บอน (CNF) ที่มีการเคลือบโซเลนถูกนำมาใช้เป็นการเสริมแรงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางกลและไตรโบโลยีของโพลีเอทิลีนที่ระดับการโหลดที่แตกต่างกัน (0.5 wt % และ 3 wt%) ความหนาของการเคลือบโซเลน 2 ประเภท คือ หนา 2.8 นาโนเมตร และ หนา 46 นาโนเมตร บน CNF ที่ถูกออกซิไดซ์ และตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของนาโนคอมโพสิต HDPE/CNF รวมถึงโมดูลัสของ Young ความเค้นสูงสุด ความเครียดที่จุดแตกหัก รวมถึงการทดสอบแรงดึง การทดสอบการสึกหรอ ดำเนินการทดสอบโดยใช้ เครื่องไทรโบมิเตอร์ แบบพินออนดิสก์ ภายใต้สภาวะที่มีการหล่อลื่น มีการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุที่สัมผัสกับลูกเหล็ก ตลอดระยะเวลาการทดสอบการสึกหรอ การเคลือบ CNF ไม่เพียงแต่ลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของนาโนคอมโพสิตเท่านั้น แต่ยังลดอัตราการสึกหรออีกด้วย การเคลือบ CNF ที่หนากว่านั้นพบว่ามีประสิทธิภาพมากกว่า ในการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและยืดอายุความเครียดของการแตกหักเมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลือบ CNF ที่บริสุทธิ์ที่บางกว่า ในบรรดานาโนคอมโพสิตหลายประเภท ชนิดที่การเคลือบ CNF หนากว่า (46 นาโนเมตร) ที่ระดับการโหลด 0.5 % โดยน้ำหนัก ให้ความเครียดสูงสุดที่การแตกหัก ความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอลดลงเกือบ 57.9%

Wenhao li et al [57] ได้ศึกษาลักษณะทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ภายใต้การหล่อลื่น ของน้ำและน้ำเกลือ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานและการสึกหรอ ของ UHMWPE โดยทดสอบจากโหลดที่ใช้และความเร็วการเลื่อนผ่านชิ้นงานที่แตกต่างกันและบันทึกผล วิเคราะห์ผลกระทบของโหลดและความเร็วต่อคุณสมบัติแรงเสียดทานของ UHMWPE ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าภายใต้การทดสอบแบบหล่อลื่นโดยเหลวหยดลงบนชิ้นงาน (ประมาณ 150–170 มล./ชม.) พฤติกรรมไตรโบโลยี ของ UHMWPE นั้นดีกว่าเลื่อนแบบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของ UHMWPE ลดลงมากกว่า 39% และ 10% ตามลำดับ และรูปแบบการหล่อลื่นของ UHMWPE ค่อยๆเปลี่ยนจากการหล่อลื่นแบบอิมเมอร์สเป็นการหล่อลื่นแบบไม่อิมเมอร์สเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหลดและความเร็ว และจากการระเหยของน้ำที่เกิดจากความร้อนจากการเสียดสี จะส่งผลต่อปริมาณของน้ำบนพื้นผิวของ UHMWPE ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงอีกด้วย สำหรับโหลดและความเร็ว ที่ 70 N และ 700 รอบ/นาที จะทำให้เกิดค่าวิกฤตมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการหล่อลื่นแบบน้ำเกลือ จะมีคุณสมบัติต้านการเสียดสีของ UHMWPE จะดีกว่าการหล่อลื่นแบบน้ำ เนื่องจากในน้ำเกลือมีเม็ดเกลือที่ตกตะกอน มีลักษณะเป็นลูกบอล ผลการศึกษาการหล่อลื่นแบบน้ำเกลือนั้นเหนือกว่าการหล่อลื่นด้วยน้ำ ที่ความเร็วสูง ความต้านทานการสึกหรอ

พื้นผิวแสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอของ UHMWPE ภายใต้การหล่อลื่นด้วยน้ำเกลือจะมีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าการหล่อลื่นแบบน้ำ ถึง 9% ที่โหลด 110 นิวตัน ความต้านทานต่อการสึกหรอของ UHMWPE โดยใช้การหล่อลื่นแบบน้ำเกลือ นั้นดีกว่าการหล่อลื่นแบบน้ำ ที่ความเร็วสูง อัตราการสึกหรอของ UHMWPE ภายใต้การหล่อลื่นแบบน้ำเกลือต่ำกว่า 10% ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที ซึ่งดีกว่าการหล่อลื่นแบบน้ำด้วยความเร็วสูง

Taku aoike et al [58] ได้ศึกษาลักษณะทางไตรโบโลยีของแผ่น โพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ(UHMW-PE) ที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130–190 °C ภายใต้ความดัน 1.6 MPa แผ่นที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 °C จะได้ความเป็นผลึกสูงสุด แต่ความเป็นผลึกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเกิน 150 °C และการศึกษาความสัมพันธ์แรงเสียดทาน โดยใช้เครื่องทดสอบแรงเสียดทานแบบ บอลออนดิสก์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานจะลดลงตามจำนวนการหมุนที่เพิ่มขึ้น ในระยะแรกของการวัดโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิการขึ้นรูป ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในสภาวะคงตัวคือ 0.04 สำหรับงานขึ้นรูปที่ 130 °C และเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 150–190 °C จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในสภาวะคงที่ที่ 0.065 เสมอ

Alejandra M. Ventura et al [59] ได้ศึกษาพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ที่เสริมด้วยเส้นใยบริสุทธิ์ (VCF) และเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล (RCF) และทดสอบสมบัติทางกลและไตรโบโลยี ภายใต้สภาวะที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำ พบว่าตัวอย่างที่มี RCF 30% โมดูลัสของ Young ดีขึ้น 208%, ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 105% และความแข็ง 146% เมื่อเปรียบเทียบกับ UHMWPE บริสุทธิ์ สำหรับคอมโพสิต CF 10% สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้สูงสุดถึง 62 % และอัตราการสึกหรอ 32 % ผลลัพธ์ของโครงการนี้แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิต ที่มีเส้นใยรีไซเคิลมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับวัสดุบริสุทธิ์ และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ประเมินมีความเป็นไปได้ในการประหยัดเงิน

Weston Wood and Wei-Hong Zhong [60] มีความต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นพิเศษ (UHMWPE) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานด้านชีวการแพทย์ ซึ่งผู้รับการเปลี่ยนข้อต่อมักจะประสบปัญหา จากการเสื่อมสภาพก่อนกำหนด ซึ่งเทคโนโลยีคอมโพสิต โดยทั่วไปเป็นตัวเลือก สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ตาม UHMWPE ก็มีความหนืดสูงมากและการประมวลผลของวัสดุผสมจำนวนมากนั้น จำกัอยู่ที่การผสมแบบแห้งก่อนการอัดขึ้นรูปทำให้การกระจายตัวของฟิลเลอร์แย่มากและคาดเดาไม่ได้ ในการศึกษา Carbon nanofiber (CNF)–UHMWPE คอมโพสิตถูกจัดทำขึ้นโดยการผสมละลายช่วยด้วยน้ำมันพาราฟิน พาราฟินช่วยการผสมแบบละลายนั่นส่งผลให้การกระจายของฟิลเลอร์ดีขึ้นอย่างมากเมื่อทำการโหลดต่ำ เมื่อทำการผสมเทียบกับวิธีการประมวลผลทั่วไปของ UHMWPE อย่างไรก็ตามการกระจายตัวที่โหลดสูงเริ่มแรกไม่เป็นที่น่าพอใจต่อนั้นความเข้มข้นของน้ำมันพาราฟินก็ถูกปรับให้เหมาะสมและให้ผล

เป็นคอมโพสิต UHMWPE สุดท้ายได้รับการปรับปรุงการทดสอบการสึกหรอที่การโหลดต่ำ 1 wt.% ส่งผลให้ปริมาณพาราฟินที่เหมาะสมและคุณสมบัติการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นที่ 35 vol.% UHMWPE ไปจนถึงพาราฟินซึ่งเป็นชั้นสุดท้ายคอมโพสิตให้ผลผลิตสูงกว่าที่พบในวรรณกรรมโดยใช้เทคนิคการประมวลผลที่คล้ายกัน

Wang Shibo , Ge Shirong, [61] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงดันแม่พิมพ์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันของแม่พิมพ์ มีผลต่อสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมทาง Tribological ตัวอย่างพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ถูกเตรียมด้วยความดัน 3 ระดับที่ 10 MPa, 15 MPa และ 20 MPa จากนั้นตัวอย่างเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการวัดความแข็ง การทดสอบแรงเสียดทาน และการทดสอบการเจาะ และ ศึกษาพฤติกรรมการเสียดสีและการสึกหรอ ผลการทดลองระบุว่าแรงกดในการขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมของไตรโบโลยีและตัวอย่าง UHMWPE ที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 15 MPa จะได้รับค่าความแข็งรวมสูงสุดถึง 28.5 MPa ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานสูงถึง 3.41 และแรงทำลายการเจาะเพิ่มขึ้น ถึง 201.6 N และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตัวอย่าง UHMWPE สามตัวอย่าง ที่ผลิตที่ความดัน 10 MPa , 15 MPa และ 20 MPa จะมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.025 สำหรับการทดสอบการสึกหรอที่ 10,000 รอบการสูญเสียมวลต่ำสุดที่ 0.93 mg. ไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจนในการสึกหรอสำหรับตัวอย่าง UHMWPE จากแรงกดในการขึ้นรูปทั้ง 3 ระดับ ขนาดอนุภาคการสึกหรอ ที่ประมาณ 8 μm



บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินการวิจัยที่ประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัย ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ หลักการวิเคราะห์สมบัติทางกลและไทรโบโลยี ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง ยิงยวด UHMWPE ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและไทรโบโลยี โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดขึ้นรูปผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE การทดสอบสมบัติทางกลและไทรโบโลยี จากวารสารวิชาการและวิจัย หนังสือ อินเทอร์เน็ต และสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรต่างๆ

3.1.1.2 การกำหนดตัวแปร ระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงาน

3.1.1.3 จัดหาซื้อวัสดุผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE

3.1.1.4 วิเคราะห์อนุภาคผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงด้วยเครื่อง SEM และ XRD เช่น องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ ขนาดอนุภาคผง

3.1.1.5 สร้างแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาด 80 x 100 x 50 mm สำหรับการขึ้นรูปผงให้เป็นแผ่นชิ้นงาน

3.1.1.6 ทำการอบไล่ความชื้นด้วยความร้อน ตู้อบลมร้อนและการอบผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE เพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลา 0.5 ชั่วโมง

3.1.1.7 ทำการอัดขึ้นรูปผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ด้วยเครื่องอัด Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 80 x 100 x 50 mm ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C และบ่มชิ้นงานนาน 3 ชั่วโมงด้วย เครื่องอัดเข้าพอลิเมอร์

3.1.1.8 ทำการให้ความร้อนซ้ำครั้งที่ 1 ในแม่พิมพ์ที่อัดขึ้นรูป ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C และบ่มชิ้นงานนาน 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอัดเข้าพอลิเมอร์

3.1.1.9 นำชิ้นงานทดสอบมาตัดตามลักษณะการทดสอบ

3.1.1.10 ทำการทดสอบสมบัติทางกลและไทรโบโลยีของ พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุล

สูง UHMWPE

3.1.1.11 วิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกลและไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีน

น้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE

3.1.1.12 ทำการอัดขึ้นรูปผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ด้วยเครื่องอัด Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 80 x 100 x 50 mm ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมงด้วย เครื่องอัดแบบพอลิเมอร์

3.1.1.13 ทำการให้ความร้อนซ้ำครั้งที่ 1 ในแม่พิมพ์ที่อัดขึ้นรูป ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอัดแบบพอลิเมอร์

3.1.1.14 ทำการให้ความร้อนซ้ำครั้งที่ 2 ในแม่พิมพ์ที่อัดขึ้นรูป ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอัดแบบพอลิเมอร์

3.1.1.15 ทำการตัดชิ้นงานทดสอบตามลักษณะการทดสอบ

3.1.1.16 ทำการทดสอบสมบัติทางกลและไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE

3.1.1.17 ทำการอัดขึ้นรูปผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ด้วยเครื่องอัด Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 80 x 100 x 50 mm ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอัดแบบพอลิเมอร์

3.1.1.18 ทำการให้ความร้อนซ้ำครั้งที่ 1 ในแม่พิมพ์ที่อัดขึ้นรูป ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมงด้วย เครื่องอัดแบบพอลิเมอร์

3.1.1.19 ทำการให้ความร้อนซ้ำครั้งที่ 2 ในแม่พิมพ์ที่อัดขึ้นรูป ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอัดแบบพอลิเมอร์

3.1.1.20 ทำการให้ความร้อนซ้ำครั้งที่ 3 ในแม่พิมพ์ที่อัดขึ้นรูป ภายใต้ความดัน 5 Mpa ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอัดแบบพอลิเมอร์

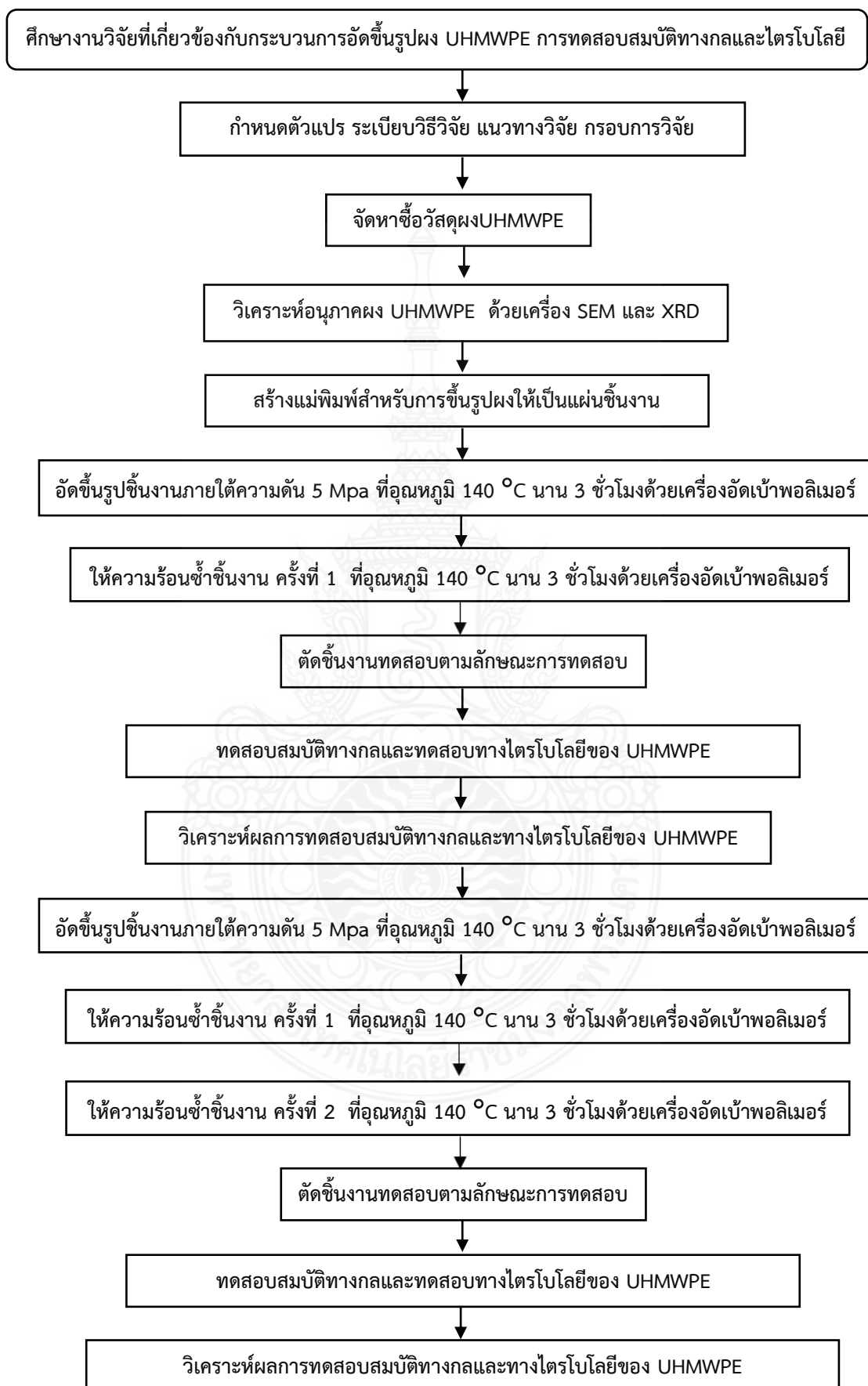
3.1.1.21 ทำการตัดชิ้นงานทดสอบตามลักษณะการทดสอบ

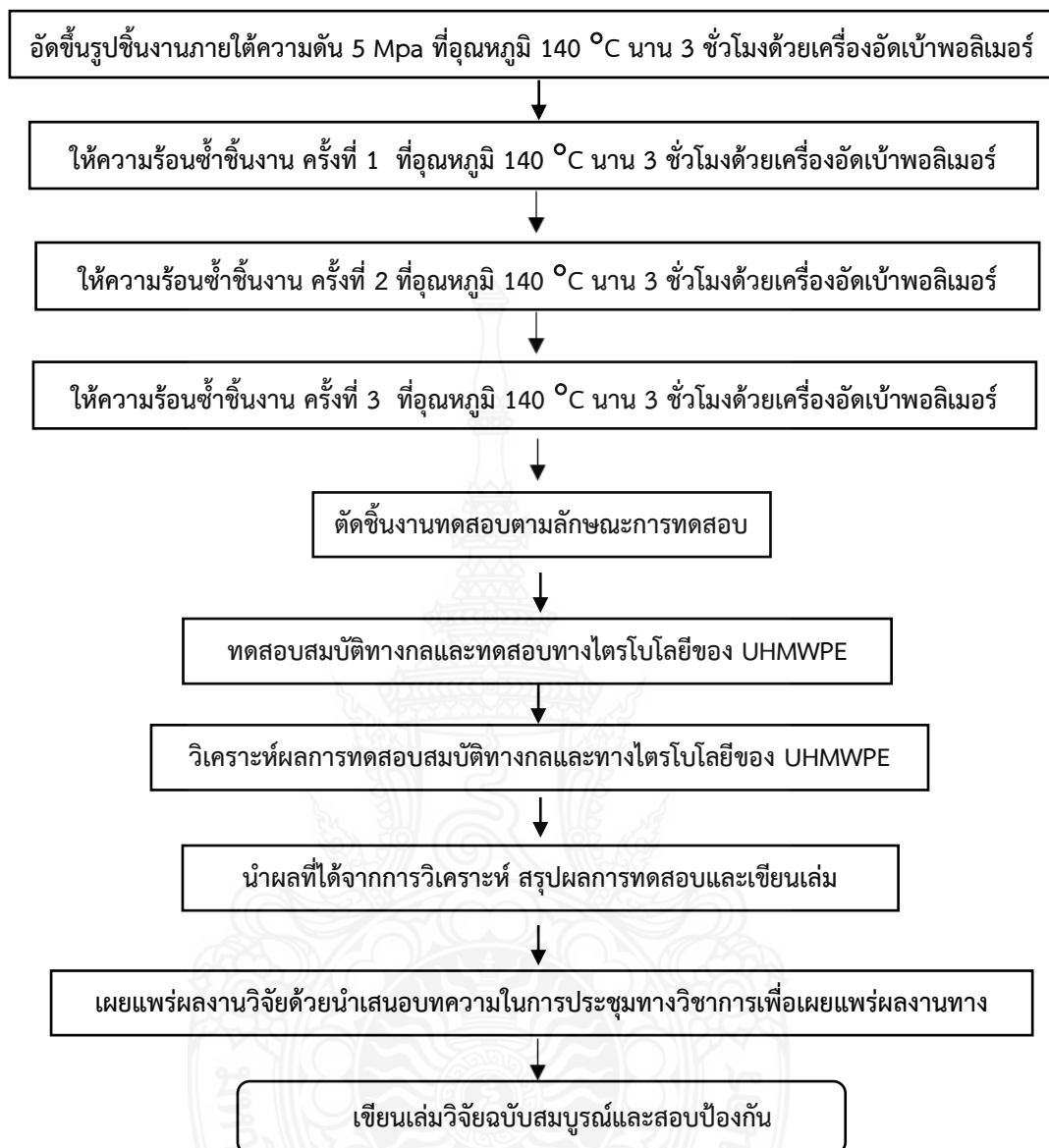
3.1.1.22 ทำการทดสอบสมบัติทางกลและไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE

3.1.1.23 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปผลการทดสอบ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.24 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการ

3.1.1.25 สอนป้องกันวิทยานิพนธ์





รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

วัสดุผง UHMWPE U511 เป็นพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นพิเศษ พร้อมตัวกันการกัดกร่อน (CS) ในรูปแบบผงโดยมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 5.5 ล้านกรัมต่อโมล มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 125 μm น้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากให้คุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์หลายประการ รวมถึงความต้านทานต่อการเสียดสีสูง ความต้านทานแรงกระแทก และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ของบริษัท IRPC Public Company Limited ประเทศไทย ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของ UHMWPE U511

Properties	Unit	Value
Density	g/cm ³	0.93
Bulk density	g/cm ³	≥ 0.40
Intrinsic viscosity [η]	ml/g	2300
Average molecular weight (cal.)	g/mol	5.5 × 10 ⁶
Average particle size, X50	μm	150
Tensile strength at yield	MPa	22
Tensile strength at break	MPa	35
Ultimate elongation	%	≥ 300
Izod impact strength	J/m	NB
Hardness	Shore D	63
Melting temperature (10°C/min)	°C	130 – 135
Vicat softening point (1Kg)	°C	125 – 128

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัยมีดังนี้

3.1.3.1 เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.1 g ยี่ห้อ AND รุ่น EK-1200i และเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224

3.1.3.2 ตู้บลมรอน (ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L)

3.1.3.3 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ประกอบด้วยแม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูป และ เครื่อง Compression press เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมขึ้นทดสอบซึ่งประกอบด้วยเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับตัดแต่งขึ้นทดสอบได้ขนาดตามที่ต้องการได้แก่ เครื่องขัดเตรียมผิวชิ้นงานจาก Metaserv 250 Grinder-Polisher เครื่องตัดตัวอย่างชิ้นงาน เลื่อยสายพาน เครื่องกัด และกระดาษทรายสำหรับขัดเตรียมขึ้นทดสอบ

3.1.3.4 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านแรงดึงยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X เครื่องทดสอบแรงกระแทกยี่ห้อ GOTECH testing Machines Inc. โมเดล GT-7045-HML และเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore D

3.1.3.5 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีการ Block on ring

3.1.3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ Thermo Scientific กำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า

3.2 การดำเนินการเตรียมผงวัสดุ UHMWPE

ขั้นตอนการเตรียมผง UHMWPE สำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองดังนี้

3.2.1 ชั่งน้ำหนักผง พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ด้วยปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมผงและการชั่งน้ำหนักผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg



รูปที่ 3.3 นำผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE เข้าตู้อบลมร้อน

3.2.2 เทผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ใส่ในถาดและนำไปเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาประมาณ 0.5 ชม ดังแสดงในรูปที่ 3.3

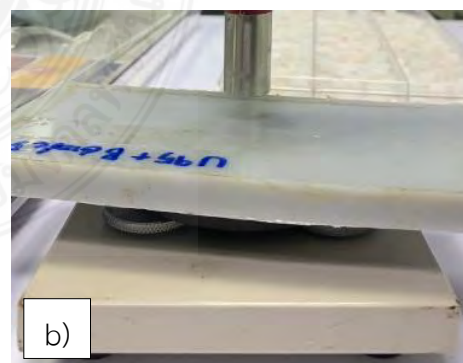
3.3.3 หลังจากที่ทำกรอบแห้งแล้วจะได้สารประกอบผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE ที่ทำการอบแห้งแล้ว

3.3 การอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ขนาดต่างๆ

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE หลังจากผ่านการอบแห้งแล้วจะนำไปทำการอัดขึ้นรูปทันทีเพื่อป้องกันไม่เกิดการรวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศที่ทำให้ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE เกิดความชื้น ทำการอัดด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด $80 \times 100 \times 50$ mm ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a) ด้วยเครื่อง Compression press ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.6 ของห้องปฏิบัติการวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิต หน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมีความหนาประมาณ 10 mm ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5 (b)



รูปที่ 3.5 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด $80 \times 100 \times 50$ mm



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ [2]

3.4 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล

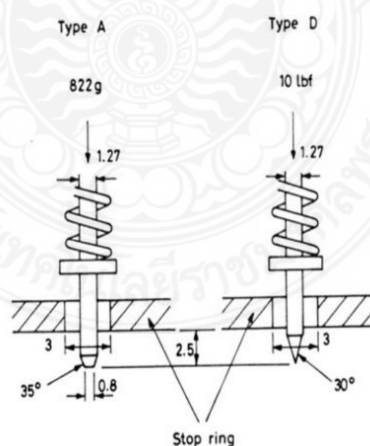
3.4.1 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

ในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของวัสดุซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบ จะไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (Relative term) การทดสอบความแข็งสำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมทำการทดสอบโดยทั่วไปสามารถทำการทดสอบได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพอลิเมอร์หรือพลาสติกที่มีลักษณะแข็งหรือมีความแข็งสูง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิด ต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอทิลีน หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell คือ การวัดความลึกของลูกบอล เหล็กกล้าที่ใช้เป็นตัวกดวัด (Indenter) โดยในการทดสอบจะมี 3 ขั้นตอนหลักๆ โดยเริ่มจากการวางน้ำหนักกรอง (Minor load) ประมาณ 10 kg ลงบนลูกบอลเหล็กกล้าเพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบจากนั้นจึงทำการ Set zero (ภายในเวลา 10 วินาที มิฉะนั้นค่าความแข็งอาจจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความเป็น Viscoelastic ของพอลิเมอร์) หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (Major load) ให้กับลูกบอลเหล็กกล้าและทำการกดแช่เป็นเวลานาน 15 นาที เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (Recover) แล้วจึงอ่านค่าความแข็งจากสเกลของเครื่องวัดโดยจะมีหน่วยกำกับเป็นสัญลักษณ์ R, L, M, E อยู่ข้างหลังตัวเลข โดยขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงที่ใช้กดตั้งรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ

Scale	Major load (kg)	Diameter of indenter (in)
R	60	1/2
L	60	1/4
M	100	1/4
E	100	1/8

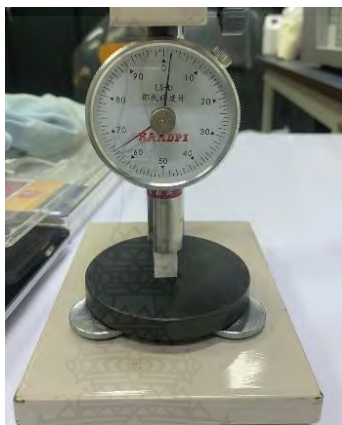
สเกล R และ L จะใช้สำหรับพลาสติกที่มีค่าความแข็งต่ำสำหรับในส่วนของสเกล M และ E จะใช้สำหรับพลาสติกที่มีความแข็งสูงโดยในแต่ละสเกลที่ใช้ในการทดสอบนั้นถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 จะถือว่าความไว (Sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไปและจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Durometer การใช้ Durometer วัดความแข็งพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบกดเข็มหัววัดลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของเข็มหัววัด (ถึงจุด Stop ring) แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ (เช่นประมาณ 10 วินาที) ซึ่งตัวเลขที่อ่านค่าได้จาก Durometer นี้จะไม่มีหน่วย Durometer ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ Shore A และ แบบ Shore D ดังลักษณะของวิธีการที่แสดงในแผนภาพในรูปที่ 3.7-3.8 ซึ่งวิธีการทดสอบความแข็ง Durometer ทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด โดยทั่วไปแล้ว Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่าในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย [2]



รูปที่ 3.7 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้ ผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยแรงกดหรือน้ำหนักที่กดลง

บนชั้นทดสอบเท่ากับ 4550 กรัม การทดสอบทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ วิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D
และลักษณะการทดสอบความแข็ง ตามมาตรฐาน ASTM D2240

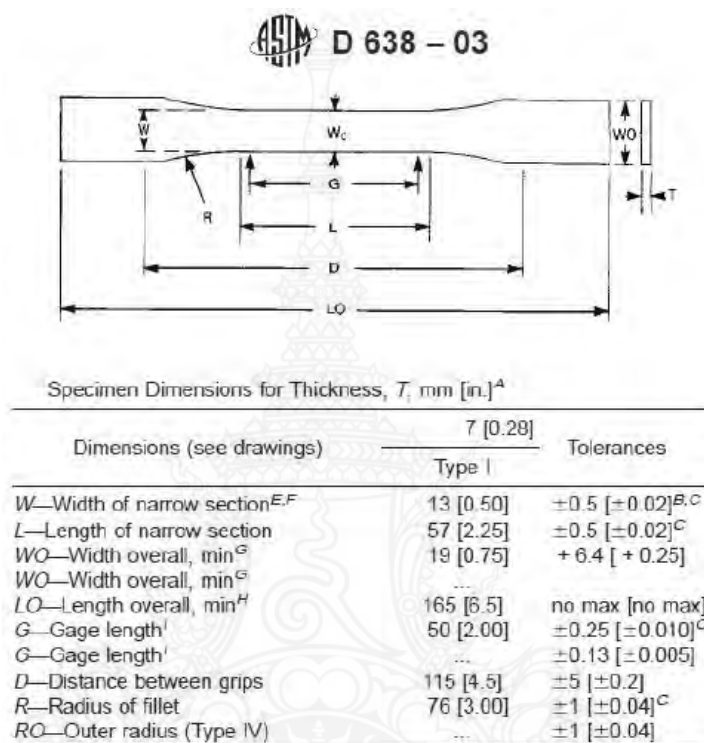
3.4.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X Plus ที่มีขนาดแรงดึงสูงสุด 5 kN ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ วิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638

โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 type I ซึ่งมีลักษณะกำหนดค่าพิกัดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในการทดสอบแรงดึงกำหนดความเร็วในการดึงทดสอบเท่ากับ 50 mm/min ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบนความหนาไม่เกิน 7 mm มีลักษณะแสดงในรูปที่ 3.11

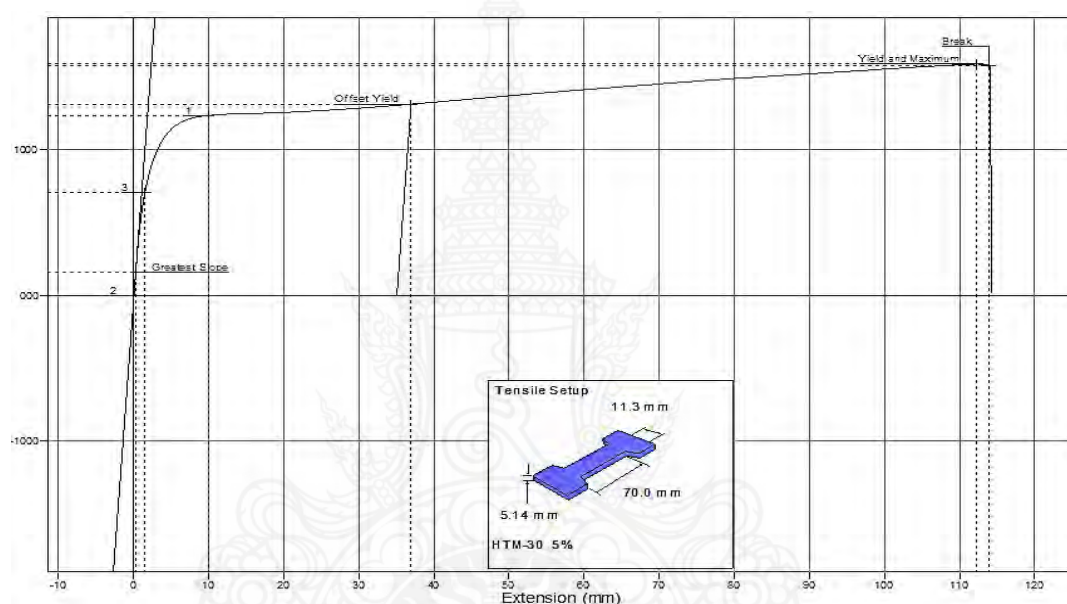


รูปที่ 3.10 ค่าพิกัดของส่วนต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638

หลังจากนั้นจึงทำการดึงขึ้นทดสอบให้แยกออกจากกันด้วยความเร็วของการดึงคงที่เท่ากับ 50 mm/min การทดสอบแรงดึงจะต้องเฝ้าติดตามและบันทึกแรงดึง (F) อัตราการยืดตัวของวัสดุ (ΔL) แล้วทำการแปลงกลับเป็นค่า Engineering stress และ strain ดังตัวอย่างกราฟผลการทดสอบแรงดึงที่แสดงในรูปที่ 3.12 ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามารถนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่าความเค้นคราก (Yield strength, σ_y) ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, σ_u) ความเค้น ณ จุดแตกหัก (Breaking strength, σ_b) และความยืด ณ จุดแตกหัก (Elongation at break, %E)



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

3.4.3 การทดสอบแรงกระแทก

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้เป็นการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM E 23 โดยทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกด้วยเครื่อง GOTECH testing Machines Inc. โมเดล GT-7045-HML ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงกระแทก GOTECH testing Machines Inc.

โมเดล GT-7045-HMLแบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM E 23

3.4.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตรา การสึกหรอ ของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block on Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบ ดังลักษณะเครื่องที่แสดงในรูปที่ 2.21 ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ ของห้องปฏิบัติการไทรโบโลยีอุตสาหกรรมการผลิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะ วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ โดยกำหนด ขนาด ความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 10x10x10 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีลักษณะแสดงใน รูปที่ 2.21 และ 3.16 ซึ่งพื้นผิวของชิ้นทดสอบถูกเตรียมขึ้นด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 พื้นผิววงแหวนมีความหยาบเท่ากับ 0.2 ไมครอน ทำจากเหล็กกล้าแข็ง (AISI 52100) ที่มีขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลาง 62 มิลลิเมตร ที่ผ่านการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 HRC แรงที่ใช้กดลงบนชิ้นทดสอบ เท่ากับ 150 นิวตัน เวลาที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 180 นาที ความเร็วของการหมุนวงแหวนเท่ากับ 300 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทางของการหมุนทดสอบ 5,000 เมตร โดยทำการทดสอบภายใต้ สภาวะของการทดสอบแบบแห้ง สำหรับในส่วนของการวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบนั้น วิเคราะห์จากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ ด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดด้วยทศนิยม 4 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 3.14 คำนวณ อัตราการสึกหรอด้วยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบเพื่อหาปริมาณที่สูญเสีย และนำไปหารกับผลคูณ ระหว่างแรงที่ใช้ในการกดบน Block กับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ [9]



รูปที่ 3.14 เครื่องชั่งน้ำหนัก Shimadzu digital รุ่น ATX224 ความละเอียด 0.1 mg (0.0001 g) สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของขึ้นทดสอบ

หลังจากขึ้นทดสอบผ่านการหมุนทดสอบจนได้ระยะทาง 5,000 เมตร ตามที่กำหนดแล้ว นำขึ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบและฟิสิกส์จับยึดขึ้นทดสอบไปทำการบันทึกภาพหลักฐานรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการสึกหรอ ดังตัวอย่างการถ่ายภาพรอยสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งลักษณะรอยสึกหรอของขึ้นทดสอบหลังจากการทดสอบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ชุดอุปกรณ์บันทึกภาพรอยสึกหรอของขึ้นทดสอบ



รูปที่ 3.16 ลักษณะการสีกหรือของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ

3.4.4.1 ขั้นตอนการทดสอบการทดสอบการสีกหรือ

ขั้นตอนการทดสอบการทดสอบการสีกหรือประกอบด้วย

3.4.4.1.1 เตรียมชิ้นทดสอบทดสอบการสีกหรือให้ได้ขนาด $10 \times 10 \times 10$

มิลลิเมตร

3.4.4.1.2 นำชิ้นทดสอบทดสอบการสีกหรือมาชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ยี่ห้อ Shimadzu digital รุ่น ATX224

3.4.4.1.3 จับยึดชิ้นทดสอบด้วยฟิกเจอร์จับยึดชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบการสีกหรือ

3.4.4.1.5 นำฟิกเจอร์ที่ได้จับยึดชิ้นทดสอบมาจับยึดเข้าเครื่องทดสอบการสีกหรือ ภายใต้แรงกดชิ้นทดสอบ 150 นิวตัน

3.4.4.1.6 เปิดเครื่องทดสอบให้ทำการหมุนเสียดสีชิ้นทดสอบด้วยความเร็วของการเสียดทาน 0.3 เมตรต่อวินาที เป็นระยะทาง 5000 เมตร

3.4.4.1.7 นำฟิกเจอร์จับยึดชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ และบันทึกภาพรอยสีกหรือ

3.4.4.1.8 นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นทดสอบ

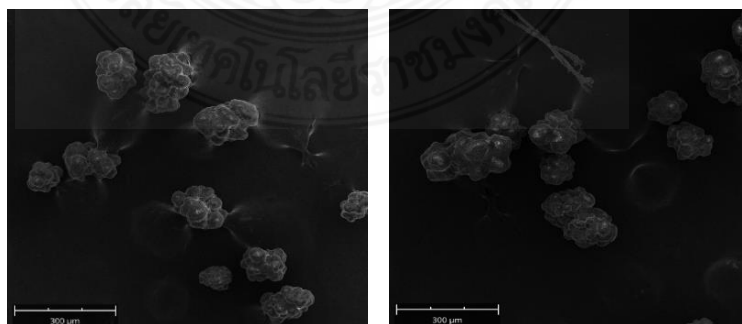
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำการดำเนินการด้วยกระบวนการที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วยการวิเคราะห์ผลของการทดสอบสมบัติทางกลและผลของการทดสอบไตรโบโลยีของผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE โดยพิจารณาจากกระบวนการนำมาใช้ใหม่ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและไตรโบโลยี ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยอื่นได้ต่อไป โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ XRD Pattern สำหรับ UHMWPE

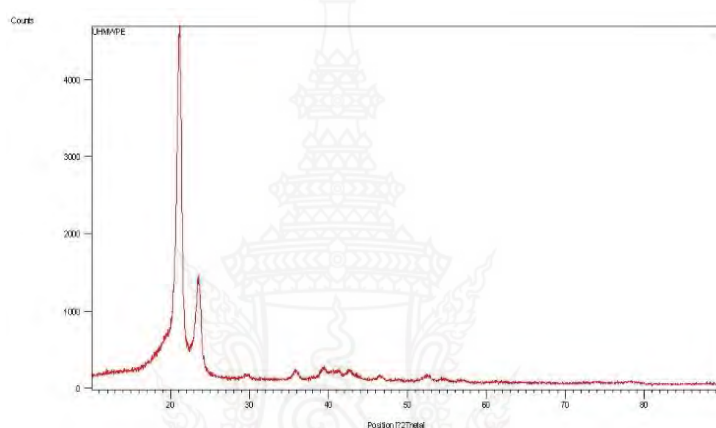
นำผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเล็กมาก ๆ ของตัวอย่างทางชีวภาพ และยังได้ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผงวัสดุทดสอบด้วย ชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX (IE-350) จากนั้นนำชิ้นงานทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) : ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Miniflex ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าโครงสร้างผลึกของสารนั้นมีโครงสร้างแบบใด หรือเป็นวัสดุอะไร โดยเครื่องวิเคราะห์ทั้งหมดที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคชิ้นวัสดุทดสอบของ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



รูปที่ 4.1 รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 และ 3 มิติ ดังรูปที่ 4.1 ผลลัพธ์ที่ได้คือการยืนยันว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็น พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE อย่างแท้จริง

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าจากการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เข้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ผลดังรูปคือ อนุภาคพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดจะมีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆและมีพังผืดยึดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มีขนาดกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน



รูปที่ 4.2 XRD Pattern ของ UHMWPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากรูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer : (XRD) ได้บ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างด้วย XRD Pattern ของ UHMWPE ได้อย่างชัดเจนเป็น รูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล รูปหกเหลี่ยม

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

4.2.1 การทดสอบการกระแทก

ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM E23 โดยทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกด้วยเครื่อง GOTECH testing Machines Inc. โมเดล GT-7045 - HML มีขนาดชิ้นงานทดสอบ ความกว้างxความหนา โดยประมาณเท่ากับ 2.5x10 มิลลิเมตร มีความลึกของรอยบาก 2 มิลลิเมตร ที่พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE เป็นวัสดุหลัก ผ่านการทดสอบแรงกระแทกด้วยชิ้นงานทดสอบชุดละ 5 ชิ้นทดสอบ จากนั้นทำการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ และทำการทดสอบทุกครั้งที่มีการขึ้นรูป ทำให้ได้ผลการทดสอบคือค่าความทนต่อแรงกระแทก (kJ/m²)

ตารางที่ 4.1 Mechanical properties of UHMWPE recycle

	UHMWPE Pure Recycle 1	UHMWPE Pure Recycle 2	UHMWPE Pure Recycle 3
Yield Strength (MPa),	15-25 (17.34)	13-23 (15.87)	10-20 (12.37)
Ultimate Tensile Strength (MPa),	15-30 (21.64)	14-28 (19.58)	11-25 (16.44)
Elongation at Break (%)	200-400 (230.18)	180-350 (221.46)	150-300 (203.4)
Modulus of elasticity (MPa)	0.6-1.0 Gpa (660.36 MPa)	0.6-1.0 Gpa (640.52 MPa)	0.5-1.0 Gpa (610.58 MPa)
แรงกระแทก (kJ/m ²)	(74.8)	(65.4)	(58.7)
ค่าความแข็ง Shore D	(57)	(58)	(58)
จุดหลอมเหลว	148	148	148
ค่าการนำความร้อน	0.4	0.39	0.39
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	0.1	0.11	0.13
อัตราการสึกหรอ	2.33E-9 mm ³ /N.m	5.23E-8 mm ³ /N.m	7.88E-8mm ³ /N.m
ค่าความหนาแน่น	0.9347636g/cm ³	0.9265436g/cm ³	0.956867g/cm ³

จากตารางที่ 4.1 พบว่า การให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 ครั้งจนถึงจุดหลอมเหลวจะยังส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลงค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Breaking Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of elasticity (MPa) ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกจะยิ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักหรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นลดลงไม่มากนัก หรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ

4.2.2 การทดสอบความแข็ง

การวัดความแข็งที่ถูกต้องจะต้องเลือกการทดสอบให้ถูกต้อง เช่น ในการทดสอบนี้จะเลือกเครื่องวัดความแข็ง Durometer ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสถานะอุณหภูมิ 140 °C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิที่ 180 นาที ใช้การทดสอบแบบ Shore D ที่หัวเข็มมีลักษณะแหลม (หัวเข็มเป็นส่วนสำคัญมากที่จะต้องเลือกให้ถูกต้อง) การวัดความแข็งในหน่วย Shore D นั้นจะวัดความแข็งออกมาด้วยการพิจารณาจาก ระยะของหัวเข็มที่จมลงไปเนื้อวัสดุแล้ว

แปลงค่าออกมาเป็นค่าความแข็งในหน่วย Shore ผลการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 (JIS K 7215 D, ISO R 868 D) ผลของค่าที่เพิ่มขึ้นจะหมายถึงวัสดุนั้นมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 4.2 พบว่าในแต่ละตำแหน่งที่มีการทดสอบค่าจะมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน นั่นคือไม่มีนัยสำคัญในแต่ละจุดที่ทดสอบ และจากการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ พบว่าค่าความแข็งไม่ได้แตกต่างกัน มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 57-58 shore D ซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุดคือ 58 shore D

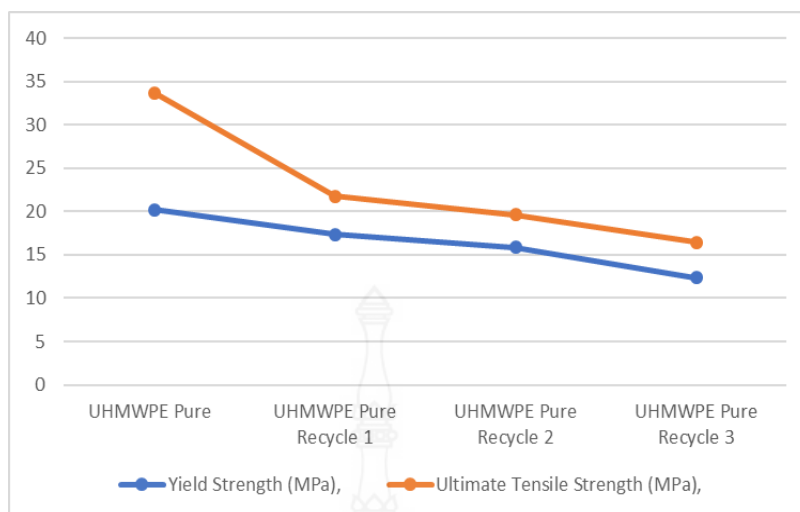
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็ง UHMWPE Pure Recycle 1,2,3

Specimens	Durometer Hardness (Shore D)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE Pure	56	58	57	58	57	57.2	0.83
Recycle 1							
UHMWPE Pure	58	59	58	58	57	58	0.70
Recycle 2							
UHMWPE Pure	58	59	58	57	59	58.2	0.83
Recycle 3							

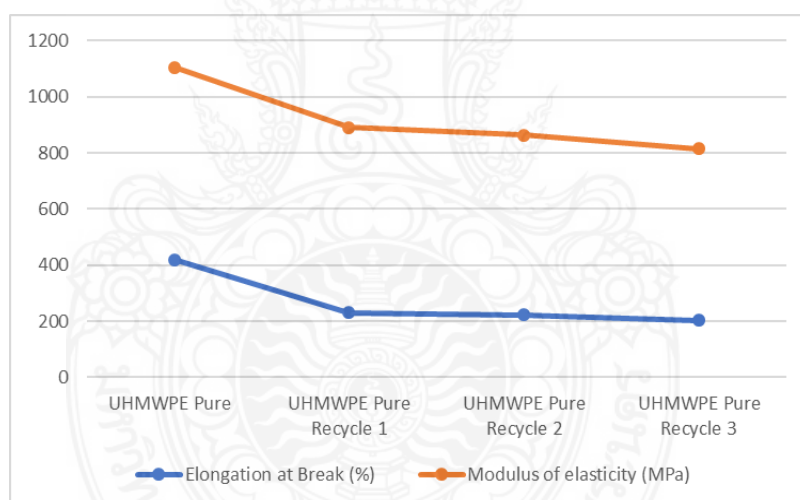
4.2.3 การทดสอบแรงดึง

จากการศึกษาวิเคราะห์ การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ ด้วยการทดสอบแรงดึง ณ ห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร พบว่า ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 140°C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิที่ 180 นาที จะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Breaking Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of elasticity (MPa) ด้วยการเตรียมชิ้นงานทดสอบชุดละ 5 ชิ้นงาน จากการทดสอบพบว่ามีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3 รูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.3 พบว่า การให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบจนถึงจุดหลอมเหลวจะยิ่งส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลงจะทำให้ค่า Yield Strength (MPa) และค่า Ultimate Tensile Strength (MPa) ลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.3 ค่า Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), เปรียบเทียบกับ UHMWPE Purec และ UHMWPE Pure Recycle 1,2,3



รูปที่ 4.4 ค่า Elongation at Break (%), Modulus of elasticity (MPa), เปรียบเทียบกับ UHMWPE Purec และ UHMWPE Pure Recycle 1,2,3

จากรูปที่ 4.4 พบว่า การให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบจนถึงจุดหลอมเหลวจะยิ่งส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลงจะทำให้ค่า Elongation at Break (%) และค่า Modulus of elasticity (MPa) ลดลงอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจาก UHMWPE Pure Recycle 1,2,,3

Specimens	Elongation at Break (%)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE Pure	230.1	230.4	230	230.2	230.2	230.18	0.14
Recycle 1							
UHMWPE Pure	221.4	221.4	221.3	221.5	221.7	221.46	0.15
Recycle 2							
UHMWPE Pure	203.3	203.4	203.3	203.5	203.6	203.4	0.13
Recycle 3							
Specimens	Modulus of elasticity (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE Pure	660.2	660.5	660.4	660.3	660.4	660.36	0.11
Recycle 1							
UHMWPE Pure	640.6	640.5	640.4	640.4	640.7	640.52	0.13
Recycle 2							
UHMWPE Pure	610.7	610.5	610.7	610.4	610.6	610.58	0.13
Recycle 3							
Specimens	Yield Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE Pure	17.3	17.2	17.3	17.5	17.4	17.34	0.11
Recycle 1							
UHMWPE Pure	15.8	15.7	15.6	15.8	15.9	15.76	0.11
Recycle 2							
UHMWPE Pure	12.4	12.1	12.3	12.4	12.4	12.32	0.13
Recycle 3							
Specimens	Ultimate Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE Pure	21.8	21.6	21.5	21.7	21.6	21.64	0.11
Recycle 1							
UHMWPE Pure	19.5	19.4	19.6	19.7	19.7	19.58	0.13
Recycle 2							
UHMWPE Pure	16.3	16.5	16.4	16.6	16.4	16.44	0.11
Recycle 3							

4.2.4 การทดสอบการสึกหรอ

ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นของ พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE แสดงดังตารางที่ 4.4 เป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหนาแน่นของ UHMWPE Pure Recycle 1,2,3

Specimens	Coefficient of friction, μ		Wear rate (mm ³ /N.m)		Density (g/cm ³)	
	Average	SD	Average	SD	Average	SD
UHMWPE Pure Recycle 1	0.1	0.01	2.33E-09	4.10E-11	0.9347636	0.02
UHMWPE Pure Recycle 2	0.11	0.01	5.23E-08	1.40E-11	0.9265436	0.02
UHMWPE Pure Recycle 3	0.13	0.01	7.88E-08	3.30E-11	0.956867	0.03

จากตารางที่ 4.4 พบว่าการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงไม่มากนัก หรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.9393 g/cm³ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนักหรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ อัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้น จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นต้องเสริมอนุภาคเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพไตรโบโลยี ให้กับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE และต้องมีการทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางเคมี และไตรโบโลยีใหม่อีกครั้ง

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ของโครงการ ที่ต้องการศึกษาหาสมบัติทางกลและไตรโบโลยี ในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของ พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE จากผง UHMWPE ด้วยกรรมวิธี Hot compression molding process ซึ่งทำให้สมบัติทางกลและไตรโบโลยีเปลี่ยนไปจากเดิม แสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นต้องเสริมอนุภาคเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ หากจะนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมวัสดุ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หรืออื่นๆ และผลจากการดำเนินงานศึกษาวิจัย ได้มีการทดลองวิเคราะห์ทดสอบและอภิปรายผลการวิเคราะห์ในการทดสอบซึ่งประกอบไปด้วยผลการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล คือ การทดสอบความแข็ง, การทดสอบความต้านทานแรงดึง, การทดสอบแรงกระแทก และทดสอบไตรโบโลยี คือ ความต้านทานการสึกหรอ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของวัสดุ ก่อน พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 140°C และเวลาคงอุณหภูมิที่ 180 นาที สามารถสรุปผลการดำเนินการศึกษาวิจัยออกเป็นกลุ่มการทดลองและตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยประกอบด้วย

1. ได้ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกลและไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ที่ผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่
2. ทราบถึงสมบัติทางกลและไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ที่ผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

5.1 สรุปผล

จากการวิจัยได้เลือกใช้วัสดุผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ชิ้นงานทดสอบ ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 140 °C และ เวลาคงอุณหภูมิที่ 180 นาที ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ สามารถสรุปสมบัติทางกลและไตรโบโลยี ได้ดังนี้

5.1.1 ในการทดสอบการกระแทกพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ พบว่าการให้ความร้อนซ้ำถึงจุดหลอมเหลวจะยิ่งส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง ความสามารถต่อการต้านทานแรงกระแทกจะยิ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.2 ค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 58 Shore D และพบว่าในแต่ละตำแหน่งที่มีการทดสอบค่าจะมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน นั่นคือไม่มีนัยสำคัญในแต่ละจุดที่ทดสอบ ค่าความแข็งไม่ได้แตกต่างกัน

5.1.3 การทดสอบแรงดึงจะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of Elasticity (MPa) ซึ่งค่าต่างๆที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ จนถึงจุดหลอมเหลวจะยังส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง ซึ่งค่าต่างๆจะมีค่าลดลง

5.1.4 อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบจนถึงจุดหลอมเหลวจะยังส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง อัตราการสึกหรอ จะยิ่งสูงขึ้น

5.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบ จนถึงจุดหลอมเหลวจะยังส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

5.1.6 ค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 รอบจนถึงจุดหลอมเหลวจะยังส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง ค่าความหนาแน่นจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย

จากการทบทวนข้อมูลเชิงวิชาการพบว่า การหลอมซ้ำด้วยอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวจะส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าลดลงและไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้ ทั้งนี้ต้องให้ความสำคัญกับกระบวนการผสมสารชนิดอื่นเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มสมบัติทางกล และมีความเป็นไปได้ว่าสมบัติทางกลจะสูงขึ้นกว่าพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ ในการผสมสารบางอย่างเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลนั้น จะต้องระมัดระวังในการนำไปใช้งานเฉพาะทาง เช่น งานทางด้านอาหาร ด้านการแพทย์ เพราะการผสมสารนั้นอาจไม่สามารถนำไปใช้งานในแง่มุมดังกล่าวได้ สำหรับสมบัติทางความร้อนจะยังไม่มีค่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ปัญหาอย่างหนึ่งที่สำคัญคือการตั้งค่าอุณหภูมิในการหลอมจะต้องทำให้อุณหภูมิของวัสดุถึงจุดหลอมเหลวจริง เพราะการตั้งอุณหภูมิที่แม่พิมพ์นั้นไม่ได้หมายความว่าอุณหภูมิที่วัสดุจะเป็นไปตามที่ตั้งค่าไว้ เพราะจะส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางความร้อนด้วย [63]

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยเลือกใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งยังมีกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการอื่นๆ ที่อาจส่งผลให้สมบัติทางกลเปลี่ยนไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection) หรือ การอัดรีดขึ้นรูปร้อน (Hot Extrusion) โดยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปร้อนจะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ต้นทุนต่ำกว่าการฉีดขึ้นรูปร้อน มีความเป็นไปได้ในการทำการทดสอบและทดลอง เพื่อพิสูจน์สมบัติทางกลที่อาจส่งผลในทางบวกก็

เป็นไปได้ ในการทดลองขึ้นรูปพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE ด้วยสถานะของการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยตัวแปร คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาต่างๆ นั้น เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล แต่อาจยังมีตัวแปรอื่นๆอีกที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน เช่น ในกระบวนการเย็นตัวของวัสดุ หลังการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีรูปแบบการเย็นตัวอย่างเร็วหรือการเย็นตัวอย่างช้า ก็ยังส่งผลต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน



เอกสารอ้างอิง

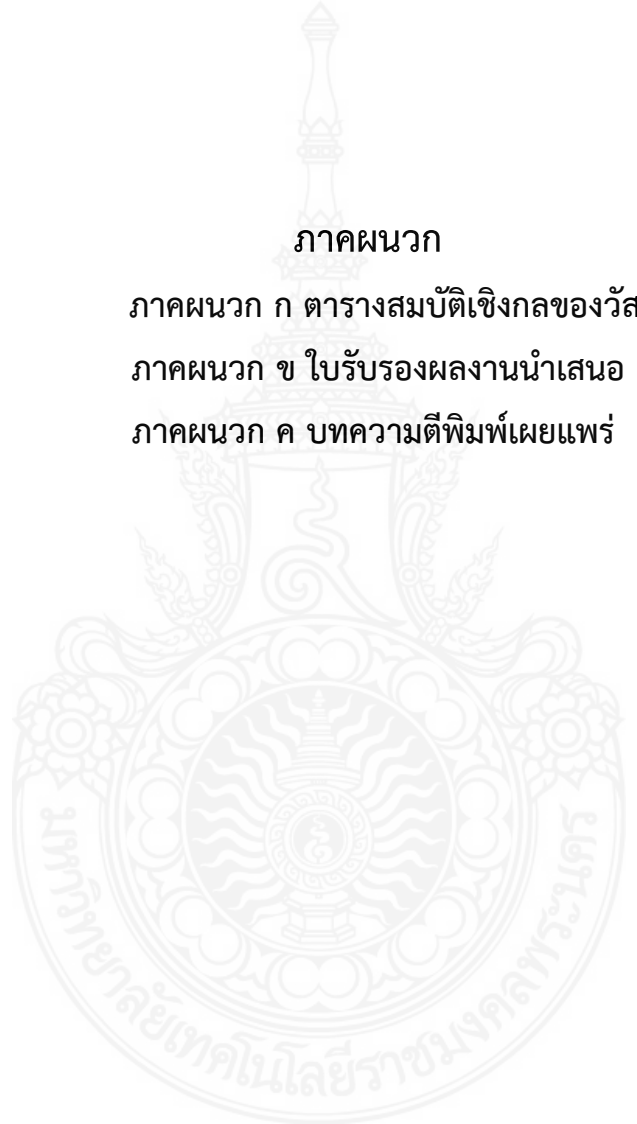
- [1] เทียน เทียมศักดิ์, “แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2567-2569: อุตสาหกรรมพลาสติก,”วิจัยกรุงศรี, 1 พฤศจิกายน 2566.
- [2] ประกอบ ขาดิภักดิ์ และคณะ, “พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบเพื่อความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ, 2559.
- [3] Eric Shippee, “Industrial Yarn,” Dec. 15
- [4] D. Wu et al., “Commodity plastic burning as a source of inhaled toxic aerosols,” J. Hazard. Mater., vol. 416, p. 125820, Aug. 2021
- [5] pp_sales in News.(30 พฤษภาคม 2565). “การรีไซเคิลพลาสติก (Recycled Plastics).” [ออนไลน์], Available: <https://www.chemihouse.com>
- [6] ฤทธิเดช แวณกุล, “แก้ปัญหาขยะพลาสติกด้วย Recycling Technology,”วารสาร PETROMAT Today, ฉบับที่ 1.ปีที่ 5
- [7] หงสุรพันธุ์, สุรพันธุ์, “คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดรีไซเคิล/เทอร์มอพลาสติกพอลิอีเทอร์-เอสเทอร์/โพลาลัสโตนต์เติมด้วยสารขยายสายโซ่” (2021). Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 5294.
- [8] S.M. Kurtz, “UHMWPE Biomaterials Handbook,” 2 nd., Elsevier Ins., China, 2009.
- [9] งามพรรณ ชะโล, “การศึกษาสมบัติทางกลของโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบสำหรับล้อ Run-flat,” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ, 2564.
- [10] Gul R. “Improved UHMWPE for use in total joint replacement,” *Ph.D. Dissertation. Boston: Massachusetts Institute of Technology*, 1997
- [11] Han KS, Wallace JF, Truss RW, Geil PH. “Powder compaction, sintering, and rolling of ultra-high molecular weight polyethylene and its composites,” *J Macromol Sci-Phys* 1981, Vol. 19, pp. 313–49.
- [12] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra PJ. “Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history,” *Polymer*, 1990;31:1435–40.
- [13] Barnetson A, Hornsby PR. “Observations on the sintering of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) powders,” *J aterials Sci Letters*, 1995;14:80–4.

- [14] Bellare A, Cohen RE. "Morphology of rod stock and compression moulded sheets of ultra-high molecular weight polyethylene used in orthopaedic implants," *Biomaterials*, 1996; 17:2325–33.
- [15] Truss RW, Han KS, Wallace JF, Geil PH. "Cold compaction molding and sintering of ultra-high molecular weight polyethylene," *Poly Engr Sci*, 1980; 20:747–55.
- [16] Shenoy AV, Saini DR. "Compression moulding of ultra-high molecular weight polyethylene," *Plast Rubber Proc Appl*, 1985; 5:313–17.
- [17] Wang X-Y, Li S-Y, Salovey R. "Processing of ultra-high molecular weight polyethylene," *J Appl Poly Sci*, 1988; 35:2165–71.
- [18] Chen K-C, Ellis EJ, Crugnola A. "Effects of molding cycle on the molecular structure and abrasion resistance of ultra-high molecular weight polyethylene," *ANTEC'81*, 1981; 39:270–2.
- [19] McKenna GB, Crissman JM, Khoury F. "Deformation and failure of ultra-high molecular weight polyethylene," *ANTEC '81*, 1981; 39:82–4.
- [20] Zachariades AE. "The effect of powder particle fusion on the mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene," *Poly Engr Sci*, 1985; 25:747–50.
- [21] Farrar DF, Brain AA. "The microstructure of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements," *Biomaterials*, 1997; 18:1677–85.
- [22] Halldin GW, Kamel IL. "Powder processing of ultra-high molecular weight polyethylene. I. Powder characterization and compaction," *Poly Eng Sci*, 1977; 17:21–6.
- [23] Halldin GW, Kamel IL. "Powder processing of ultra-high molecular weight polyethylene, II. Sintering," *ANTEC 77*, 1977; 35:298–300.
- [24] Olley RH, Hosier IL, Bassett DC, Smith NG. "On morphology of consolidated UHMWPE resin in hip cups," *Biomaterials*, 1999; 20:2037–46.
- [25] M. Wilczek, J. Zhu, L. Chi, U. Thiele and S. V. Gurevich, "Dip-coating with prestructured substrates: Transfer of simple liquids and Langmuir–Blodgett monolayers," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 29, 2017.
- [26] Lykins MD, Evans MA. "A comparison of extruded and molded UHMWPE," *Trans 21st Soc Biomater*, 1995; 18:385.

- [27] Gwidon W. Stachowiak and Andrew W. “Batchelor, Tribology Series 24, Engineering Tribology,” *Butterworth Heinemann*, 1993.
- [28] Jamal Takadoun. “Materials and Surface Engineering in Tribology, CPI Antony Rowe Ltd, Chippenham,” *Wiltshire, Great Britain*, 2008.
- [29] I. V. Kragelskii, “Friction and Wear, Elmsford,” *Pergamon Press*, 1982.
- [30] S. Bahadur, “The development of transfer layers and their role in polymer tribology,” *Wear*, no.245, pp. 92, 2000.
- [31] N. K. Myshkin and A. V. Kovalev, “Adhesion and Friction of Polymers, in Polymer Tribology, editors: Sujeet K Sinha and Brian J Briscoe,” *Imperial College Press*, pp 3–32, 2009.
- [32] V. A. Bely, A. I. Sviridenok, M. I. Petrokovets and V. G. Savkin, “Friction and Wear in Polymer-Based Materials,” *Oxford, Pergamon Press*, 1982.
- [33] K. R. Makinson and D. Tabor, *Proc. Roy. Soc.*, 1964, no. A281, pp. 49.
- [34] A. I. Sviridenok, V. A. Bely, V. A. Smurugov, and V. G. Savkin, *Wear*, vol. 25, pp. 301, 1973.
- [35] K. Tanaka, Y. Uchiyama and S. Toyooka, *Wear*, vol. 23, pp. 153, 1973.
- [36] J. R. Atkinson, K. J. Brown and D. Dowson, “The Wear of High Molecular Weight Polyethylene, Part 1: The Wear of Isotropic Polyethylene against Dry Steel in Unidirectional Motion,” *Transactions ASME, Journal of Lubrication Technology*, vol. 100, pp. 208–218, 1978.
- [37] I. V. Kragelskii, M. N. Dobychin and V. S. Kombalov, “Friction and Wear Calculation Methods,” *Oxford, Pergamon Press*, 1982.
- [38] S. P. Gubin, Yu. A. Koksharov, G. B. Khomutov and G. Yu. Yurkov, *Russ. Chem. Rev.*, 2005, vol. 74, pp. 489.
- [39] L. Yu and S. Bahadur, *Wear*, vol. 214, pp. 245, 1998.
- [40] V. L. Vakula and L. M. Pritykin, “Physical Chemistry of Polymer Adhesion,” (*Khimia, Moscow*) (in Russian), 1984.
- [41] C. W. Bunn and E. R. Howells, “Structures of Molecules and Crystals of Fluorocarbons,” *Nature*, vol. 174, pp. 549–551, 1954.

- [42] C.M. Pooley and D. Tabor, “Friction and Molecular Structure: the Behaviour of some Thermoplastics,” *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, vol. 329, pp. 251–274, 1972.
- [43] K. Tanaka, “Effects of Various Fillers on the Friction and Wear of PTFE–Based Composites, in Composite Materials Science,” editor: K. Friedrich, Elsevier, Amsterdam, pp. 137–174, 1986.
- [44] K. R. Makinson and D. Tabor. “The Friction and Transfer of Polytetrafluoroethylene,” *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, vol. 281, pp. 49–61, 1964.
- [45] D. H. Buckley, “Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication,” Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [46] D. Gong, Q. Xue and H. Wang, “ESCA Study on Tribochemical Characteristics of Filled PTFE,” *Wear*, vol. 148, pp. 161–169, 1991.
- [47] J.M. Thorpe, “Tribological Properties of Selected Polymer Matrix Composites against Steel Surfaces, in Composite Materials Science,” editor: K. Friedrich, Elsevier, Amsterdam, pp. 89–135, 1986.
- [48] B. Briscoe, “Wear of Polymers: an Essay on Fundamental Aspects,” *Tribology International*, vol. 14, pp. 231–243, 1981.
- [49] K. Tanaka and T. Miyata, “Studies on the Friction and Transfer of Semi–Crystalline Polymers,” *Wear*, vol. 41, pp. 383–398, 1977.
- [50] V.K. Jain and S. Bahadur, “Material Transfer in Polymer–Polymer Sliding,” *Wear*, vol. 46, pp. 177–198, 1978.
- [51] Shyam Bahadur and Cris Schwartz, “Mechanical and tribological behavior of polymer filled with inorganic particulate fillers, in Polymer Tribology,” editors: Sujeet K Sinha and Brian J Briscoe, *Imperial College Press*, pp 416–448, 2009.
- [52] สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, “การวัดคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุด้วยการทดสอบแรงกระแทก (Impact test),” [ออนไลน์], Available: <https://old.mtec.or.th/mcu/phml/index.php/th/2014-09-12-03-39-42/45-toughness-impact-test>
- [53] H. Raghuram, J. Roitner, M. P. Jones, and V.-M. Archodoulaki, “Recycling of polyethylene: Tribology assessment,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 192, p. 106925, May 2023.

- [54] J. J. Wu, C. P. Buckley and J. J. O'Connor, "Mechanical integrity of compression - moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions," *Biomaterials*, vol. 23, no. 17, pp. 3773–3783, Sep. 2002.
- [55] Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk, "Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al₂O₃ for Application in Engineering," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 192-202, Jan.-Jun. 2022.
- [56] Weston Wood, Wei-Hong Zhong, "Mechanical and wear properties of UHMWPE nanocomposites filled with carbon nanofillers," Washington State University, Department of Mechanical and Materials Engineering.
- [57] W. Li, Z. Wang, N. Liu, and J. Zhang, "Study on Tribological Characteristics of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene under Unsaturated Lubrication of Water and Brine," *Polymers*, vol. 14, no. 19, Art. no. 19, Jan. 2022.
- [58] T. Aoike, D. Yokoyama, H. Uehara, T. Yamanobe, and T. Komoto, "Tribology of ultra-high molecular weight polyethylene disks molded at different temperatures," *Wear*, vol. 262, no. 5, pp. 742–748, Feb. 2007.
- [59] Alejandra M. Ventura, Lucas M. Kneissl, "Recycled carbon fibers as an alternative reinforcement in UHMWPE composite. Circular economy within polymer tribology," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 34, Sep. 2022.
- [60] Weston Wood, Wei-Hong Zhong, "Mechanical and wear properties of UHMWPE nanocomposites filled with carbon nanofillers," Washington State University, Department of Mechanical and Materials Engineering.
- [61] Wang S., Ge S., "The Mechanical Property and Tribological Behavior Of UHMWPE: Effect Of Molding Pressure," *Wear*, vol. 263, no. 7-12, pp. 949-956, 2007.
- [62] S. V. Panin, D. G. Buslovich, L.A. Kornienko, V. O. Alexenko and Yu V. Dontsov, "Development of Two-Component Polymer-Polymeric Composites Based on UHMWPE-PP Blends for Additive Manufacturing," *Journal of Physics: Conf. Series.*, vol. 1260, p. 062017, 2019.
- [63] R. Turner, J. Wingham, T. Paterson, J. Shepherd and C. Majewski, "Use of silver-based additives for the development of antibacterial functionality in Laser Sintered polyamide 12 parts," *Sci. Rep.*, vol. 10, p. 892, Jan. 2020.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ตารางสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ภาคผนวก ข ใบรับรองผลงานนำเสนอ

ภาคผนวก ค บทความตีพิมพ์เผยแพร่

ภาคผนวก ก
ตารางสมบัติเชิงกลของวัสดุ



Property	UHMWPE Pure
Density, g/cm ³	0.924
Shore D hardness	55.9±0.6
Elastic modulus E , MPa	624±61
Yield point at $\sigma_{0.2}$, MPa	20.2±0.8
Ultimate strength σ_U , MPa	33.7±4.1
Elongation at break ϵ , %	420±33

ภาคผนวก ข
ใบรับรองผลงานนำเสนอ





รูปที่ ข - 1 การนำเสนอบทความวิชาการ



รูปที่ ข - 2 การนำเสนอบทความวิชาการ



รูปที่ ข-3 ใบประกาศนียบัตรบทความเรื่องการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทีลีน
น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางความร้อน



รูปที่ ข-4 ใบประกาศนียบัตรบทความเรื่องการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ส่งผลต่อไตรโพลีและการศึกษาหรือ

ภาคผนวก ค
บทความตีพิมพ์เผยแพร่






 การประชุมวิชาการราชภัฏนครราชสีมาเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
 1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เออร์เฮอร์ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางความร้อน Recycling Study of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Affecting Mechanical and Thermal Properties

รัชพงศ์ กาบจันทร์¹ จิระศักดิ์ ธาระจักร² แจ็ค ชุมจันทร์³ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท⁴ ประเสริฐ วิโรจน์จิวัน⁵
 ณัฐชานันท์ อังศุเรณีย์⁶ และ ประกอบ ขาดฤกษ์*

1. 4. 5. 7 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2 สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

6 สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

Ratchapong Kabjain¹ Jirasak Tharajak² Jak Chummin³ Padipan Tinprabath⁴ Prasert Wirotcheewan⁵
 Natchanin Angsuseranee⁶ and Prakorb Chartpruk*

1. 4. 5. 7 Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon

2 Department of Industrial Materials Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala
University of Technology Phra Nakhon

3 Department of Tool and Mold Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon

6 Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและทางความร้อนของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ที่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ด้วยการผ่านกระบวนการหลอมซ้ำหลายครั้ง เพื่อให้ทราบสมบัติทางกลและทางความร้อนที่เปลี่ยนไปจากเดิม ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลสำหรับของเสียทางอุตสาหกรรมชนิดพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เมื่อพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผ่านกระบวนการหลอมเหลวขึ้นรูปใหม่ ความร้อนจากการหลอมจะทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดสั้นลงและอาจก่อให้เกิดสมบัติทางกลและทางความร้อนลดลงตาม จากการทดลองทำการกระบวนการหลอมใหม่จำนวน 3 รอบ ผลการทดสอบพบว่า เมื่อนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผ่านกระบวนการรีไซเคิล จะให้ค่าความเค้นคราก ค่าความต้านทานแรงดึง การยืดตัว ณ จุดแตกหัก แรงกระแทก ค่าการนำความร้อน และจุดหลอมเหลวลดลง ดังนั้นเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรม ควรมีการปรับปรุงสมบัติทางกลและทางความร้อนใหม่ ด้วยการเติมสารเคมีเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและทางความร้อนให้ดีขึ้น

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด; สมบัติทางความร้อน; สมบัติทางกล; การนำกลับมาใช้ใหม่



การประชุมวิชาการราชบัณฑิตยสถานเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เออีทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

Abstract

The investigation presented in this article focuses on the mechanical and thermal properties of recycled ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) through repeated remelting processes. The study seeks to identify changes in the mechanical and thermal properties from the original state to assess the feasibility of recycling industrial waste in the form of UHMWPE. The results demonstrated that during the remelting and reformation processes, heat from the melting stage may shorten the molecular chains of UHMWPE, potentially deteriorating its mechanical and thermal properties. Reusing UHMWPE through tests conducted three times results in decreased yield stress, tensile strength, elongation at break, impact strength, thermal conductivity, and melting point. Consequently, to enhance the mechanical and thermal properties of recycled UHMWPE for engineering applications, the addition of specific chemical substances is recommended.

Keywords: Ultra-high Molecular Weight Polyethylene; Thermal Properties; Mechanical Properties; Recycling

1. บทนำ

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่ใช้กันมากที่สุด พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) มีการใช้งานที่หลากหลายตั้งแต่การใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ จนถึงในทางการแพทย์ รวมไปถึงการใช้งานกับสายไฟและสายเคเบิลชนิดของ UHMWPE ทนทาน ทนต่อความเครียดได้ดี และทนทานต่อการแตกร้าวสูง มีความต้านทานต่อการสึกหรอและจากการเสียดสี ทนต่อการเสียดสีได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนถึง 15 เท่า และทนทานต่อสารเคมีสูง [1] และเมื่อผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยาว (UHMWPE หรือ UHMW) ถูกใช้อย่างแพร่หลายจึงทำให้ผลิตภัณฑ์พวกนี้กลายเป็นขยะและยากต่อการทำลาย จากงานวิจัยของ D. Wu et al. [3] พบว่าการเผาที่ไม่ได้รับการควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคกำลังพัฒนา มีการปล่อยก๊าซที่สูงขึ้นมาก (13.1 ± 7.5 กรัม/กิโลกรัม) และมีความเป็นพิษที่เกิดจากการสูดดมของละอองที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ขยะพลาสติก จึงได้มีการนำมารีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) เป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาคัดแยกตามประเภท แล้วจึงนำมาล้างทำความสะอาด ก่อนนำมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกเกรดสองหรือเม็ดพลาสติกรีไซเคิล เพื่อนำกลับไปใช้ก่อนนำไปผ่าน

กระบวนการขึ้นรูป ความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลและทางความร้อน J.J. Wu et al. [2] ได้ทำการศึกษาความสมบูรณ์ของการอัดขึ้นรูปผง UHMWPE บริสุทธิ์เกรด 1900 H ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 145-200 °C เวลาคงอุณหภูมิที่ 10-90 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการยืดตัวและปริมาณความเป็นผลึกของวัสดุพอลิเมอร์ ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาข้อมูลจากเพิ่มเติมจากบทความ Harsha Raghuram et al. [4] ที่ได้ศึกษากระบวนการรีไซเคิลพอลิเมอร์ ผลปรากฏว่าทำให้เกิดความแตกต่างทางด้านไทรโบโลยีและสมบัติทางกลถึง 20 % และอาจจะไม่เหมาะกับการใช้งานทางวิศวกรรมหลายๆ ด้าน

งามพรรณ ขะโล และ ประกอบ ขาดิภักดิ์ [5] ได้ทำการทดสอบทดสอบสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยาวเชิงประกอบและหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักกับอลูมิเนียมออกไซด์ โดยส่งผลให้สามารถใช้ผลิตล้อรถแทรกเตอร์และให้ทราบสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมภายใต้กระบวนการขึ้นรูปล้อรถแทรกเตอร์ วัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย



การประชุมวิชาการราชสมาคมเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอร์มิเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและมีสารเติมแต่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ก้อนวัสดุสำหรับการทดลองประกอบด้วย แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิ เวลา รวมถึงสัดส่วนระหว่างพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับอลูมิเนียมออกไซด์ การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งแรงตาม ASTM D2240 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 type I การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลที่ได้คือสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 °C นาน 90 นาที ด้วย Al_2O_3 เกรด HTM 30 ร้อยละ 5 ซึ่งมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอในช่วง 2 ถึง 5 μm ผลการทดสอบทางแรงดึงประกอบด้วยความเค้นที่จุดคราก (Yield Stress) เท่ากับ 20.52 MPa, Ultimate Tensile Strength เท่ากับ 29.96 MPa, Breaking Strength เท่ากับ 22.83 MPa, Elongation at Break เท่ากับ 265.8% และ Modulus of elasticity เท่ากับ 784.46 MPa มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 62 shore D มีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงเท่ากับ 586.8 J/m และมีอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยส่วนผสม UHMWPE ผสมกับ Al_2O_3 เกรด HTM-30 ที่ 5% มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าอัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.12, 8.66E-11 $mm^3/N.m$, และ 1.2446958 g/cm^3 Alejandra M. Ventura et al [6] ได้ทำการศึกษาพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) ที่เสริมด้วยเส้นใยบริสุทธิ์ (VCF) และเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล (RCF) ภายใต้สภาวะการหล่อลื่นด้วยน้ำ โดยตัวอย่างที่มี RCF 30% พบว่า Young Modulus มีค่าดีขึ้น 208%, ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 105% และความแข็งแรง 146% สำหรับตัวอย่างที่มีพอลิเอทิลีน VCF 30% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ UHMWPE บริสุทธิ์ สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้มากถึง 62% และอัตราการสึกหรอ 32% สำหรับคอมโพสิต CF 10% สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้สูงสุดถึง 62% และอัตราการสึกหรอ 32% ผลลัพธ์ของงานนี้แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิต ที่มีเส้นใยรีไซเคิลมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับวัสดุบริสุทธิ์ และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์

มีความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนได้ W. Wood and W.-H. Zhong [7] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE กับผงเส้นใยนาโนคาร์บอน (CNF) ถูกนำมาใช้เป็นการเสริมแรงเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลและไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนที่ระดับการรับแรงที่แตกต่างกัน (0.5 wt % และ 3 wt %) ความหนาของการเคลือบมี 2 ประเภท คือ หนา 2.8 นาโนเมตร และหนา 46 นาโนเมตร บน CNF ที่ถูกออกซิไดซ์ และตรวจสอบสมบัติทางกลของนาโนคอมโพสิต HDPE/CNF รวมถึงโมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นสูงสุด ความเครียดที่จุดแตกหัก รวมถึงการทดสอบแรงดึง การทดสอบการสึกหรอ ดำเนินการทดสอบโดยใช้ เครื่องไดรโบมิเตอร์ แบบพินออนดิสก์ ภายใต้สภาวะที่มีการหล่อลื่น มีการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของวัสดุที่สัมผัสกับลูกเหล็ก ตลอดระยะเวลาการทดสอบการสึกหรอ การเคลือบ CNF ไม่เพียงแต่ลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของนาโนคอมโพสิตเท่านั้น แต่ยังลดอัตราการสึกหรออีกด้วย การเคลือบ CNF ที่หนากว่านั้นพบว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าในการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและยืดอายุความเครียดของการแตกหักเมื่อเปรียบเทียบกับ การเคลือบ CNF ที่บริสุทธิ์ที่บางกว่า ในบรรดานาโนคอมโพสิตหลายประเภท ชนิดที่มีการเคลือบ CNF หนากว่า 46 นาโนเมตร ที่ระดับการรับแรง 0.5 % โดยน้ำหนัก ให้ความเครียดสูงสุดที่การแตกหัก ความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอลดลงเกือบ 57.9% จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการสูญเสียสมบัติทางกลและทางความร้อนของ UHMWPE มาจากปัจจัยหลักๆ อย่างเช่น กระบวนการให้ความร้อน และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ซึ่งลักษณะกระบวนการดังกล่าว นั้น จะอยู่ในรูปแบบกระบวนการรีไซเคิล เพื่อนำ UHMWPE กลับมาใช้ใหม่ จึงทำให้สมบัติดังกล่าวลดลง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและทางความร้อนในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการวิจัย

- เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X



Plus ด้วย Load cell ขนาด 1 กิโลนิวตัน

- เครื่องทดสอบแรงกระแทกสำหรับพอลิเมอร์ยี่ห้อ GOTECH testing Machines Inc. โมเดล GT-7045-HML

- เครื่องจัดเตรียมผิวชิ้นงานจานคู่ Metaserv 250 สามารถปรับความเร็วรอบที่ปรับได้ ตั้งแต่ 50-500 rpm

- เครื่องชั่งไฟฟ้าชนิดนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu รุ่น ATX224R ชั่งวัสดุแบบชั่งจากด้านบน ชนิดอ่านละเอียดแสดงผลเป็นตัวเลข ความละเอียดในการอ่านได้ 0.0001 กรัม ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 220 กรัม จานขนาดกว้าง×ยาว 180×180 มิลลิเมตร ได้รับมาตรฐาน: ISO 9001

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดตั้งโต๊ะพร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุ (FESEM with EDS) ยี่ห้อ Thermo Scientific ประสิทธิภาพสูง มีกำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า

- ตู้อบความร้อน ปรับอุณหภูมิได้ถึง 300 องศาเซลเซียส ตั้งเวลาการทำงานได้

- เครื่องอัดเข้าพอลิเมอร์ อัดเข้าขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยไฮดรอลิค ควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า แรงดันการอัดสูงสุด 55 ตัน สามารถทำความร้อนสูงสุดได้ 400 องศาเซลเซียส แท่นอัดเข้า มีขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร

- เครื่องวัดค่าความแข็งพอลิเมอร์ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G สเกล Shore D มีตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดยค่าที่สูงขึ้นแสดงถึงความแข็งที่มากขึ้น

- แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาดความกว้าง 80 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร สามารถอัดขึ้นงานให้มีความหนาในช่วง 5-30 มิลลิเมตร

- ใช้เครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบให้พลังงานด้วยแสง ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น LFA467 HT สำหรับ UHMWPE

- เครื่อง DSC ใช้วัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

2.2.1 นำผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ไป

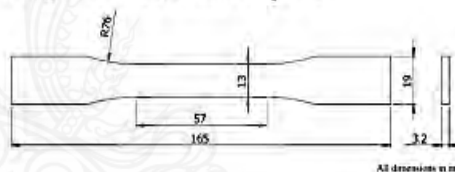
ตรวจสอบรูปลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.2.2 ทำการอบไล่ความชื้นสำหรับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ด้วยความร้อน 70 °C นาน 0.5 ชั่วโมง

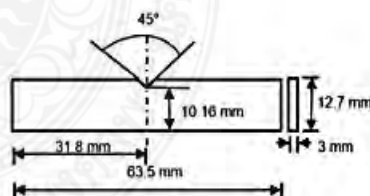
2.2.3 หากยังไม่นำมาใช้ในทันทีจะต้องทำการอบไล่ความชื้นใหม่อีกครั้ง

2.2.4 นำใส่แม่พิมพ์และอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนของแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมง

2.2.5 นำชิ้นงานที่ถอดออกจากแม่พิมพ์ไปตัดออกเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบต่างๆ ด้วยเครื่องเครื่องตัดชิ้นงานยี่ห้อ BUEHLER รุ่น IsoMet และเครื่องกัดชิ้นงาน สำหรับตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 มีขนาดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 [8]



รูปที่ 2 ขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23

2.2.6 จัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Metaserv 250 Grinder-Polisher

2.2.7 ทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X Plus

2.2.8 ทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งพอลิเมอร์ Shore D สเกล Shore D



การประชุมวิชาการราชบัณฑิตยสถานเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอร์มิเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

2.2.9 ทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกด้วย
เครื่อง GOTECH testing Machines InC. โมเดล GT-7045-
HML

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ

จากการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และ
ผงลุมิเนียมเข้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
แบบส่องกราดได้ผลดังรูปที่ 3 อนุภาคผงพอลิเอทิลีนน้ำหนัก
โมเลกุลสูงยิ่งยวดจะมีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกาะ
ตัวเป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆ และมีพังมีดยึดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มี
ขนาดกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน



รูปที่ 3 รูปร่างสัณฐานของผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง
ยิ่งยวดที่กำลังขยาย 300 ไมครอน

3.2 ผลการทดสอบค่าความแข็ง

จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็ง Durometer
ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ตามมาตรฐานการ
ทดสอบ ASTM D2240 (JIS K 7215 D, ISO R 868 D) ผล
การทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ พบว่ามีค่าความ
แข็งเฉลี่ยเท่ากับ 58 Shore D และพบว่าในแต่ละตำแหน่งที่
มีการทดสอบค่าจะมีค่าความแข็งไม่แตกต่างกัน นั่นคือไม่มี
นัยสำคัญในแต่ละจุดที่ทดสอบ และการทำการรีไซเคิลทั้ง
3 รอบ พบว่าค่าความแข็งไม่ได้แตกต่างกัน

3.3 ผลการทดสอบค่าแรงดึง

ผลจากการทดสอบแรงดึงจำนวนชิ้นงานตัวอย่างรวม
5 ชิ้นที่ส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด
และเฉลี่ยค่าออกมาจะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield
Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa),
Elongation at Break (%) และ Modulus of Elasticity
(MPa) แสดงดังตารางที่ 2 และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับ
UHMWPE Pure ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานหรือยังไม่ผ่านการให้
ความร้อนซ้ำ จะพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ตาราง
ที่ 1 เป็นสมบัติของ UHMWPE Pure ที่อ้างอิงจาก S. V.
Panin et al [9] เป็นที่แน่ชัดว่าสมบัติต่างๆจะมีค่าลดลง
และจะยังมีค่าลดลงหากผ่านกระบวนการให้ความร้อน ณ จุด
หลอมเหลวหลายครั้ง ซึ่งการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมควร
ได้รับการพิจารณาใหม่

ตารางที่ 1 Mechanical properties of UHMWPE Pure [9]

Property	UHMWPE Pure
Density, g/cm ³	0.924
Shore D hardness	55.9±0.6
Elastic modulus E, MPa	624±61
Yield point at $\sigma_{0.2}$, MPa	20.2±0.8
Ultimate strength σ_u , MPa	33.7±4.1
Elongation at break E, %	420±33

ตารางที่ 2 Mechanical properties of UHMWPE recycle

Property	1 st time	2 nd time	3 rd time
Yield Strength (MPa),	17.33	15.87	12.37
Ultimate Tensile Strength (MPa)	21.77	19.65	16.44
Elongation at Break (%)	230.6	221.7	203.6
Modulus of Elasticity (MPa)	660.4	640.7	610.5
Impact Strength (kJ/m ²)	74.8	65.4	58.7
Hardness (Shore D)	58	58	57
Melting Point (°C)	148	148	148
Thermal Conductivity (W/mK)	0.40	0.39	0.39

3.4 ผลการทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก มีขนาดชิ้นงานทดสอบ
ความกว้าง×ความหนา โดยประมาณเท่ากับ 2.5×10
มิลลิเมตร มีความลึกของรอยบาก 2 มิลลิเมตร ได้ค่าความ
ทนต่อแรงกระแทกแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าการให้ความ
ร้อนซ้ำถึงจุดหลอมเหลวจะยังส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้น



ลง ความสามารถต่อการต้านทานแรงกระแทกจะยิ่งลดลง
อย่างมีนัยสำคัญ

3.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบให้พลังงานด้วยแสง ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น LFA467 HT สำหรับ UHMWPE recycle ได้ค่าการนำความร้อนดังตารางที่ 2 พบว่าค่าที่ได้จากการผ่านการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ไม่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

4. อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพทำให้เห็นรูปลักษณะพื้นฐานของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่มีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆ และมีพองเม็ดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มีขนาดกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน ในช่วงของการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนนั้น ผลการขึ้นรูปแสดงให้เห็นว่ามีความร้อนสูญเสียจากแม่พิมพ์ออกไปภายนอกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้วัสดุภายในแม่พิมพ์ไม่หลอมเหลว การตั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ซึ่งจะต้องตั้งให้อุณหภูมิของตัวกดด้านบนอยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ฐานรากของแม่พิมพ์อยู่ที่ 200 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้ความร้อนสามารถกระจายเข้าไปถึงวัสดุที่อยู่ภายในทั้งนี้ยังใช้เวลาในการบ่มความร้อนให้หลอมเหลวนานถึง 3 ชั่วโมง ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงพบว่าในแต่ละตำแหน่งที่กดทดสอบอาจมีความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญระหว่างชิ้นงานที่ทำจากพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผ่านการหลอมให้ความร้อนซ้ำ สำหรับค่าการทดสอบแรงดึงนั้นพบว่าการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดไปหลอมให้ความร้อนซ้ำเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการหลอมซ้ำนั้นพบว่า การจะส่งผลให้ Yield Strength, Ultimate Tensile Strength และ Modulus of Elasticity และ Elongation at Break ลดลง และค่าการทดสอบแรงกระแทกยังไม่แตกต่างในแต่ละครั้งที่มีการหลอมซ้ำใหม่ ค่าการนำความร้อนและจุดหลอมเหลวยังไม่มีเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมที่ชัดเจน

5. สรุป

ผลการทดสอบของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผ่านการหลอมขึ้นรูปซ้ำใหม่ได้รับการเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ กับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่บริสุทธิ์ ยังไม่ผ่านการหลอมซ้ำ โดยนำไปเปรียบเทียบกับ S. V. Panin et al. [9] พบว่าการหลอมซ้ำด้วยอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวจะส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าลดลงและไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้ ทั้งนี้ต้องให้ความสำคัญกับกระบวนการผสมสารชนิดอื่นเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล และมีความเป็นไปได้ว่าสมบัติทางกลจะสูงขึ้นกว่าพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ ในการผสมสารบางอย่างเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลนั้นจะต้องระมัดระวังในการนำไปใช้งานเฉพาะทาง เช่น งานทางด้านอาหาร ด้านการแพทย์ เพราะการผสมสารนั้นอาจไม่สามารถนำไปใช้งานในแง่มุมดังกล่าวได้ สำหรับสมบัติทางความร้อนจะยังไม่มีค่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ปัญหาอย่างหนึ่งที่สำคัญคือการตั้งค่าอุณหภูมิในการหลอมจะต้องทำให้อุณหภูมิของวัสดุถึงจุดหลอมเหลวจริง เพราะการตั้งอุณหภูมิที่แม่พิมพ์นั้นไม่ได้หมายความว่าอุณหภูมิที่วัดจะเป็นไปตามที่ตั้งค่าไว้ เพราะจะส่งผลต่อสมบัติทางกลและทางความร้อนด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สำหรับการสนับสนุนด้านเครื่องมือ อุปกรณ์และสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบและทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eric Shippee, "Industrial Yarn," Dec. 15
- [2] D. Wu et al., "Commodity plastic burning as a source of inhaled toxic aerosols," *J. Hazard. Mater.*, vol. 416, p. 125820, Aug. 2021
- [3] J. J. Wu, C. P. Buckley and J. J. O'Connor, "Mechanical integrity of compression - moulded



การประชุมวิชาการราชบัณฑิตยสถานเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เอเชียเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

- ultra- high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions," *Biomaterials*, vol. 23, no. 17, pp. 3773–3783, Sep. 2002.
- [4] H. Raghuram, J. Roitner, M. P. Jones and V.-M. Archodoulaki, " Recycling of polyethylene: Tribology assessment," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 192, p. 106925, May 2023.
- [5] Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk, " Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al₂O₃ for Application in Engineering," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 192-202, Jan.-Jun. 2022.
- [6] Alejandra M. Ventura, Lucas M. Kneissl, " Recycled carbon fibers as an alternative reinforcement in UHMWPE composite. Circular economy within polymer tribology," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 34, Sep. 2022.
- [7] Weston Wood, Wei-Hong Zhong, " Mechanical and wear properties of UHMWPE nanocomposites filled with carbon nanofillers," Washington State University, Department of Mechanical and Materials Engineering.
- [8] R. Turner, J. Wingham, T. Paterson, J. Shepherd and C. Majewski, " Use of silver- based additives for the development of antibacterial functionality in Laser Sintered polyamide 12 parts," *Sci. Rep.*, vol. 10, p. 892, Jan. 2020.
- [9] S. V. Panin, D. G. Buslovich, L.A. Kornienko, V. O. Alexenko and Yu V. Dontsov, " Development of Two- Component Polymer- Polymeric Composites Based on UHMWPE-PP Blends for Additive Manufacturing," *Journal of Physics: Conf. Series.*, vol. 1260, p. 062017, 2019.



การประชุมวิชาการราชภัฏนครราชสีมาเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอร์เทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ที่ส่งผลต่อไตรโบโลยีและการสึกหรอ

Study on The Recycling of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Affecting Tribological and Wear

รัชพงศ์ กาบจันทร์¹ จิระศักดิ์ ธาระจักร² แจ็ค ชุ่มอินทร์³ ประเสริฐ วิโรจน์สิน⁴ ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท⁵
ณัฐชานันท์ อังศุเศรษฐี⁶ และ ประกอบ ชาตภูมิ^{7*}

^{1,4,5,7}สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

²สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

³สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

⁶สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

Ratchapong Kabjan^{1*} Jirasak Tharajak² Jak Chummin³ Padipan Tinprabath⁴ Prasert Wirotcheewan⁵
Natchanin Angsuseranee⁶ and Prakorb Chartpuk^{7*}

^{1,4,5,7} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon

² Department of Industrial Materials Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala
University of Technology Phra Nakhon

³ Department of Tool and Mold Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon

⁶ Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งเน้นการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ส่งผลต่อไตรโบโลยีและการสึกหรอ ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ที่ผลิตขึ้นในประเทศไทยถูกใช้เป็นตัวตั้งต้นในการศึกษาครั้งนี้ ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดได้รับการตรวจสอบขนาดอนุภาคผงและรูปลักษณะพื้นฐาน กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยแม่พิมพ์แบบปิดซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการศึกษา การหลอมขึ้นรูปใหม่จำนวน 3 ครั้งถูกทำเพื่อศึกษาไตรโบโลยี ภายใต้ความดันปิดแม่พิมพ์ 5 MPa อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ 140°C นาน 90 นาที มีการใช้กระบวนการหล่อเย็นผ่านแท่นหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิหลังการอัดขึ้นรูปร้อน ผลจากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย มีค่าความหนาแน่นลดลง มีอัตราการสึกหรอสูงขึ้น จากการตรวจสอบพื้นผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างผิวที่แตกต่างกันเล็กน้อย นัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ จากการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นต้องเสริมอนุภาคเพื่อปรับปรุง



การประชุมวิชาการราชบัณฑิตยสถานเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เอเชียทอง เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

ประสิทธิภาพไตรโบโลยีให้กับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และต้องมีการทดสอบสมบัติทางกล ทางความร้อน ทางเคมี และไตรโบโลยีใหม่อีกครั้ง

คำสำคัญ: ไตรโบโลยี; พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด; การนำกลับมาใช้ใหม่

Abstract

The article is focused on the study of the recycling of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and its effects on tribology and wear. Pure UHMWPE powder, produced in Thailand, was used as the raw material for this study. The particle size and morphology of the powder were analyzed through hot press molding using a closed mold. The process was repeated three times to evaluate tribology. The conditions involved the application of 5 MPa of closed mold pressure at a mold temperature of 140°C for 90 minutes. A cooling process via a cooling platform was employed to decrease the temperature following the hot press molding process. The study revealed that the coefficient of friction increased slightly, while the density decreased. However, the wear rate increased. Surface examination using a roughness meter indicated no significant differences in scratch marks when compared with the wear surface of pure UHMWPE. This study suggests the necessity of incorporating certain particles into UHMWPE to enhance tribological performance. Further testing of mechanical, thermal, chemical, and tribological properties is recommended

Keywords: Tribology; Ultra-high Molecular Weight Polyethylene; Recycling

1. บทนำ

พอลิเอทิลีนเป็นพลาสติกที่ใช้กันมากที่สุด พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) มีการใช้งานที่หลากหลายตั้งแต่การใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ จนถึงในทางการแพทย์ รวมไปถึงการใช้งานกับสายไฟและสายเคเบิลข้อดีของ UHMWPE ทนทาน ทนต่อความเครียดได้ดี และทนทานต่อการแตกร้าวสูง มีความต้านทานต่อการสึกหรอและจากการเสียดสี ทนต่อการเสียดสีได้ดีกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนถึง 15 เท่า และ ทนทานต่อสารเคมีสูง Eric Shippee [1] และเมื่อผลิตภัณฑ์ที่ทำด้วยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE หรือ UHMW) ถูกใช้อย่างแพร่หลายจึงทำให้ผลิตภัณฑ์พวกนี้กลายเป็นขยะและยากต่อการทำลาย จากงานวิจัยของ Di Wu [2] พบว่าการเผาที่ไม่ได้รับการควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคกำลังพัฒนา มีการปล่อยก๊าซที่สูงขึ้นมาก (13.1 ± 7.5 กรัม/กิโลกรัม) และมีความเป็นพิษที่เกิดจากการสูดดมของละอองที่ปล่อยออกมา

จากการเผาไหม้ขยะพลาสติก จึงได้มีการนำมารีไซเคิลเพื่อนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ และลดปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาทำลาย จากการรีไซเคิลด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้เกิดการสูญเสียทางด้านไตรโบโลยีและด้านการสึกหรอ Harsha Raghuram et al [3] ได้ศึกษากระบวนการรีไซเคิลพอลิเอทิลีน ผลปรากฏว่าทำให้เกิดความแตกต่างทางด้านไตรโบโลยีและสมบัติทางกลถึง 20 % และอาจจะไม่เหมาะกับการใช้งานทางวิศวกรรม หลายๆอย่างทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาข้อมูลจากเพิ่มเติมจากบทความของ Wenhao li et al [4] ได้ศึกษาลักษณะทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ภายใต้การหล่อลื่น ของน้ำและน้ำเกลือ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานและการสึกหรอ ของ UHMWPE โดยทดสอบจากโหลดที่ใช้และความเร็วการเลื่อนผ่านชิ้นงานที่แตกต่างกันและบันทึกผล วิเคราะห์ผลกระทบของโหลดและความเร็วต่อคุณสมบัติแรงเสียดทานของ UHMWPE ผลลัพธ์แสดงให้เห็น



การประชุมวิชาการราชชมภรณ์ด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอร์เมซ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

ว่าภายใต้การทดสอบแบบหล่อขึ้นโดยเหลวหยดลงบนชิ้นงาน (ประมาณ 150–170 มล./ชม.) พฤติกรรมไทรโบโลยี ของ UHMWPE นั้นดีกว่าเลื่อนแบบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอของ UHMWPE ลดลงมากกว่า 39% และ 10% ตามลำดับ และรูปแบบการหล่อขึ้นของ UHMWPE ค่อยๆเปลี่ยนจากการหล่อขึ้นแบบอัดตัวเป็นการหล่อขึ้นแบบไม่อัดตัวเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหลดและความเร็ว และจากการระเหยของน้ำที่เกิดจากความร้อนจากการเสียดสี จะส่งผลต่อปริมาณของน้ำบนพื้นผิวของ UHMWPE ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงอีกด้วย สำหรับโหลดและความเร็วที่ 70 N และ 700 รอบ/นาที จะทำให้เกิดค่าวิกฤตมีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการหล่อขึ้นแบบน้ำเกลือ จะมีคุณสมบัติด้านการเสียดสีของ UHMWPE จะดีกว่าการหล่อขึ้นแบบน้ำ เนื่องจากในน้ำเกลือมีเม็ดเกลือที่ตกตะกอน มีลักษณะเป็นลูกบอล ผลการศึกษาการหล่อขึ้นแบบน้ำเกลือนั้นเหนือกว่าการหล่อขึ้น ด้วยน้ำที่ความเร็วสูง ความต้านทานการสึกหรอพื้นผิวแสดงให้เห็นว่าอัตราการสึกหรอของ UHMWPE ภายใต้การหล่อขึ้นด้วยน้ำเกลือจะมีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าการหล่อขึ้นแบบน้ำ ถึง 9% ที่โหลด 110 นิวตัน ความต้านทานต่อการสึกหรอของ UHMWPE โดยใช้การหล่อขึ้นแบบน้ำเกลือ นั้นดีกว่าการหล่อขึ้นแบบน้ำ ที่ความเร็วสูง อัตราการสึกหรอของ UHMWPE ภายใต้การหล่อขึ้นแบบน้ำเกลือต่ำกว่า 10% ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที ซึ่งดีกว่าการหล่อขึ้นแบบน้ำด้วยความเร็วสูง Taku aoike et al. [5] ได้ศึกษาลักษณะทางไทรโบโลยีของ แผ่น โพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ(UHMW-PE) ที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130–190 °C แผ่นที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 130 °C จะได้ความเป็นผลึกสูงสุด แต่ความเป็นผลึกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิเกิน 150 °C และ การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยใช้เครื่องทดสอบแรงเสียดทานแบบ บอลออนดิสก์โดย ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานจะลดลงตามจำนวนการหมุนที่เพิ่มขึ้น ในระยะแรกของการวัดโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิการขึ้นรูป ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในสถานะคงตัวคือ 0.04 สำหรับงานขึ้นรูปที่

130 °C และเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 150–190 °C จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในสถานะคงที่ที่ 0.065 เสมอ งานพรรณน ชะโล [6] ได้ทำการทดสอบทดสอบสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบและหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักกับอลูมิเนียมออกไซด์ โดยส่งผลให้สามารถใช้ผลิตล้อรันแฟลท และให้ทราบสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมภายใต้กระบวนการขึ้นรูปล้อรันแฟลท วัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลัก และมีสารเติมแต่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ก่อนวัสดุสำหรับการทดลองประกอบด้วย แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิ เวลา รวมถึงสัดส่วนระหว่างโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับอลูมิเนียมออกไซด์ การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งแรงตามมาตรฐาน ASTM D2240 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 type I การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลที่ได้คือสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 °C นาน 90 นาที ด้วย Al_2O_3 เกรด HTM 30 ร้อยละ 5 ซึ่งมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมออยู่ในช่วง 2 ถึง 5 μm ผลการทดสอบทางแรงดึงประกอบด้วยความเค้นที่จุดคราก (Yield Stress) เท่ากับ 20.52 MPa, Ultimate Tensile Strength เท่ากับ 29.96 MPa, Breaking Strength เท่ากับ 22.83 MPa, Elongation at Break เท่ากับ 265.8% และ Modulus of elasticity เท่ากับ 784.46 MPa มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเท่ากับ 62 shore D มีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงเท่ากับ 586.8 J/m และมีอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยส่วนผสม UHMWPE ผสมกับ Al_2O_3 เกรด HTM-30 ที่ 5% มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าอัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.12, 8.66E-11 $mm^3/N.m$, และ 1.2446958 g/cm^3 Alejandra M. Ventura et al. [7] ได้



ศึกษาความต้องการที่โพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ที่เสริมด้วยเส้นใยบริสท์ (VCF) และเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล (RCF) ภายใต้สภาวะที่มีการหล่อลื่นด้วยน้ำ พบว่าตัวอย่างที่มี RCF 30% โมดูลัสของ Young ดีขึ้น 208%, ความต้านทานแรงดึงสูงสุด 105% และความแข็ง 146% สำหรับตัวอย่างที่มี RCF 30% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ UHMWPE บริสท์ ลดค่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้มากถึง 62% และอัตราการสึกหรอ 32% สำหรับคอมโพสิต CF 10%สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้สูงสุดถึง 62 % และอัตราการสึกหรอ 32 % ผลลัพธ์ของโครงการนี้แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิต ที่มีเส้นใยรีไซเคิลมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับวัสดุบริสท์ และการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ประเมินความเป็นไปได้ในการประหยัดเงินได้ Weston Wood and Wei-Hong Zhong [8] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE นาโนคอมโพสิตกับผงคาร์บอนนาโนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการสึกหรอของ UHMWPE สารที่เดิมมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีความหล่อลื่นมีความแข็งแรงและทนความร้อนได้ดี ซึ่งอาจจะลดการสึกหรอ ที่เกิดจากความร้อนของแรงเสียดทาน นอกจากนี้กลไกโดยรวมคุณสมบัติของ UHMWPE ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นด้วย Wang Shibo , Ge Shirong, [9] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงดันแม่พิมพ์ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันของแม่พิมพ์ มีผลต่อสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมทาง Tribological ตัวอย่างโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ถูกเตรียมด้วยความดันระดับที่ 10 MPa, 15 MPa และ 20 MPa จากนั้นตัวอย่างเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการวัดความแข็ง การทดสอบแรงเสียดทาน และการทดสอบการเจาะ และ ศึกษาพฤติกรรมการเสียดสีและการสึกหรอ ผลการทดสอบระบุว่าแรงกดในการขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมของไตรโบโลยีและตัวอย่าง UHMWPE ที่ขึ้นรูปด้วยความดัน 15 MPa จะได้รับค่าความแข็งแรงสูงสุดถึง 28.5 MPa ค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานสูงถึง 3.41 และแรงทำลายการเจาะเพิ่มขึ้น ถึง 201.6 N และ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตัวอย่าง UHMWPE สามตัวอย่าง ที่ผลิตที่ความดัน 10 MPa , 15 MPa และ 20 MPa จะมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.025 สำหรับการทดสอบการสึกหรอที่ 10,000 รอบการสูญเสียมวลต่ำสุดที่ 0.93 mg. ไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจนในการสึกหรอสำหรับตัวอย่าง UHMWPE จากแรงกดในการขึ้นรูปทั้ง 3 ระดับ ขนาดอนุภาคการสึกหรอ ที่ประมาณ 8 μm จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าไตรโบโลยีและการสึกหรอของ UHMWPE มาจากปัจจัยหลักๆอย่างเช่น กระบวนการให้ความร้อน และความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป ซึ่งลักษณะกระบวนการดังกล่าวนี้จะอยู่ในรูปแบบการรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling) เป็นการให้ความร้อนในการหลอมพลาสติก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ ที่ให้พลาสติกกรีไซเคิลมีสีเหลืองส่งผลต่อไตรโบโลยีและการสึกหรอ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาไตรโบโลยีและการสึกหรอในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการวิจัย

- เครื่องจัดเตรียมผิวชิ้นงานจานคู่ Metaserv 250 สามารถปรับความเร็วรอบที่ปรับได้ ตั้งแต่ 50-500 รอบต่อ นาที

- เครื่องวัดความหยาบผิว เป็นเครื่องมือวัดความหยาบผิวของงาน หัววัดมีระยะในการลากหัววัดในแนวแกน X ได้ 100 มิลลิเมตร มีความเที่ยงตรง (Traverse Linearity) ในการลากไม่ เกิน $(0.05 + 1L/1000)$ ไมโครเมตร L: Measured length (mm.) แรงกดของหัววัด 0.75 มิลลิ นิวตัน และมีความเร็วในการลากวัดได้ตั้งแต่ 0.02-5.0 มิลลิเมตร ต่อ วินาที หัววัดสามารถยกขึ้นลงในแนวตั้งได้ไม่น้อยกว่า 500 มิลลิเมตร มีความละเอียดของผลการวัด (resolution) 0.05 มิลลิเมตร มีแท่นวางงาน

- เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu



การประชุมวิชาการราชสมาคมกลศาสตร์โลหการผลิตภัณฑ์และการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอร์มิเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

รุ่น ATX224R ซึ่งวัสดุแบบแข็งจากด้านบน ชนิดอ่านละเอียด แสดงผลเป็นตัวเลข ความละเอียดในการอ่านได้ 0.0001 กรัม ซึ่งน้ำหนักได้สูงสุด 220 กรัม งานขนาดกว้างยาว 180×180 มิลลิเมตร ได้รับมาตรฐาน: ISO 9001

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดตั้งโต๊ะพร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุ (FESEM with EDS) ยี่ห้อ ประสิทธิภาพสูง มีกำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า

- ตู้อบความร้อน ปรับอุณหภูมิได้ถึง 300 องศาเซลเซียส ตั้งเวลาการทำงานได้

- เครื่องอัดเข้าพอลิเมอร์ อัดเข้าขึ้นรูปพอลิเมอร์ ด้วยไฮดรอลิก ควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า แรงดันการอัดสูงสุด 55 ตัน สามารถทำความร้อนสูงสุดได้ 400 องศาเซลเซียส แท่นอัดเข้า มีขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร

- แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาดความกว้าง 80 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร สามารถอัดขึ้นงานให้มีความหนาในช่วง 5-30 มิลลิเมตร

- เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบ สมบัติความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีการ Block on ring อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

2.2.1 นำผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ไปตรวจสอบรูปลักษณะสัญญาณด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.2.2 ทำการอบไล่ความชื้นสำหรับพอลิเอทิลีน น้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ด้วยความร้อน 70 °C นาน 0.5 ชั่วโมง

2.2.3 หากยังไม่นำมาใช้ในทันทีจะต้องทำการอบไล่ความชื้นใหม่อีกครั้ง

2.2.4 นำใส่แม่พิมพ์และอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนของแม่พิมพ์ภายใต้ความดันปิดแม่พิมพ์ 5 MPa อุณหภูมิ 140 °C นาน 90 นาที

2.2.5 นำชิ้นงานที่ถอดออกจากแม่พิมพ์ไปตัดออกเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบต่างๆ ด้วยเครื่อง

เครื่องตัดชิ้นงานยี่ห้อ BUEHLER รุ่น IsoMet และเครื่องกัดชิ้นงาน สำหรับตัวอย่างชิ้นงานทดสอบความต้านทานการสึกหรอโดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ 10×10×10 mm³

2.2.6 ขัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Metaserv 250 Grinder-Polisher

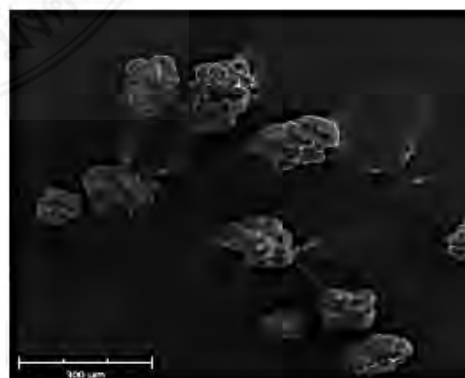
2.2.7 นำชิ้นงานตรวจสอบพื้นผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว

2.2.8 นำชิ้นงานทดสอบความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ตามมาตรฐาน ASTM G77

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ

จากการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เข้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังรูปที่ 3.1 อนุภาคผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดจะมีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกือบตัวเป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆ และมีพังผืดยึดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มีขนาดกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน สำหรับผงอลูมิเนียมจะมีลักษณะเป็นแท่งปรีซึมและกลมคละเคล้ากันที่มีขนาดเฉลี่ย 10-50 ไมครอน



รูปที่ 3.1 รูปร่างสัญญาณของผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่กำลังขยาย 300 ไมครอน

3.2 ผลการทดสอบไตรโบโลยี

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block on Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ ซึ่งมีหลักการของการทดสอบ ดังลักษณะเครื่องที่แสดง ในรูปที่ 3.2 โดยกำหนดขนาดขนาดความ กว้าง x ความยาว x ความหนาเท่ากับ 10x10x10 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีลักษณะแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งพื้นผิวของชิ้นทดสอบถูกเตรียมขึ้นด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 พื้นผิววงแหวนมีความหนาเท่ากับ 0.2 ไมครอน ทำจากเหล็กกล้าแข็ง (AISI 52100) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 มิลลิเมตร ที่ผ่านการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 HRC แรงที่ใช้กดลงบนชิ้นทดสอบเท่ากับ 150 นิวตัน เวลาที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 180 นาที ความเร็วของการหมุนวงแหวนเท่ากับ 300 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทางของการหมุนทดสอบ 5,000 เมตร โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะของการทดสอบแบบแห้ง สำหรับในส่วนของการวิเคราะห์อัตราการสึกหรอ ของชิ้นทดสอบนั้น วิเคราะห์จากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดด้วยทศนิยม 4 ตำแหน่ง คำนวณอัตราการสึกหรอด้วยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบเพื่อหาปริมาตรที่สูญเสีย และนำไปหารกับผลคูณระหว่างแรงที่ใช้ในการกดบน Block กับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบการสึกหรอ
แบบชิ้นงานวางบนวงแหวน [10]



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบไตรโบโลยี

3.2.1 ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอ

ผลการทดสอบอัตราการสึกหรอ พบว่าการให้ความร้อนซ้ำถึงจุดหลอมเหลวจะยิ่งส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง อัตราการสึกหรอ จะยิ่งสูงขึ้น ดังค่าตารางที่ 3.1

3.2.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน พบว่าการให้ความร้อนซ้ำถึงจุดหลอมเหลวจะยิ่งส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังค่าตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 Mechanical properties of UHMWPE recycle			
	UHMWPE Pure Recycle 1	UHMWPE Pure Recycle 2	UHMWPE Pure Recycle 3
ค่าสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทาน	0.1	0.11	0.13
อัตราการสึกหรอ	2.33E-9 mm ³ /N.m	5.23E-8 mm ³ /N.m	7.88E-6 mm ³ /N.m
ค่าความหนาแน่น	0.9347636 g/cm ³	0.9265436 g/cm ³	0.956867 g/cm ³

3.2.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่น พบว่าค่าที่ได้จากการผ่านการให้ความร้อนซ้ำจำนวน 3 ครั้ง มีค่าความหนาแน่นลดลง ดังค่าตารางที่ 3.1

3.3 ผลการตรวจสอบพื้นผิว

จากการตรวจสอบพื้นผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว ดังรูปที่ 3.4 ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว พบว่า มีร่องรอยของการขีดข่วนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหนาผิว

4. อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพทำให้เห็นรูปลักษณ์พื้นฐานของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่มีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกาต์เป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆ และมีพังผืดยึดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มีขนาดกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน และจากการตรวจสอบพื้นผิวด้วยเครื่องวัดความหนาผิว พบว่ามีร่องรอยของการขูดขีดไม่แตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวสีกหรือของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ ในช่วงของการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนนั้น ผลการขึ้นรูปแสดงให้เห็นว่าจะมีความร้อนสูญเสียจากแม่พิมพ์ออกไปภายนอกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้วัสดุภายในแม่พิมพ์ไม่หลอมเหลว การตั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ซึ่งจะต้องตั้งให้อุณหภูมิของตัวกดด้านบนอยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ฐานรากของแม่พิมพ์อยู่ที่ 200 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้ความร้อนสามารถกระจายเข้าไปยังวัสดุที่อยู่ภายในทั้งนี้ยังใช้เวลาในการบ่มความร้อนให้หลอมเหลวนานถึง 3 ชั่วโมง ผลการทดสอบการสีกหรือ การนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดไปหลอมให้ความร้อนซ้ำ 3 รอบนั้น พบว่า การให้ความร้อนซ้ำถึงจุดหลอมเหลวจะยังส่งผลต่อสายโซ่โมเลกุลให้สั้นลง อัตราการสีกหรือสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จะสูงขึ้นไม่มากนักหรือ อาจจะไม่มียะระที่สำคัญมากพอ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวสีกหรือของ

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ และค่าความหนาแน่น ลดลง

5. สรุป

ผลการทดสอบของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผ่านการหลอมขึ้นรูปซ้ำใหม่ พบว่าการหลอมซ้ำด้วยอุณหภูมิที่จุดหลอมเหลวจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้น และอัตราการสีกหรือมีค่าสูงขึ้นไม่มากนักหรือ อาจจะไม่มียะระที่สำคัญมากพอ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวสีกหรือของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ และมียะระความหนาแน่นลดลง จากการตรวจสอบพื้นผิวด้วยเครื่องวัดความหนาผิวพบว่า มีร่องรอยของการขูดขีดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวสีกหรือของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ โดยนำไปเปรียบเทียบกับ S. V. Panin et al. [11] พบว่าการ UHMWPEy+0.5%Al₂O₃, สามารถลดอัตราสีกหรือได้ดีกว่า UHMWPE แสดงให้เห็นว่าถ้ามีความจำเป็นต้องเสริมอนุภาคเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพสมบัติทางกลและไตรโบโลยีให้กับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น จำเป็นต้องมียานวิจัยเกี่ยวกับการผสมสารฟิลเลอร์ใดๆกับ UHMWPE Pure Recycle 1,2,3 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น เช่น UHMWPE Pure Recycle +0.5%Al₂O₃ และต้องมีการทดสอบไตรโบโลยีใหม่อีกครั้ง ปัญหาอย่างหนึ่งที่สำคัญคือการตั้งค่าอุณหภูมิในการหลอมจะต้องทำให้อุณหภูมิของวัสดุถึงจุดหลอมเหลวจริง เพราะการตั้งอุณหภูมิที่แม่พิมพ์นั้นไม่ได้หมายความว่าอุณหภูมิที่วัสดุจะเป็นไปตามที่ตั้งค่าไว้ เพราะจะส่งผลต่อไตรโบโลยีและการสีกหรือ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล



การประชุมวิชาการราชบัณฑิตยสถานเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เซอร์เทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

สุวรรณภูมิ สำหรับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบและทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Eric Shippee, "Industrial Yarn," Dec. 15
- [2] D. Wu *et al.*, "Commodity plastic burning as a source of inhaled toxic aerosols," *J. Hazard. Mater.*, vol. 416, p. 125820, Aug. 2021
- [3] H. Raghuram, J. Roitner, M. P. Jones, and V.-M. Archodoulaki, "Recycling of polyethylene: Tribology assessment," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 192, p. 106925, May 2023.
- [4] W. Li, Z. Wang, N. Liu, and J. Zhang, "Study on Tribological Characteristics of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene under Unsaturated Lubrication of Water and Brine," *Polymers*, vol. 14, no. 19, Art. no. 19, Jan. 2022.
- [5] T. Aoike, D. Yokoyama, H. Uehara, T. Yamanobe, and T. Komoto, "Tribology of ultra-high molecular weight polyethylene disks molded at different temperatures," *Wear*, vol. 262, no. 5, pp. 742–748, Feb. 2007.
- [6] Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk, "Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al₂O₃ for Application in Engineering," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 192-202, Jan.-Jun. 2022.
- [7] A. M. Ventura, L. M. Kneissl, S. Nunes, and N. Emami, "Recycled carbon fibers as an alternative reinforcement in UHMWPE composite. Circular economy within polymer tribology," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 34, p. e00510, Dec. 2022.
- [8] W. Wood and W.H. Zhong, Mechanical and Wear Properties of UHMWPE Nanocomposites Filled with Carbon Nanofillers, 17th International Conference on Composites/Nano Engineering (ICCE-17), July 26-August 1, 2009
- [9] Wang S., Ge S., "The Mechanical Property and Tribological Behavior Of UHMWPE: Effect Of Molding Pressure," *Wear*, vol. 263, no. 7-12, pp. 949-956, 2007.
- [10] ศักดิ์พิพิต เฉลยสรรพ และ สุชาครีย์ รัสเยี่ยม, "เครื่องทดสอบการสึกหรอบนชิ้นงานวางบนวงแหวน," *ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มทร.พระนคร*, 2560.
- [11] S. V. Panin, D. G. Buslovich, L.A. Kornienko, V. O. Alexenko and Yu V. Dontsov, "Development of Two-Component Polymer-Polymeric Composites Based on UHMWPE-PP Blends for Additive Manufacturing," *Journal of Physics: Conf. Series.*, vol. 1260, p. 062017, 2019.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นายรัชพงศ์ กาบจันทร์
 วัน เดือน ปีเกิด 16 มกราคม 2527
 ภูมิลำเนา 110 ม.7 ต.เขวาสินรินทร์ อ.เขวาสินรินทร์ จ.สุรินทร์ 32000

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง	วิทยาลัยเทคนิคสุรินทร์	2550
ระดับปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2553

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

ครูแผนกวิชาช่างยนต์วิทยาลัยสารพัดช่างสุรินทร์