

อิทธิพลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ทางกล และไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Influence of Aluminum Oxide on Thermal Properties, Mechanics and Tribology of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene

พีรศิษฐ์ จุลละโพธิ

Peerasit Chullabodhi

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2566



อิทธิพลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ทางกล และไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลยิ่งยวด

Influence of Aluminum Oxide on Thermal Properties, Mechanics and Tribology of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene

พีรศิษฐ์ จุลละโพธิ

Peerasit Chullabodhi

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ทางกล และไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด
ชื่อ นามสกุล	พีรศิษฐ์ จุลละโพธิ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน)

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

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภุกต์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)
วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ชื่อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ทางกล และไตรโบโลยีของโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด
ชื่อ นามสกุล พีรศิษฐ์ จุลละโพธิ
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อน ทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่อลูมิเนียมออกไซด์และศึกษาประสิทธิภาพทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ วัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและมีสารเติมแต่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ก้อนวัสดุสำหรับการทดลองประกอบด้วย แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิ เวลา รวมถึงสัดส่วนระหว่างโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับอลูมิเนียมออกไซด์ การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 type I การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลที่ได้คือสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 140°C นาน 180 นาที จากผลการทดสอบทางความร้อนประกอบด้วย ค่าจุดหลอมเหลว 145°C, ค่าการนำความร้อน 0.45 W/mK ทดสอบทางแรงดึงประกอบด้วยความเค้นที่จุดคราก (Yield Stress) เท่ากับ 38.58 MPa, Ultimate Tensile Strength เท่ากับ 44.78 MPa, Elongation at Break เท่ากับ ร้อยละ 190.6 และ Modulus of elasticity เท่ากับ 1014.41 MPa มีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 64 shore D มีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงเท่ากับ 70.41 kJ/m^2 และมีอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยส่วนผสม UHMWPE ผสมกับอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าอัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.13, 8.45E-11 mm^3/N.m, และ 1.698514 g/cm^3 ตามลำดับ

คำสำคัญ : สมบัติทางกล, สมบัติทางความร้อน, โพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด, ไตรโบโลยี, ผงอลูมิเนียมออกไซด์

Thesis Title Influence of Aluminum Oxide on Thermal Properties, Mechanics and Tribology of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene
Author Peerasit Chullabodhi
Degree Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major Program Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year 2023

ABSTRACT

This research aimed to study the thermal properties, mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene mixed with aluminum oxide and to study the tribological performance of ultra-high molecular weight polyethylene mixed with Aluminum oxide. The two materials used in the study consisted of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) as the base material and an aluminum oxide (Al_2O_3) additive. Variable used in a hot extrusion process to obtain the material for the experiment included extrusion force, temperature, time, and ratio between ultra-high molecular weight polyethylene and aluminum oxide. Mechanical property testing included Impact test, Hardness test according to ASTM D2240, tensile test according to ASTM D638 type I, Wear test according to ASTM G77. The result was hot extrusion under the condition of pressure 5 MPa and a temperature 140°C for 180 minutes. The Thermal test result included Melting Point equal to 145°C, Thermal Conductivity equal to 0.45 W/mK. Tensile test results included yield stress equal to 38.58 MPa, Ultimate Tensile Strength equal to 44.78 MPa, Elongation at Break equal to 190.6% and Modulus of elasticity equal to 1014.41 MPa, It had a maximum hardness value of 64 shore D. a high impact resistance value of 70.41 KJ/m^2. There was a wear rate of the test pieces that were hot extruded using UHMWPE mixed with aluminum oxide (Al_2O_3). It had a coefficient of friction. eat Wear rate value and density values were 0.13, 8.45E-11 mm^3/N.m, and 1.698514 g/cm^3, respectively.

Keywords : Mechanical Property, Thermal Property, Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, Tribology, Aluminum Oxide

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเมตตากรุณา ช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากอาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติภุกต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ มอบความรู้ ชี้แนะแนวทาง ช่วยเตรียมวัสดุสำหรับการทดลองและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.จิระศักดิ์ ธาระจักร สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ และช่วยเหลือในการทดสอบ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.แจ๊ค ชุ่มอินทร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความช่วยเหลือ มอบความรู้ในการใช้อุปกรณเครื่องมือคำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ภรรยา สมาชิกในครอบครัว ญาติมิตร ครูอาจารย์ และเพื่อนสนิททุกท่าน ผู้ที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ แล้วคอยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในด้านการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะมีประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมสำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

พีรศิษฐ์ จุลละโพธิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 กรอบการวิจัย	24
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	25
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	31
3.2 การดำเนินการเตรียมผงวัสดุ UHMWPE ผสมกับอนุภาค Al_2O_3	34
3.3 การอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสมอนุภาค Al_2O_3 ขนาดต่างๆ	36
3.4 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล	37
3.5 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ XRD Pattern สำหรับ UHMWPE และ Al_2O_3	45
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล	47
4.3 ผลการทดสอบทางความร้อน	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	60
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก ภาพการนำเสนอเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ	67
ภาคผนวก ข ใบรับรองผ่านการนำเสนอผลงานทางวิชาการ	70
ภาคผนวก ค บทความวิจัยที่นำเสนอเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ	72
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สารเพิ่มความทนแรงกระแทกที่สำคัญทางการค้า	14
3.1	สมบัติของ UHMWPE U511	48
3.2	แสดงรายละเอียดน้ำหนักรวม 100 กรัม ของผงอนุภาค Al_2O_3 ต่อผง UHMWPE	50
3.3	ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่าง ๆ	53
4.1	ค่าความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	48
4.2	ค่าความแข็งของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	48
4.3	ค่าทดสอบแรงดึง ค่า Yield Strength ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	48
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอัตราการสึกหรอและค่าความหนาแน่นของ UHMWPE+Al_2O_3	49
4.5	ค่าทดสอบแรงดึง ค่า Elongation at Break ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	50
4.6	ค่าทดสอบแรงดึง ค่าModulus of elasticity ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	51
4.7	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	51
4.8	ค่าอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	52
4.9	ค่าความหนาแน่น (Density) ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	52
4.10	ค่าจุดหลอมเหลว ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	53
4.11	ค่าการนำความร้อน ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	53

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา	3
2.2	แผนผังโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโมโนเมอร์และพอลิเอทิลีน	4
2.3	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE	5
2.4	DSC กราฟของ UHMWPE	6
2.5	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรด GUR 1020 ความหนา 100 μm จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	10
2.6	รูปแบบการสึกหรอของพอลิเมอร์; a) การสึกหรอแบบยึดติด b) การสึกหรอแบบขัดถู c) การสึกหรอแบบล้าตัว d) การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล	11
2.7	อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวหลังจากผ่านการลื่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ	13
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น	14
2.9	โครงสร้างผลึกของ PTFE และโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE	15
2.10	การสึกหรอและชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE	16
2.11	กลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่	17
2.12	เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D	18
2.13	เครื่องทดสอบแรงดึง	19
2.14	เครื่องทดสอบแรงกระแทก	19
2.15	(a) Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว และ (b)วัสดุเปราะ	20
2.16	การทดสอบแรงกระแทกแบบ a) Charpy และ b) Izod	20
2.17	ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก	21
2.18	แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.19	a) ไดอะแกรมเครื่องทดสอบการสึกหรอ b) ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ	23
2.20	a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ	23
2.21	เครื่องชั่งน้ำหนัก a) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224 สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ และ b) เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.1 g ยี่ห้อ AND รุ่น EK-1200i	24
2.22	กรอบการวิจัย	25
2.23	ไมโครกราฟ SEM ของฟิล์มถ่ายโอนที่เกิดขึ้นที่โหลด 30 N และความเร็วการเลื่อนที่ 0.2094 m/s (a) UHMWPE, (b) 10 wt% talc / UHMWPE, (c) 20 wt% talc/UHMWPE	28
2.24	การแยกตัวระหว่างการทดสอบความเป็นไปได้ของชิ้นงานดัดแปลง DCB ที่มีความกว้าง 20 mm ของโหลดในอัตราการเคลื่อนที่ 0.5 mm/min	29
2.25	ตัวอย่างหลังจากการทดสอบ interlaminar shear ของ (a) SLJ และ (b) DENS	29
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	32
3.2	ภาพถ่ายขยายลักษณะสัณฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์เบอร์ SA32	33
3.3	อุปกรณ์ในการเตรียมผงและการชั่งน้ำหนักผง UHMWPE ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg	35
3.4	การชั่งตวงน้ำหนักผงอนุภาค Al_2O_3	35
3.5	การละลายผงอนุภาค Al_2O_3 ในเมทิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser	36
3.6	การผสมผงอนุภาค Al_2O_3 + UHMWPE แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง High speed homogenizer	36
3.7	เทผง UHMWPE ที่ปั่นผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ใส่ในถาดและนำไปเข้าตู้อบลมร้อน	36
3.8	ผง UHMWPE ที่มีส่วนผสมของ Al_2O_3 ผสมอยู่ภายในหลังจากที่ทำการอบแห้งแล้ว	37
3.9	แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 160x80x50 mm	37
3.10	แสดงเครื่องอัดเบ้าพอลิเมอร์สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อนผงอนุภาคUHMWPE ผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3	37
3.11	ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.12	เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D และลักษณะการทดสอบ	39
3.13	ความแข็ง	
3.14	เครื่องทดสอบแรงดึงและลักษณะการจับยึดชิ้นงาน	40
	ค่าพิกัดของส่วนต่างๆของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638	40
3.15	ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง	41
3.16	ตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	41
3.17	เครื่องทดสอบแรงกระแทกชิ้นงาน แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D256	42
3.18	เครื่องชั่งน้ำหนัก Shimadzu digital รุ่น ATX224 ความละเอียด 0.1 mg (0.0001 g) สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ	43
3.19	เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน ยี่ห้อ NETZSCN SFA 449 JUPITER	43
3.20	เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน ยี่ห้อ NETZSCN LFA 467 HT	44
4.1	รูปลักษณ์สัณฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	46
4.2	รูปลักษณ์สัณฐานของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด(SEM) ที่กำลังขยาย 30 ไมครอน	46
4.3	XRD Pattern ของ UHMWPE ที่ใช้ในงานวิจัย	46
4.4	กราฟแสดงผล ค่าความทนต่อแรงกระแทกของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละชิ้นทดสอบ	48
4.5	กราฟแสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ	49
4.6	กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Yield Strength ของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	51
4.7	กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Ultimate Tensile Strength ของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	52
4.8	กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Elongation at Break ของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	53
4.9	กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of elasticity ของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	54
4.10	กราฟแสดงผลการทดสอบไตรโบโลยี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3กราฟแสดงผลการทดสอบ	55
4.11	ไตรโบโลยี ค่าอัตราการสึกหรอของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.11	กราฟแสดงผลการทดสอบไตรโบโลยี ค่าอัตราการสึกหรอของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	57
4.12	กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ค่าจุดหลอมเหลว ของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	58
4.13	กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ค่าการนำความร้อน ของ UHMWPE ที่ผสมกับผง Al_2O_3 ที่ร้อยละของ Al_2O_3	59

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำเอาพอลิเมอร์มาใช้เพื่อการผลิตชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักรกลมากขึ้นซึ่งจะเป็นวัสดุทางเลือกที่ดีในอุตสาหกรรมยุคปัจจุบันโดย UHMWPE เป็นอีกตัวที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรมและด้านวิศวกรรมเครื่องกลเนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) และ UHMWPE ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแท่งหรือแผ่น consolidate UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศและไม่มีการผลิตภายในประเทศ การนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้น UHMWPE สามารถนำไปใช้ได้กับเครื่องจักรกลต่างๆ ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมเครื่องสำอางที่ต้องการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์เหล่านี้โดยตรงเนื่องจาก UHMWPE ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และที่สำคัญที่สุดคือมีความลื่นตัวเองสูง สามารถหล่อลื่นได้ในตัวทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรเหล่านั้นไม่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นในการหล่อลื่น [1]

ในปัจจุบันนั้นมีการนำ โพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) มาใช้กันอย่างแพร่หลายอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ ระบบการผลิตแบบอัตโนมัติ ชิ้นส่วนกลไกภายในรถยนต์ อีกทั้งยังมีการนำมาใช้ทางการแพทย์ สำหรับเป็นวัสดุทดแทนข้อต่อสะโพก ข้อเข่า เป็นต้น การนำโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดมาใช้งานได้หลากหลาย โดยที่โพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดนั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานเช่น มีพื้นผิวที่ลื่น สามารถนำมาใช้งานในส่วนของการรองลื่นระหว่างตัวยึดกับแกนเพลา ในระบบการผลิตอัตโนมัติ การนำมาทำเป็น แบริ่ง เฟือง เกียร์ ในรถยนต์ การนำมาทำเป็นลูกกลิ้งสำหรับรางสายพานการผลิต นำมาเป็นวัสดุรองลื่นในกระบะรถบรรทุกเพื่อให้เกิดความลื่นในระหว่างการเทดิน ในทางอุตสาหกรรมเคมีได้มีการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องด้วยคุณสมบัติที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีใดๆ และมีความลื่น จึงถูกนำมาใช้งาน

ด้วยประเทศไทยมีการใช้โพลิเอทิลีนน้ำหนักโมกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักแต่เนื่องจากคุณสมบัติบางประการที่ไม่สามารถนำโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมกุลสูงยิ่งยวด มาใช้งาน ไม่ว่าเป็นเรื่องคุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติทางกล จึงได้มีการเพิ่มเติมสารบางชนิดลงไปเพื่อให้สมบัติทางกลสูงขึ้นและเหมาะสม ซึ่งก็คือ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) จนกลายเป็น UHMWPE Composite ซึ่งอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและสมบัติทางกลที่ต้องพิจารณาประกอบด้วย ความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก ความยืดหยุ่น จุดหลอมเหลว ค่าการนำความร้อน การสึกหรอ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลสมบัติทางความร้อน ทางกลของอลูมิเนียมออกไซต์ที่ส่งผลต่อพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

1.2.2 เพื่อศึกษาไตรโบโลยีและการสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมอลูมิเนียมออกไซต์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วัสดุตั้งต้นคือ ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

1.3.2 วัสดุฟิลเลอร์เป็นผงอลูมิเนียมออกไซต์ที่มีขนาดในระดับไมครอน

1.3.3 ศึกษาเฉพาะสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล (ประกอบด้วย ค่าความแข็ง ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าความเค้นคราก ค่ายังส์โมดูลัส ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด) และไตรโบโลยี

1.3.4 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ที่ความดัน 5 MPa

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ สำหรับการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE composite

1.4.2 ได้ส่วนผสม UHMWPE composite ที่เหมาะสม

1.4.3 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ UHMWPE ในงานอุตสาหกรรม

1.4.4 ได้ความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการทำงาน การเก็บข้อมูล หลักการวิเคราะห์ข้อมูลวิธีการสรุปผลและหลักการนำเสนองาน

1.4.5 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารและประชุมสัมมนาทางวิชาการ

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: 09 8279 5855

1.5.2 สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร1381 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138
โทรศัพท์มือถือ: 09 8279 5855

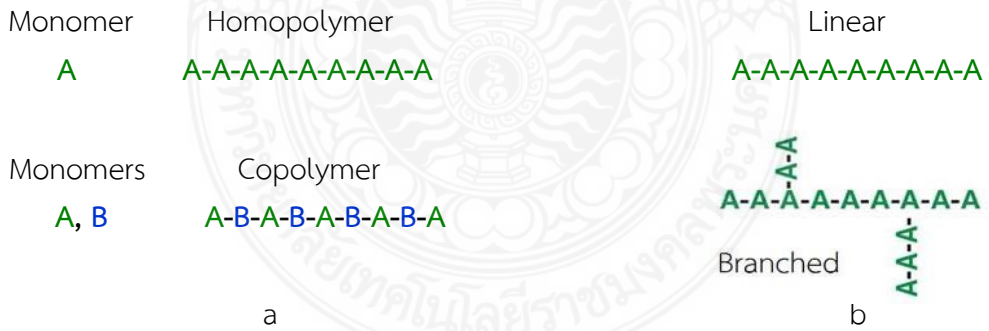
1.5.3 สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
71 ถนน นนทบุรี บางกระสอ อำเภอเมืองนนทบุรี นนทบุรี 11000
โทรศัพท์: 035 709 101

บทที่ 2
ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีของพอลิเมอร์และ UHMWPE พอลิเมอร์

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทกเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่างๆ การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เฟือง เกียร์ แบริ่ง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีการนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหินหรือพื้นกระบะรถบรรทุกเป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์นั้น พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) นั้นถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่บริเวณที่เป็นข้อต่อสะโพก, ข้อเข่า (Total joint replacement) สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ [1, 3] พอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยของไฮโดรเจนและคาร์บอนหลายๆโมเลกุล (Poly) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งแต่โมเลกุลย่อยหรือที่เรียกว่า “โมโนเมอร์ (Monomer)” ของพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบเหมือนกันเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจะเรียกว่า Homopolymer แต่ถ้าแต่ละส่วนหรือแต่ละโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันมีความแตกต่างกันจะเรียกว่า Copolymer ดังลักษณะแผนภาพการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.1a โดยที่สัญลักษณ์ A, B คือ โมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน [1], [5], [6]

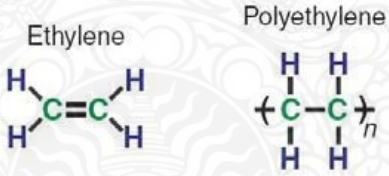


รูปที่ 2.1 a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา [1], [5], [6]

โมโนเมอร์ของพอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวกันเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2..1b ซึ่งแนวโน้มของการเกิดการจัดเรียงตัวแบบกิ่งก้านสาขานี้ขึ้นอยู่กับการควบคุมสภาวะของขบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นสิ่งที่ควรจำและทำความเข้าใจก็คือรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ดังลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล

ที่แสดงในรูปที่ 2a และ 2b ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างง่ายๆของโครงสร้างพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Copolymer มีความเป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างย่อยหรือโมโนเมอร์ย่อยต่างชนิดกันตามชนิดของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไป แต่ในทางปฏิบัติในอุตสาหกรรมพอลิเอทิลีน รวมทั้ง UHMWPE จะเป็น Copolymer ที่เกิดร่วมกับโมโนเมอร์อื่นๆ (ตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) 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) และนอกจากนี้รูปแบบการก่อตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ย่อย ๆ เชื่อมต่อเข้าด้วยกันทำให้พอลิเมอร์มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของพอลิเมอร์

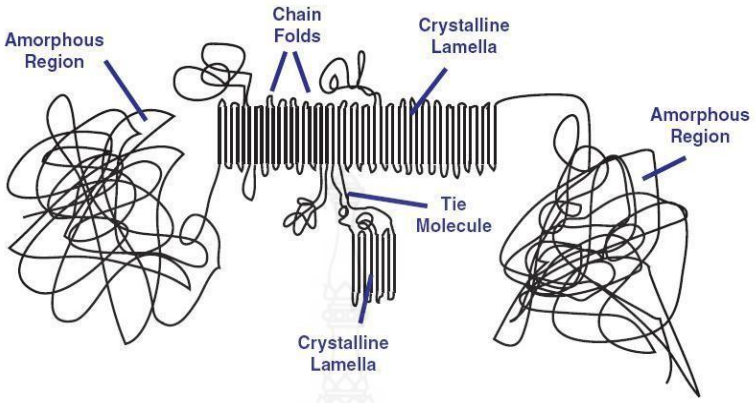
2.1.1.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ก่อตัวหรือสังเคราะห์จากแก๊สเอทิลีนโมโนเมอร์ (Ethylene monomer (C2H4)) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28, สูตรเคมีโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีน คือ – (C2H4)n– โดยที่ n คือ degree of polymerization ซึ่งแผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและ พอลิเอทิลีน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2 [1], [5], [6]



รูปที่ 2.2 แผนผังโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโมโนเมอร์และพอลิเอทิลีน [1], [5], [6]

สำหรับพอลิเอทิลีนสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยเอทิลีนโมโนเมอร์ตั้งแต่ 200,000 หน่วยเรียงต่อกันซ้ำๆหรือในอีกหนึ่งความหมายสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนมากถึง 400,000 อะตอม ซึ่งพอลิเอทิลีนยังสามารถแบ่งชนิดแยกย่อยออกได้หลายชนิด (LDPE, LLDPE, HDPE, PE1000 และ UHMWPE) ตามขบวนการสังเคราะห์ โดยพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาด้วยขนาดของมวลโมเลกุลและรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน 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 1x106 g/mol แต่ในความเป็นจริงมวลโมเลกุลที่สูงมากๆเช่นนี้ไม่สามารถทำการ

วัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดาทั่วๆไปแต่จะทำการวัดเปรียบเทียบอนุมานแทนด้วยค่า intrinsic viscosity (IV) [1], [5], [6]

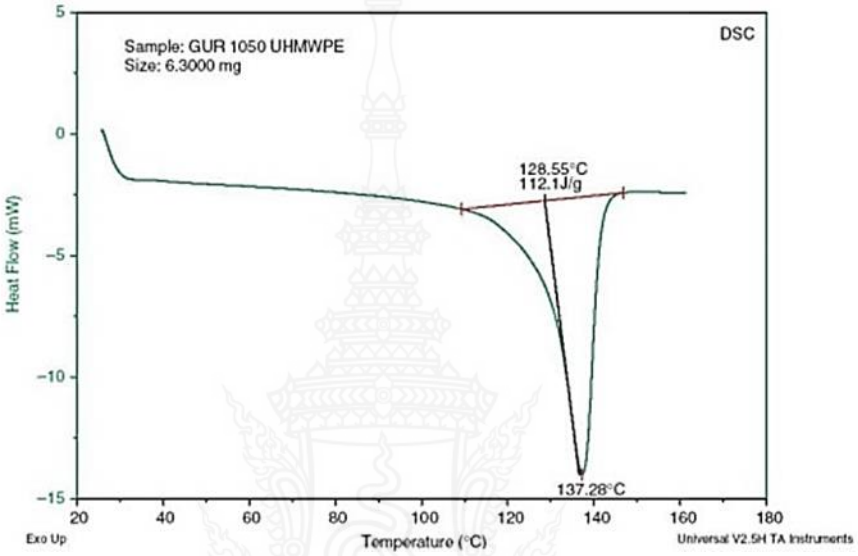


รูปที่ 2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE [1], [5], [6]

2.1.1.2 สภาพความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (Crystallinity of polymer) วิธีการหนึ่งที่ช่วยให้สามารถจินตนาการเห็นสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE คือสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นเชือกหรือสายโซ่ที่พันกันยุ่งเหยิงคล้ายสปาเกตตี้ที่มีความยาวมากกว่าหนึ่งกิโลเมตร เนื่องจากสายโซ่จะไม่อยู่นิ่งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและมีการดูดซับพลังงานความร้อนภายในตลอดเวลาส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point) สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE มีแนวโน้มที่จะเกิดการสับเปลี่ยนพันธะของ C-C และทำให้เกิดการพับของสายโซ่ (Chain fold) การพับงอของสายโซ่กลับไปกลับมาเช่นนี้ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Ordered) เฉพาะบางช่วงบริเวณ, บริเวณที่มีการพับงอสายโซ่เป็นแผ่นนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและเรียกว่า “ผลึกแผ่น (Crystalline lamella)” ที่มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกบางๆ โดยผลึกแผ่นเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ภายในบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) และสามารถที่จะเชื่อมต่อกับผลึกแผ่นข้างเคียงได้ด้วยพันธะโมเลกุล (Tie molecule) ซึ่ง UHMWPE มีลักษณะรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลและความเป็นผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.3 [1], [5], [6]

2.1.1.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal transition of polymer) วิธีการหนึ่งที่ใช้จำแนกหรือทำให้เห็นความแตกต่างของลักษณะจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดคืออุณหภูมิที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เหล่านั้นในที่นี้จะขอย้อนกล่าวไปถึงรูปแบบของสายโซ่โมเลกุล UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นสปาเก็ตตี้ที่ยาวและพันกันยุ่งเหยิง ซึ่งสามารถจินตนาการได้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกลับไปกลับมาและเกิดการบิดงอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนหรืออาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะต้องเผชิญกับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน 3 ด้านหลักๆ คือ อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature; T_g), อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point temperature; Tm) และอุณหภูมิไหลตัว (Flow temperature; T_f) อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature; T_g) คืออุณหภูมิต่ำสุดที่สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีพฤติกรรมเปราะคล้ายแก้ว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนไม่เพียงพอที่จะเลื่อนผ่านสายโซ่อื่นได้

และมีวิธีเดียวที่วัสดุจะตอบสนองต่อความเค้นทางกลที่มากระทำคือการยืดออกหรือแตกออกจากพันธะที่ประกอบกันเป็นสายโซ่โมเลกุลในกรณีของ UHMWPE, T_g จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 160°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิ T_g สายโซ่โมเลกุลบริเวณพื้นที่ที่เป็นอสัณฐานภายในพอลิเมอร์จะเคลื่อนตัวได้มากขึ้นและเมื่ออุณหภูมิของ UHMWPE เพิ่มสูงขึ้นกว่า 60-90°C ผลึกที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่เล็กกว่าผลึกในพอลิเมอร์จะเริ่มหลอมละลายซึ่งพฤติกรรมการหลอมละลายของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi crystalline polymer) รวมทั้ง UHMWPE ถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดปริมาณของ



รูปที่ 2.4 DSC กราฟของ UHMWPE [1], [5], [6]

ผลึกของพอลิเมอร์หรือที่เรียกว่า “สภาพความเป็นผลึก (Crystallinity)” และสามารถวัดได้ด้วยการใช้ differential scanning colorimeter (DSC) โดย DSC จะวัดปริมาณความร้อนจำเพาะที่จำเป็นต้องใช้ต่อการเพิ่มอุณหภูมิของพอลิเมอร์ตัวอย่าง DSC data 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 ยิ่งมากมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิหลอมละลายสูงกว่าผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือผลึกที่มีขนาดเล็กกว่าบริเวณพื้นที่ด้านล่างภายใต้จุดหลอมละลายสูงสุด คือ สัดส่วนของสภาพความเป็นผลึกหรือปริมาณผลึกที่เรียกว่า ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) นอกจากนี้ DSC ยังสามารถวัดปริมาณพลังงานความร้อนสุทธิต่อหน่วยมวล (ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้สำหรับการหลอมละลาย (Enthalpy) หรือ (Homotherm) ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการหลอมละลายบริเวณส่วนที่เป็นผลึกภายในชิ้นทดสอบโดยเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลง enthalpy ของชิ้นทดสอบที่มีความสมบูรณ์ของผลึก 100% (Enthalpy ของ UHMWPE บริสุทธิ์ H_f = 291 J/g) และคำนวณออกมาเป็นปริมาณผลึกสำหรับก้อนวัสดุ UHMWPE ส่วนใหญ่จะมีปริมาณผลึกประมาณ 50-55% ในขณะที่อุณหภูมิของพอลิเมอร์กึ่งผลึกถูกทำให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลาย

พอลิเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดการไหลตัว (Flow transition, T_f) และกลายเป็นของเหลว สำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า 500,000 g/mol สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมการไหลได้ง่ายแต่อย่างไรก็ตามสำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า 500,000 g/mol ด้วยสายโซ่โมเลกุลที่มีปริมาณมากกว่าและซับซ้อนมากกว่าจะเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการไหลส่งผลให้ UHMWPE ไม่แสดงพฤติกรรมการไหลตัวหรืออาจกล่าวได้ว่า “ไม่มีจุดไหลตัว” เหมือนพอลิเอทิลีนชนิดอื่น ๆ [1], [5], [6]

2.1.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์บริสุทธิ์ส่วนใหญ่มีสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอต่ำซึ่งบางครั้งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆเหล่านี้ด้วยการผสมสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆให้สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานและนอกจากนี้ยังมีการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูป ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูปนี้โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่าพอลิเมอร์คอมปาวด์ (Polymer compound) สารเติมแต่งที่ใช้ผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ประกอบด้วยฟิลเลอร์ (Filler) สารประสาน (Coupling agents) สารเพิ่มความทนแรงกระแทก (Impact modifiers) สารก่อผลึก (Nucleating agents) พลาสติไซเซอร์ [1], [6]

2.1.2.1 ฟิลเลอร์ (Filler)หมายถึง สารเติมแต่งที่ผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มเนื้อหรือปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ (บางครั้งเรียกว่า สารเพิ่มเนื้อ (Insert fillers)) และปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ (หรือเรียกว่าสารเสริมแรง (Reinforcing fillers)) และนอกจากนี้ฟิลเลอร์ยังมีส่วนช่วยลดต้นทุนการผลิตชิ้นงานที่ทำจากพอลิเมอร์ซึ่งเรียกฟิลเลอร์ชนิดนี้ว่า เอกเทนเดอร์ (Extenders) [1], [6]

2.1.2.2 สารประสาน (Coupling agents)สารที่ทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมการเกาะยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์ ซึ่งบางครั้งเรียกว่าสารช่วยยึด (Adhesion promoters) และนอกจากนี้ในการใช้สารประสานบางครั้งอาจมีความจำเป็นที่ต้องใช้สารปรับปรุงพื้นผิวฟิลเลอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือความแข็งแรงของการเกาะยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์ สารประสานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปประกอบด้วย สารโครเมียมเชิงซ้อน (Chromium complexes) ซิลเลน (Silanes) ไททาเนต (Titanates) และเซอร์โคเนียมอะลูมิเนต (Zirconium aluminates) [1], [6]

ตารางที่ 2.1 สารเพิ่มความทนแรงกระแทกที่สำคัญทางการค้า [1], [6]

สารเพิ่มความทนแรงกระแทก	องค์ประกอบ / สัณฐานวิทยา	ใช้งานกับ
EPDM	เอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์	PP, PS
Functionalized polyolefins	พอลิโอเลฟินส์ถูกดัดแปลงด้วยกรด	PA, PC
เทอร์โมพลาสติก-พอลิเอสเตอร์ อิ 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’/polymathacrylic ‘shell’	PVC, PC, PET

MBS (core-shell)	Polybutadiene or polybutadiene/styrene ‘core’ Polymeethacrylic ‘shell’	PVC, PC, PET, PBT
ABS	อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน เทอร์พอลิเมอร์	PVC, PC, PUR, PET
EVA	เอทิลีน-ไวนิลแอซิเตตโคพอลิเมอร์	PVC
SBR	ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน	PS
NBR	อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีนโคพอลิเมอร์	PVC
CPE	คลอริเนเตดพอลิเอทิลีน	PVC

2.1.2.3 สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers) พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติเปราะและขาดความเหนียว (Toughness) และความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ต่ำการทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะลดลงและมีความทนทานต่อแรงกระแทกหรือมีความเหนียวเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการผสมสารเติมแต่งที่เรียกว่า สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers) ตัวอย่างสารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 2.1 [1], [6]

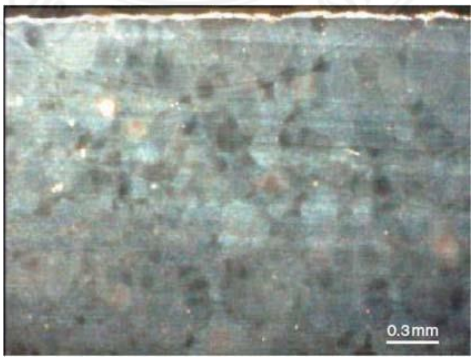
2.1.2.4 ก่อผลึก (Nucleating agents) เป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่ช่วยเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์ โดยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมหรือนิวเคลียสก่อผลึกซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางกลสูงขึ้น ในขณะเดียวกันผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ (โครงสร้างผลึกมีความละเอียด) ส่งผลให้แสงผ่านได้มากขึ้นพอลิเมอร์จึงมีสมบัติโปร่งแสงขึ้น [1], [6]

2.1.2.5 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) กระบวนการเพิ่มความอ่อนนุ่มให้กับพอลิเมอร์หรือที่เรียกว่าพลาสติไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่ผสมเข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่าพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Extensibility or stretchability) ของพอลิเมอร์ [1], [6]

2.1.3 กระบวนการขึ้นรูป UHMWPE [1], [6]

จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆที่ประกอบไปด้วย C และ H ดังที่ ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นเพียงแค่ความรู้พื้นฐานขององค์ประกอบทางเคมีเท่านั้น แต่ถ้าต้องการอธิบายให้ลึกซึ้งจนสามารถจินตนาการออกมาเป็นก้อนวัสดุ UHMWPE ที่สามารถจับต้องและนำไปใช้งานได้จะต้องอธิบายให้เห็นภาพขั้นตอนต่างๆ ของกรรมวิธีการผลิต โดยขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตชิ้นงาน UHMWPE นั้นมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยน ethylene gas ให้เป็นผง UHMWPE ด้วยขบวนการ polymerization ขั้นตอนที่สองคือผง UHMWPE ถูกทำให้อยู่ในรูปของแข็งเป็นแผ่น แท่ง ก้อนหรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จ (Semi-Finished Product) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จด้วยวิธีการตัดเฉือน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.5c สำหรับในกรณีของชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กอาจจะทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีการตัดเฉือนซึ่งขบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปนี้เรียกว่า “ direct compression molding (DCM)” แต่ละขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตพื้นฐานทั้ง 3 ขั้นตอนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของ UHMWPE ตัวอย่างเช่นในกรณีของการตัดเฉือนขึ้นรูปการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปร่างภายนอกและปรากฏที่ผิวเท่านั้น แต่

การเปลี่ยนแปลงของขบวนการ polymerization จะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของ UHMWPE และผลิตภัณฑ์ทั้งหมดการขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัสดุก้อน UHMWPE จะต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง เนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดสูงดังที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ซึ่ง UHMWPE จะไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ จากเหตุผลนี้ทำให้ UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปทั่วๆไปที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติกอาทิเช่นการฉีดขึ้นรูปการอัดรีดด้วยสกรู หรือการเป่าขึ้นรูป แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion การก่อตัวเป็นของแข็งจากการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion เกิดขึ้นภายใต้สภาวะของการรวมกันของอุณหภูมิความดันและเวลาที่เหมาะสม โดยความแม่นยำเที่ยงตรงของการรวมกันของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรที่เป็นค่าเฉพาะของ UHMWPE ถูก นำมาใช้ในการผลิตวัสดุก้อน UHMWPE เชิงพาณิชย์ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปตามหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ [1], [7]-[21] ว่ากลไกที่ควบคุมการก่อตัวเป็นของแข็งคือการแพร่ของอะตอมที่เป็นเนื้อหลัก (Self-diffusion) ในขณะที่สายโซ่โมเลกุล UHMWPE (หรือบางส่วนของสายโซ่) ของอนุภาคเกิดการแทรกตัวเข้าหากันในระดับโมเลกุล โดยจลศาสตร์ของการแพร่บริเวณขอบเกรนที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมประสานของขอบเกรนบริเวณที่อยู่ติดกัน (ที่ความดันสูง) และความร้อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (ที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งส่งผลให้ขบวนการแพร่มีข้อจำกัดเนื่องจากการก่อตัวเป็นของแข็ง UHMWPE จะเกิดขึ้นด้วยภายใต้อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE หลังจากการก่อตัวขึ้นรูปเป็นของแข็ง ผง UHMWPE จะยังคงรักษาสภาพการเป็นเม็ดอนุภาคภายในโครงสร้างเม็ดเกรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการผสม calcium-stearate ในผง UHMWPE [1], [7], [9], [18], [21] จะสังเกตเห็นโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนที่มีลักษณะจำเพาะของ UHMWPE ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยชิ้นทดสอบจะต้องผ่านการเตรียมด้วยวิธีการเฉพาะที่แตกต่างกัน วิธีมาตรฐานที่ใช้สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบได้มีการอธิบายไว้อย่างละเอียดในมาตรฐาน ASTM F648 โดยชิ้นทดสอบจะถูกเตรียมให้เป็นแผ่นบางๆคล้ายแผ่นฟิล์มที่มีความหนาในหน่วยไมโครเมตรจากนั้นจึงนำไปทำการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในโหมด dark field [1], [21] แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันไม่มีการผสม calcium-stearate ในผง UHMWPE ส่งผลให้การวิเคราะห์ตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



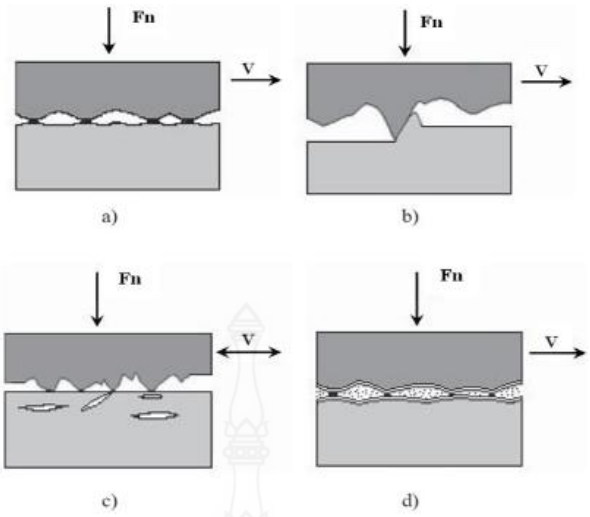
รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรด GUR 1020 ความหนา 100 μm จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [22]

ทำได้ยากขึ้น ดังลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคจากการก่อตัวเป็นของแข็งของผง UHMWPE เกรด GUR 1020 (ของ Rolf Kaldeweier, Ticona, Inc.) โดยชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆความหนาประมาณ 100 μm [1], [9]

นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคของก้อนวัสดุ UHMWPE ยังสามารถทำการตรวจสอบได้โดยการนำชิ้นทดสอบไปแช่แข็งในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการหักทำลายชิ้นทดสอบ [1], [7] หรือตามด้วยการกัดด้วยกรดเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นอาณาบริเวณขอบเกรนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น [1], [21] หลังจากนั้นจึงนำชิ้นทดสอบไปทำการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโดยการตรวจสอบพื้นผิวรอยแตกหักหลังจากผ่านการแช่แข็งหรือพื้นผิวหลังจากผ่านการกัดกรด ความแตกต่างของขอบเกรนที่เกิดขึ้นเป็นตัวสะท้อนลักษณะโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนของ UHMWPE โดยความบกพร่องของก้อนวัสดุ UHMWPE จะเพิ่มขึ้นถ้าสภาวะของการก่อตัวขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็งไม่เหมาะสม (อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่ไม่เหมาะสม) [1], [23] ซึ่งโดยส่วนใหญ่ความบกพร่องที่พบจะอยู่ในรูปของเม็ดอนุภาคเดียว ที่ไม่มีการเกาะยึดเชื่อมประสานติดกับเม็ดอนุภาคอื่นๆหรือมีบางอาณาบริเวณของการก่อตัวเป็นของแข็งแยกตัวหรือไม่มีการเชื่อมประสานกับอาณาบริเวณข้างเคียงสำหรับในส่วนของเทคนิคและวิธีการมาตรฐาน (ASTM F648) เกี่ยวกับการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุก้อน UHMWPE ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ตรวจสอบความบกพร่องของการหลอมรวมผง UHMWPE และนอกจากนี้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายซึ่งประกอบด้วย laser candling และ ultrasound ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบในอุตสาหกรรมได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรดทางการแพทย์ด้วยเช่นกันแต่เทคนิคการตรวจสอบดังกล่าวไม่ใช่วิธีการมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ

2.1.4 การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์

พื้นผิวของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสีจะเกิดการสึกหรอจากการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสที่แข็งกว่า การประยุกต์ใช้งานวัสดุคู่สัมผัสโลหะแข็งขัดถูเสียดสีกับพื้นผิวพอลิเมอร์นั้นถูกกำหนดตามความต้องการของการออกแบบทางกลและรวมถึงข้อเท็จจริงที่ว่าพอลิเมอร์สามารถต้านทานการเสียดสีกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสได้ดีกว่าการลื่นไถลเสียดสีตัวมันเองโดยรูปแบบพื้นฐานการสึกหรอของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เริ่มต้นจากก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสโลหะที่แข็งกว่า ซึ่งการก่อตัวของชั้นฟิล์มนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของพอลิเมอร์ [1], [24] การสึกหรอของพอลิเมอร์โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มรูปแบบการสึกหรอออกได้เป็น 4 รูปแบบประกอบด้วยการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) และการสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล (Tribochemical wear) [1], [25]-[27] ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6 [1], [9]



รูปที่ 2.6 รูปแบบการสึกหรอของพอลิเมอร์; a) การสึกหรอแบบยึดติด b) การสึกหรอแบบขัดถู c) การสึกหรอแบบล้าตัว d) การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล [25]

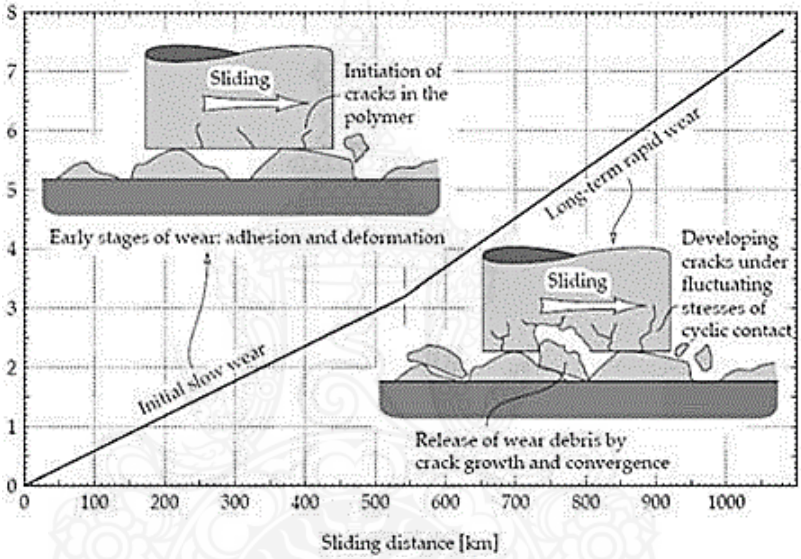
2.1.4.1 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) การสึกหรอแบบยึดติดเป็นรูปแบบการสึกหรอที่มีลักษณะปรากฏเป็นจุดเชื่อมประสาน (Micro welds) ระหว่างพื้นผิวของวัตถุสองชิ้นที่นำไปสู่การเสียดทานดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6a โดยจุดเชื่อมประสานเหล่านี้อ่อนแอและเกิดการเฉือนขาดบริเวณรอยต่อเชื่อมประสานของพื้นผิวทั้งสอง ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่จุดเชื่อมประสานมีความแข็งแรงสูงพื้นผิวของวัตถุที่อ่อนกว่าจะถูกเฉือนและส่งผลให้เกิดการถ่ายเนื้อวัสดุไปยังพื้นผิววัตถุที่แข็งกว่า กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการไถลเสียดทานของพื้นผิวพอลิเมอร์บนพื้นผิววัสดุต่างกัน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะ) ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่ความแข็งแรงของการยึดติด (adhesive bonds) ที่ก่อตัวขึ้นระหว่างพื้นผิววัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันมีความแข็งแรงมากกว่าความแข็งแรงเหนียวแน่น (cohesive strength) ของเนื้อพอลิเมอร์จะมีผลทำให้เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เกาะยึดติดบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและในขณะเดียวกันฟิล์มพอลิเมอร์บางส่วนเกิดการหลุดร่อนออกจากอาณาบริเวณของความเสียดทานกลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ (wear debris) [1], [28] ผลของการสึกหรอแบบยึดติดที่เกิดจากการเฉือนขาดของจุดเชื่อมประสานความเสียดทานจะค่อยๆขยายขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกลายเป็นรอยร้าวที่มีขนาดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการเสียรูปของจุดเชื่อมประสานที่ยึดติดกันซึ่ง Belyi และคณะได้เสนอแนวคิดไว้ว่า “การถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เป็นลักษณะจำเพาะที่สำคัญของการสึกหรอแบบยึดติดของวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบฐาน” [1], [29] ปรากฏการณ์การถ่ายเทความเสียดทานนั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากวัสดุเกือบทุกชนิด โดยผลที่ตามมาของปรากฏการณ์การถ่ายเนื้อวัสดุอาจมีความแตกต่างกันถ้าขนาดของอนุภาคการถ่ายเนื้อวัสดุจากพื้นผิววัสดุหนึ่งไปยังวัสดุอื่นๆมีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นก็จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [1], [30]–[32] ในกรณีของการสึกหรอภายใต้สภาวะการควบคุมคงที่การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะปรากฏเป็นชั้นฟิล์มบางๆของวัสดุที่อ่อนกว่าถ่ายเนื้อไปยังพื้นผิววัสดุที่แข็งกว่า ตัวอย่างเช่นการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะในขณะที่เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะนี้จะเกิดการหลุดออกของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากพื้นผิวโลหะควบคู่กันไป

ด้วย ถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์หลุดออกจากพื้นผิวโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสที่กล่าวถึงนี้อาจมีผลต่อการเกาะยึดของชั้นฟิล์มซึ่งการแพร่กระจายของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะจะส่งผลทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดแต่การสึกหรอเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

2.1.4.2 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบขัดถูเป็นรูปแบบการสึกหรอที่มีการตัดเฉือนเนื้อวัสดุเกิดขึ้นโดยเกิดจากวัสดุที่แข็งกว่าตัดเฉือนวัสดุที่อ่อนกว่า ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6b ซึ่งหลักฐานการสึกหรอแบบนี้จะปรากฏเป็นรอยขีดข่วน ร่องรอยการครูดหรือขูดออกของเนื้อวัสดุที่นำไปสู่การสูญเสียเนื้อวัสดุ กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบขัดถูนี้เกิดขึ้นจากจุดปลายความหยาบพื้นผิวที่แข็ง (Hard asperities) บนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและหรืออนุภาคแข็งเคลื่อนที่ตัดเฉือนพื้นผิวพอลิเมอร์โดยความหยาบพื้นผิวหรือความขรุขระของพื้นผิวเป็นปัจจัยที่กำหนดแรงเสียดทานซึ่งผลของการขัดถูจะแสดงออกมาในรูปของรอยขีดข่วน รอยแซะและร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการขัดถูส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างเป็นเศษที่ถูกตัดเฉือนออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ คล้ายๆ กับเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดในงานตัดเฉือนด้วยเครื่องมือกลแต่จะมีขนาดที่เล็กกว่า การสึกหรอแบบขัดถูมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างเรขาคณิตของจุดปลายความหยาบพื้นผิว (Asperity) ของวัสดุคู่สัมผัสที่แข็งกว่าและส่งผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับรูปร่างและมุมปลายของจุดหรือบริเวณที่เกิดการขัดถูบนพื้นผิวของวัสดุคู่สัมผัส [1], [28] ในขณะที่เกิดการขัดถูเมื่อจุดปลายความหยาบพื้นผิวหรืออนุภาคขัดถูกระทำกับพื้นผิวพอลิเมอร์มีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียรูปซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบที่สำคัญคือ แบบที่หนึ่งเกิดการเซาะเป็นร่องบนพื้นผิวพอลิเมอร์ซึ่งบ่อยครั้งจะมีการกล่าวอ้างถึงการไถครูดที่เกิดจากการผลักหรือดันอนุภาคและวัสดุไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นรอยไถครูดทางยาวและดันเนื้อวัสดุออกด้านข้างที่ส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นสันใกล้ๆกับรอยไถครูดและต่อมามีการพัฒนาเกิดเป็นร่องโดยไม่มีเนื้อวัสดุถูกเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิว แบบที่สองเรียกว่า “เกิดการตัดเฉือน” เนื่องจากมีลักษณะคล้ายๆกับการตัดเฉือนในระดับไมโครซึ่งเนื้อวัสดุถูกตัดเฉือนออกเป็นอนุภาคการสึกหรอขนาดเล็กที่ถูกขจัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ (Chip)

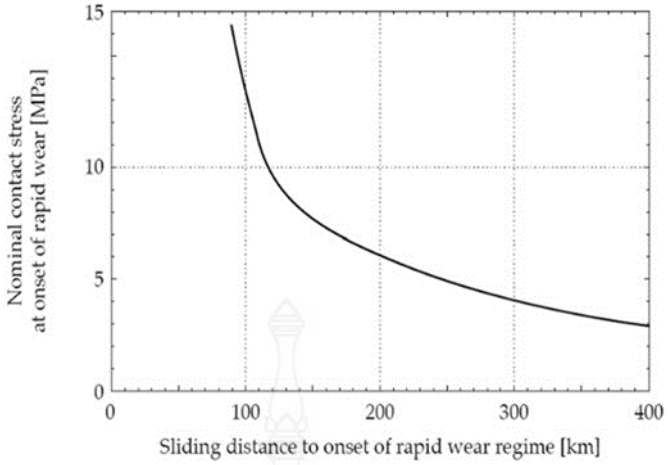
2.1.4.3 การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความเค้นวัฏจักรส่งผลให้เกิดความเครียด (Strain) ภายในเนื้อวัสดุบริเวณใต้ชั้นผิวและก่อให้เกิดเป็นรอยร้าวเล็กๆภายในเนื้อวัสดุขนานกับพื้นผิวดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6c และเมื่อไหร่ก็ตามที่รอยร้าวเหล่านี้มีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงขนาดวิกฤติจะทำให้เกิดการหลุดออกมาของแผ่นชิ้นส่วนย่อยหรือเกล็ดที่เป็นอนุภาคการสึกหรอ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มักถูกกล่าวถึงว่าเป็นการสึกหรอที่เกิดจากการแตกออกของชั้นพื้นผิว (Delamination wear) กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการแพร่ขยายของรอยร้าวบริเวณที่มีการแปรรูปซ้ำๆจากการเสียดทานโดยอนุภาคการสึกหรอ (Wear debris) เกิดจากการขยายตัวและการฉีกขาดของรอยร้าวขนาดเล็กบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการลื่นไถล โดยการสึกหรอแบบล้าตัวนี้เกิดขึ้นหลังจากพอลิเมอร์สัมผัสกับการเสียดทานเป็นเวลานานซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อพอลิเมอร์เนื่องจากความเค้นภายในที่เกิดขึ้นซ้ำๆและสะสมภายใน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นซ้ำและสะสมอยู่ภายในไม่สามารถขจัดออกให้หมดไปได้แต่จะมีปริมาณสะสมที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และเป็นตัวเร่งที่พัฒนา

ไปสู่การเกิดการแตกร้าวของพอลิเมอร์ การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายอาณาบริเวณเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณความเค้นสะสมที่เพิ่มขึ้นซึ่งขบวนการที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า “ความล้าเสียดทาน (Friction fatigue)” และมีความแตกต่างจากความล้าของวัสดุก้อนเนื่องจากความล้าเสียดทานเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นผิวและใต้พื้นผิวของวัสดุเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการแตกร้าวจากความล้านี้จะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณจุดเล็กๆบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นจุดสัมผัสความเค้นหรือเกิดการดึงแปรรูปสูงสุดจากทฤษฎีและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้อาณาบริเวณที่รับภาระจะเป็นตำแหน่งจุดสัมผัสความเค้นสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์จะทนต่อวัฏจักรความเค้นจากการลื่นไถลกลับไปกลับมาซ้ำๆ จำนวนหลายๆรอบและต่อมาส่งผลให้บริเวณผิวสัมผัสเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวโดยพฤติกรรมการสึกหรอ



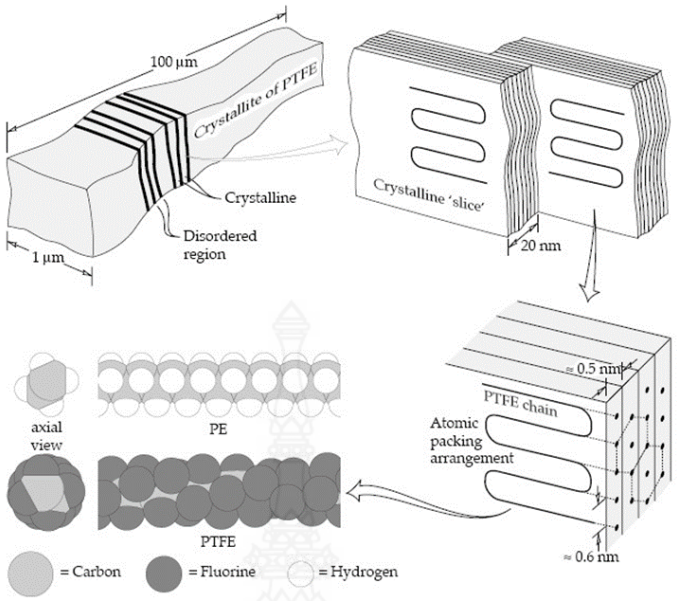
รูปที่ 2.7 อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวหลังจากผ่านการลื่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ [33]

แบบล้าตัวนี้สามารถสังเกตเห็นได้จากตัวอย่าง UHMWPE ที่มีการลื่นไถลต้านกับพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะที่มีความเรียบผิวสูง โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการลื่นไถลเสียดสีเป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร [1], [33] ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 ความเสียหายหรือการสึกหรอของพื้นผิวจากการสึกหรอแบบล้าตัวพบว่าเกิดขึ้นหลังจากพื้นผิวพอลิเมอร์ลื่นไถลเป็นระยะทางไกลๆ โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นพร้อมๆกับการขยายตัวของรอยร้าวและอนุภาคการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของการสึกหรอจะอยู่ในรูปของเศษอนุภาคการสึกหรอที่แตกออกเป็นเศษลอนชิ้นเล็กๆบนชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของขบวนการสึกหรอแบบยึดติด [1], [33]



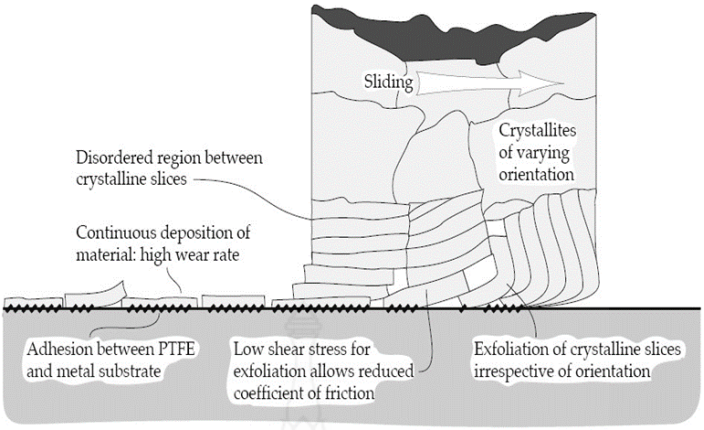
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น [33]

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอจากการสึกหรอแบบยึดติดเป็นการสึกหรอแบบล้าตัวนั้นถูกควบคุมด้วยความเค้นสัมผัส (Contact stress) ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีความเค้นสัมผัสต่ำกว่า 1 MPa การลื่นไถลเป็นระยะทางอนันต์จะทำให้การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเสมอและนอกจากนี้การสึกหรอแบบล้าตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับการรับภาระที่สูงลื่นไถลบนพื้นผิวที่เรียบและไถลด้วยระยะทางไกลๆ อีกด้วยซึ่งรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการทดสอบการล้าตัวของวัสดุ UHMWPE ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการสึกหรอแบบล้าตัวภายใต้ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นต่อระยะทางของการไถล การสึกหรอของวัสดุโดยทั่วไปจะมีความแตกต่างของปรากฏการณ์ของการสึกหรอที่เกิดขึ้น 3 ระยะ [1], [34] คือการสึกหรอระยะเริ่มต้น (Running-in) การสึกหรอระยะคงตัวหรือสม่ำเสมอคงที่ (Steady state) การสึกหรอระยะรุนแรง (Wear out) สำหรับในกรณีของการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสระหว่างโลหะ-พอลิเมอร์ ในระยะแรกจะหมายถึงการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะโดยสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะซึ่งประกอบด้วยสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของวัสดุ ความแข็งแรงของการเชื่อมประสานหรือเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวของโลหะบริเวณหรือส่วนของพื้นที่พื้นผิวโลหะที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ความรุนแรงของปฏิกิริยาเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะซึ่งสมบัติจำเพาะต่างๆ เหล่านี้ถูกยืนยันด้วยผลการทดลองและรายงานผลการศึกษาวิจัยที่นำเสนอโดยนักวิจัยหลายๆท่าน [1], [27], [35], [36] ดังที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าพอลิเมอร์เกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวแข็งของโลหะด้วยวิธีการดูดซับ [1], [37] ซึ่งสามารถสันนิฐานได้ว่าส่วนประกอบที่เกาะยึดติดแน่นอยู่ด้วยกันของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับการดูดซับในระดับไมโครโมเลกุล (Micro molecules) ที่จำกัดการเคลื่อนที่ของหมู่ฟังก์ชั่น (Functional group) โดยการจำกัดการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลจะมีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อพฤติกรรมทางด้านไทรโบโลยีของพอลิเมอร์



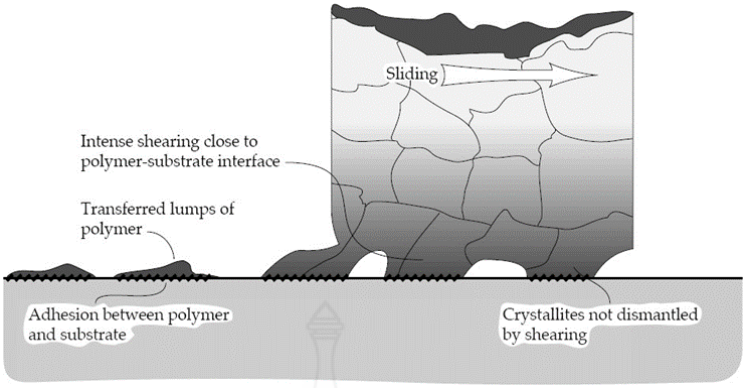
รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกของ PTFE และโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE [38]-[41]

สำหรับการอธิบายการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของการลื่นไถลแล้วส่งผลให้เกิดการสึกหรอของพอลิเมอร์ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเตตราฟลูออโรเอทีลีนหรือเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและโครงผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อบนพื้นผิวโลหะที่แสดงในรูปเป็นตัวอย่างชั้นฟิล์ม PTFE ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศที่มีการยึดเกาะแนบติดกับพื้นผิวโลหะอย่างแข็งแรง [1], [42] ปรากฏการณ์เกาะยึดแนบติดที่เกิดขึ้นนี้มีความเข้าใจว่าเป็นปฏิกิริยาทางเคมีของบริเวณจุดที่สัมผัสกันระหว่างฟลูออรีน (Fluorine) และคาร์บอนกับพื้นผิวโลหะที่ลื่นไถลต้านกัน [1], [42], [43] ถึงแม้ว่าอาจจะมีความเป็นไปได้ที่ว่าการเกาะยึดแนบติดที่แข็งแรงสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ แต่โครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเฉพาะของ PTFE ทำให้เกิดกลไกของการถ่ายเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ที่เป็นลักษณะเฉพาะสำหรับ PTFE จากการที่มีช่องว่างหรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกทำให้มั่นใจได้ว่าโมเลกุลของ PTFE สามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่อยู่ภายใต้ความเค้นสำหรับในส่วนของโครงผลึกของ PTFE จะประกอบด้วยชั้นของส่วนที่เป็นผลึกถูกขั้นกลางด้วยชั้นของเนื้อวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) ซึ่งอ่อนแอและเสียรูปได้ง่ายส่งผลให้ PTFE เกิดการแปรรูปได้ง่ายในชุดของชั้นแผ่นผลึกและอสัณฐานที่ต่อเนื่องกัน [1], [39] โดยบริเวณของ PTFE ที่ลื่นไถลสัมผัสกับพื้นผิวที่แข็งกว่าจะเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุในรูปของชั้นแผ่นเนื้อวัสดุที่ลื่นไถลออกมา ซึ่งส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำแต่มีอัตราการสึกหรอสูง [1], [40], [41] กลไกการสึกหรอของ PTFE มีลักษณะดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสึกหรอและชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE [25]

กลไกลการถ่ายชั้นฟิล์ม (Film transfer mechanism) พอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสมีพฤติกรรมคล้ายๆ กับการถ่ายชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ของ PTFE ซึ่งปัจจุบันยังไม่พบในพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ โดยปริมาณชั้นฟิล์มพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สะสมบนพื้นผิวโลหะที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นจะกระตุ้นให้เกิดขบวนการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) เมื่อมีการลื่นไถลต้านกับพื้นผิวของแข็ง [1], [44] แต่กลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนมีข้อยกเว้นสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) และ Ultra–High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) [1, 35] เนื่องพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะคล้ายกับ PTFE ทำให้เป็นที่เข้าใจว่ามีสาเหตุมาจากลักษณะจำเพาะของรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เรียบ (Smooth molecular profile) หรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ [1], [45] แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการลื่นไถลของ PTFE HDPE และ UHMWPE มีอิทธิพลมาจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (Static coefficient of friction) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic coefficient of friction) ประมาณ 50% [1], [46] เนื่องจากในช่วงแรกของการเริ่มต้นการลื่นไถลมีความจำเป็นต้องใช้แรงที่สูงกว่าเป็นพิเศษสำหรับการเริ่มก่อตัวเพื่อสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์และถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส สำหรับในส่วนของกลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) จะมีลักษณะของการเกิดพฤติกรรมการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นเป็นก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดจากการหลุดออกมาของแผ่นผลึกและเกิดการเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส



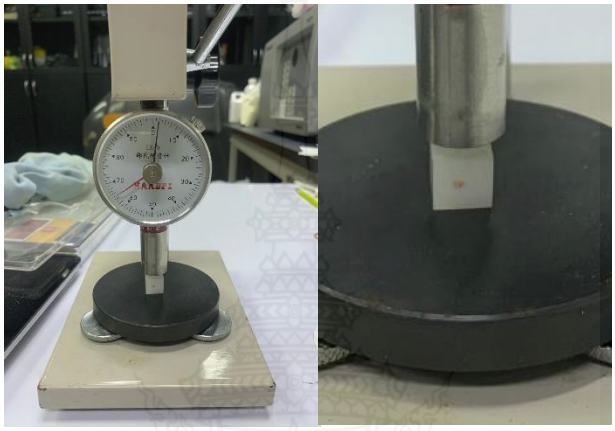
รูปที่ 2.11 กลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่ [24]

ขนาดของก้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากกลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ 1 μm [1], [46] เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่เกิดการสัมผัสมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระนาบของฟิล์มของ PTFE ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับภาระของก้อนพอลิเมอร์เป็นการรับภาระของฟิล์ม PTFE ที่มีขนาดเล็ก ลักษณะหรือรูปแบบของการถ่ายเนื้อชั้นฟิล์มพอลิเมอร์นี้ไม่ทำให้ลักษณะจำเพาะของการสึกหรอและความเสียดทานของการลื่นไถลสัมผัสดีขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่แสดงพฤติกรรมการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนจะไม่ใช่วัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่มีประสิทธิภาพมากนัก เมื่อไหร่ก็ตามที่วัสดุพอลิเมอร์ลื่นไถลต้านกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆพอลิเมอร์ที่มีการเกาะยึดแนบติดกันอย่างอ่อนแอหรืออ่อนแอกว่าจะเกิดการสึกหรอมากกว่า โดยเกิดการก่อตัวถ่ายเนื้อเป็นชั้นฟิล์มบนพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงของการเกาะยึดแนบติดเข้าด้วยกันมากกว่า ซึ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอที่สังเกตพบในวัสดุที่ไม่ใช่พอลิเมอร์ [1], [47]

2.1.4.4 การสึกหรอแบบไทรโบเคมี (Tribochemical wear)การสึกหรอแบบไทรโบเคมีเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การขยายตัวของชั้นฟิล์มถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวต่างๆ ที่มีการสัมผัสกันและสภาพแวดล้อมที่ล้อมรอบหนึ่งในรูปแบบส่วนใหญ่ของการสึกหรอแบบแบบไทรโบเคมีคอล คือการสึกหรอในลักษณะไทรโบออกซิเดชั่น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากการเสียดทานเป็นตัวเร่งให้เกิดการขยายปริมาณออกไซด์ฟิล์มโดยออกไซด์ฟิล์มแยกออกจากพื้นผิววัสดุเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจนถึงความหนาวิกฤติกลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.6d กลไกการสึกหรอแบบไทรโบเคมีเกิดจากการขาดหรือแยกตัวออกของสายโซ่พอลิเมอร์และหมู่เคมีที่อยู่บริเวณด้านข้างของสายโซ่หลักและต่อมาจะเกิดการก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่การก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะและกลายเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาไทรโบออกซิเดชั่น (Tribo oxidation) บนพื้นผิวโลหะแล้วถ่ายทอดไปยังพื้นผิวพอลิเมอร์โดยอยู่ในรูปของอนุภาคที่ถ่ายทอดในระดับไมโครและนอกจากนี้ปฏิกิริยาไทรโบเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวขัดขวางการเกาะยึดติดของอนุภาคที่เกิดการถ่ายทอดในระดับไมโครกับพื้นผิวสัมผัสของลูกกลิ้ง [1], [48]

2.1.5 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกล

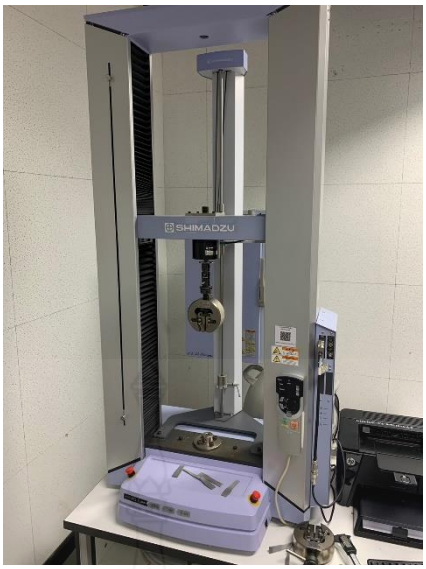
2.1.5.1 การทดสอบความแข็งการทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 แบบขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุกล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมธาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่าตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆรวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอทิลีน



รูปที่ 2.12 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้คณะผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12

2.1.5.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบโดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 1 kN ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X Plus ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบนความหนาไม่เกิน 7 mm โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบแรงดึง

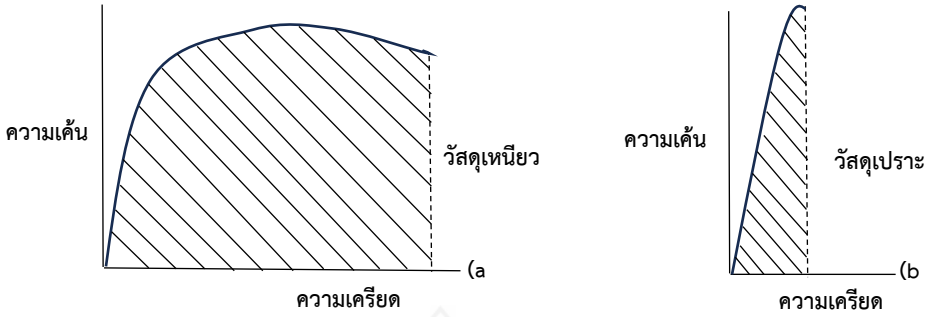


รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

2.1.5.3 การทดสอบแรงกระแทก

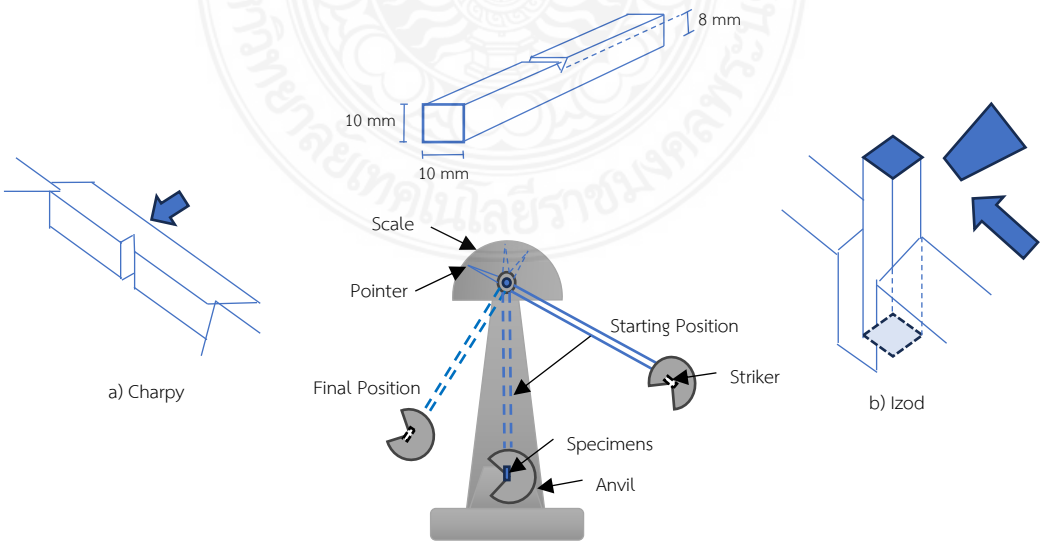
เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนียวที่ทนต่อการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบโดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงกระแทกยี่ห้อ GOTECH โมเดล GT-7045-HML ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [49]

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานบางประเภทวิศวกรจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุเพื่อประเมินโอกาสการแตกหักเสียหายและความปลอดภัยในขณะใช้งานในสภาวะต่างๆ เช่น การใช้งานเหล็กกล้าทนสึกของรถดัมพ์ที่ต้องรับแรงกระแทกจากการบรรทุกหิน เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนหรือเหล็กสำหรับงานท่อความดันที่ใช้ในอุณภูมิต่ำเป็นต



รูปที่ 2.15 (a) Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว และ (b)วัสดุเปราะ [49]

ความเหนียว (Toughness) คือ ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักความเหนียวมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงและความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ เนื่องจากโดยทั่วไปเรามักจะประเมินค่าความเหนียวจาก Modulus of Toughness ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้เส้นโค้งความเค้น - 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) ของวัสดุโดยการตีชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐานจนเกิดการแตกหัก 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 2.16

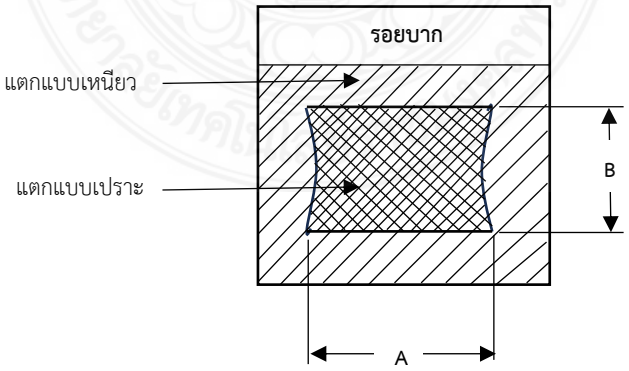


รูปที่ 2.16 การทดสอบแรงกระแทกแบบ a) Charpy และ b) Izod [49]

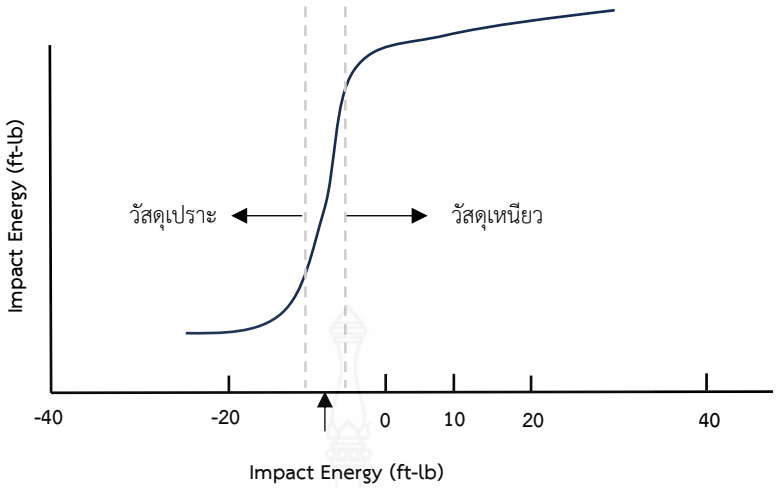
วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกันคือจะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกชิ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบชิ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy นั่นเอง มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูลส์

ข้อแตกต่างระหว่าง Charpy และ Izod ก็คือ การวางชิ้นงานทดสอบ โดย Charpy test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวระดับ และให้ลูกตุ้มตกกระแทกที่ด้านตรงข้ามกับรอยบาก ส่วน Izod Test จะวางชิ้นทดสอบไว้ในแนวตั้งและให้ลูกตุ้มกระแทกกับด้านที่มีรอยบากชิ้นทดสอบจะเป็นแท่งยาว มีพื้นที่ภาคตัดขวางเป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสและมีรอยบากอยู่ตรงกลางรอยบากนี้จะทำเป็นรูปตัว V, U หรือรูปรูกุญแจขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและมาตรฐานการทดสอบที่เลือกใช้อุณหภูมิมีผลต่อความเหนียวอย่างมาก วัสดุเหนียวอาจจะเปลี่ยนเป็นวัสดุเปราะได้เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ถ้านำค่า Impact Energy มาพลอตกับอุณหภูมิจะพบว่ามีอุณหภูมิอยู่ช่วงหนึ่งซึ่งมีค่าของ Impact Energy ลดลงอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.17 ค่าอุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า Impact Transition Temperature (ITT) โดยค่า ITT นี้เป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุจากวัสดุเหนียวมาเป็นวัสดุเปราะคือ เปลี่ยนจากวัสดุเหนียวที่มีค่าพลังงานสูงมาเป็นวัสดุเปราะซึ่งมีพลังงานต่ำ

ค่า Impact energy จะไม่นำมาใช้โดยตรงในการออกแบบแต่มันมีประโยชน์ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุโดยเฉพาะพวกเหล็กที่มีค่า ITT อยู่ใกล้กับอุณหภูมิห้องเราจะต้องระมัดระวัง ไม่ใช้งานวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า ITT ของมัน โดยทั่วไปเราจะกำหนดค่า ITT เป็นค่าเดียว (ไม่ใช่ช่วงอุณหภูมิดังที่แสดงในรูป 2.18) 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)



รูปที่ 2.17 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก [49]



รูปที่ 2.18 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact transition temperatureและอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ [49]

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) ดังนั้นวัสดุที่จะนำไปใช้งานจึงควรจะมีค่า Impact energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดหรืออาจใช้ค่า Ductility transition temperature ในการกำหนดสภาวะการใช้งาน คือควรจะใช้งานวัสดุในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า Ductility transition temperature

เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบจะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกันตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกันดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการเลือกใช้มาตรฐานต่างๆในการทดสอบ

2.1.5.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ [1]การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบวิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบดังลักษณะไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.19a โดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ 10x10x10 mm^3 ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.19b วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน 0.2 μm ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่น กำหนดความเร็วของการเสียดทาน 0.3 m/sec แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N และทำการทดสอบด้วยระยะเวลา 180 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้น

ทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg และนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดชิ้นทดสอบและระยะทางของการทดสอบ โดยสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.1-2.4

$$W = \frac{V_{loss}}{N.d} \tag{2.1}$$

โดย

W = อัตราการสึกหรอ ในหน่วย mm^3/Nm

V_{loss} = ปริมาตรที่สูญเสีย หน่วย mm^3

N = แรงกดชิ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการสึกหรอ หน่วย N

d = ระทางที่ทำการทดสอบ หน่วย m

ซึ่ง V_{loss} ได้จากสมการ

$$V_{loss} = V_O - V_f \tag{2.2}$$

โดย

V_O = ปริมาตรชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ

V_f = ปริมาตรชิ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากปริมาตร (V) ของชิ้นทดสอบได้จากสมการ

$$V = \frac{m}{\rho} \tag{2.3}$$

ดังนั้น สมการอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบคือ

$$W = \frac{m_o - m_f}{\rho.N.d} \tag{2.4}$$

โดย

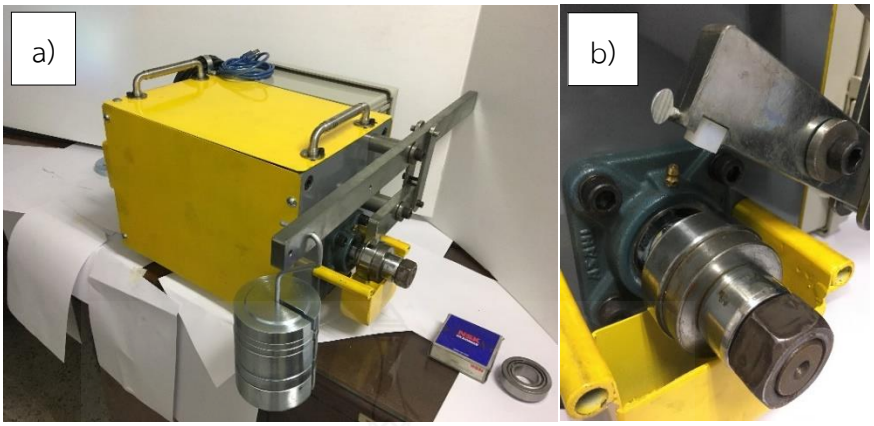
m_o = มวลของชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ หน่วย g

m_f = มวลของชิ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ หน่วย g

ρ = ค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ หน่วย g/cm^3

N = แรงกดชิ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการสึกหรอ หน่วย N

d = ระทางที่ทำการทดสอบ หน่วย mm



รูปที่ 2.19 a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ

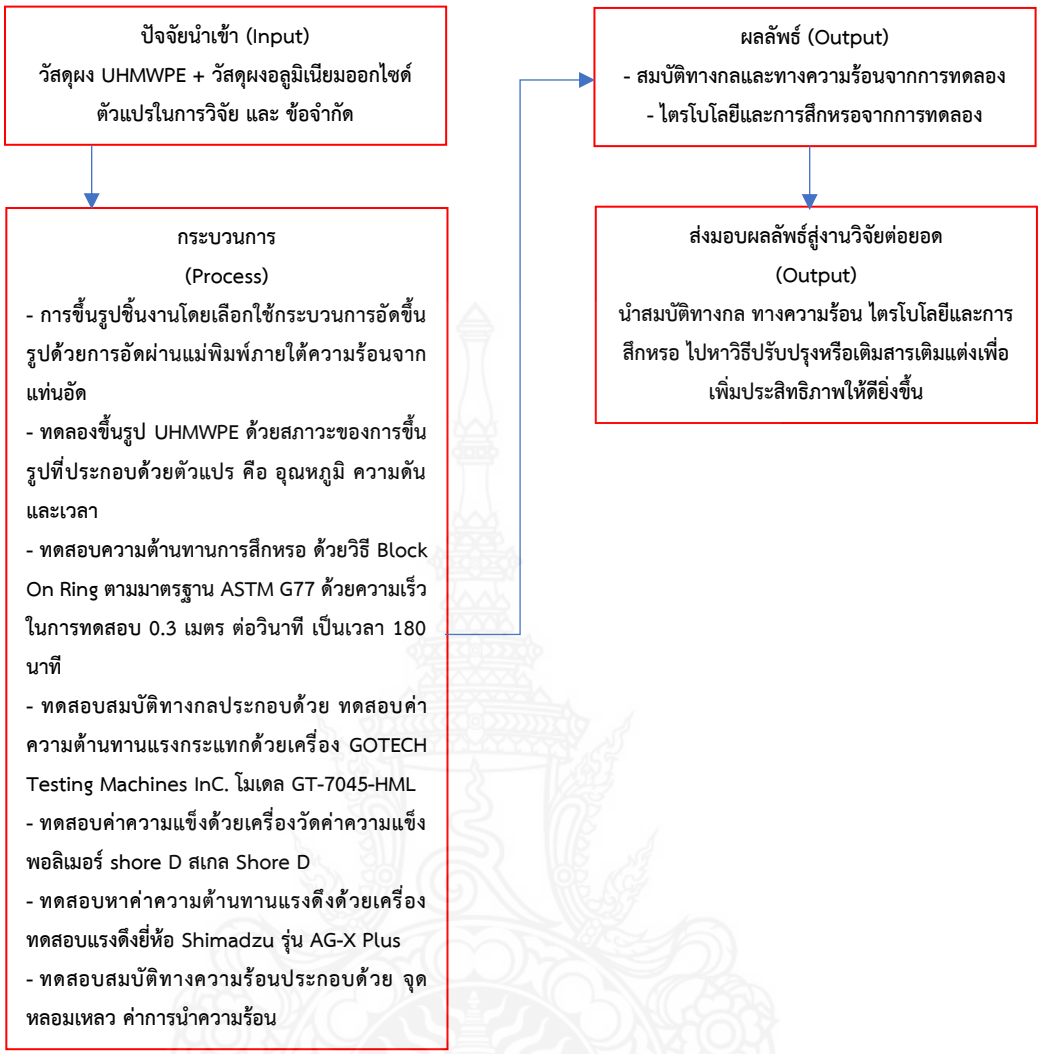


a) b)

รูปที่ 2.20 เครื่องชั่งน้ำหนัก a) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224 สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ และ b) เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.1 g ยี่ห้อ AND รุ่น EK-1200i

2.2 กรอบการวิจัย

สำหรับกรอบการวิจัย (Conceptual Framework) จะเป็นการวางแนวความคิดของกระบวนการการทำวิจัยที่จะต้องกล่าวถึงตัวแปรต้นและตัวแปรตามต่างๆ ที่ใช้ในแต่ละกรอบ ซึ่งจะต้องมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันที่จะต้องสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานของทฤษฎีต่างๆ มุ่งเน้นไปที่การทดสอบสมบัติทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ โดยกระบวนการเริ่มต้นจากการทำการเตรียมผง UHMWPE ที่ผสมผง Al_2O_3 ตามขั้นตอนเสร็จแล้วนำมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปหลังจากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงานทดสอบตามลักษณะมาตรฐานการทดสอบความแข็ง, การทดสอบความต้านแรงดึง, การทดสอบแรงกระแทก, การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ จากนั้นนำไปทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลซึ่งจะมีแนวคิดดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กรอบการวิจัย

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

O. Hussain et al. [62] ได้มีการนำเสนอวัสดุผสมแบบไฮบริด UHMWPE/nano-Al_2O_3/Vitamin-C ที่เหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นกระดูกอ่อนเทียมในข้อต่อเทียม โดย Al_2O_3 จะถูกนำมาใช้เป็น สารเติมแต่งเพื่อต้านทานการสึกหรอใน UHMWPE ผลการวิจัยพบว่าเมื่อนำ Al_2O_3 ปริมาณ 2 wt% มาผสม จะมีประสิทธิภาพต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุผสมอื่นๆ โดยสารเติมแต่งชนิด Al_2O_3 นี้จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิด UHMWPE

F.S. Senatov และคณะ [63] ได้มีการศึกษาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างอนุภาค และความเข้ากันได้ของสารประกอบนาโนที่เกิดจากการผสมเชิงกลโดยใช้ผง UHMWPE และสารเติมแต่งหลายชนิด โดยนำมาใส่ในเครื่องบดและผสมสาร แบบตั้งโต๊ะชนิด Planetary Ball Milling ผลการศึกษาพบว่า รูปร่างอนุภาคและความเข้มข้นของ Al_2O_3 ต่อคุณสมบัติของคอมโพสิต แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมทริกซ์โพลีเอทิลีนด้วยอลูมินาที่กระตุ้น

ด้วยกลไกในรูปของผงนาโนหรือไมโครสเฟียร์ โดยการเสริมโพลีเมอร์ด้วยอนุภาคนาโนนั้นจะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอได้เป็นอย่างมาก และไม่พบสัญญาณของการสะสมไฟบรินในซีรั่มในเลือดบนพื้นผิวของตัวอย่าง นอกจากนี้แล้วยังไม่พบสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิวิทยาทางสรีรวิทยาในสัตว์ที่ฝังตัวอย่างไว้ ที่ได้มีการกระตุ้นเชิงกลการกดร้อนและเติมอนุภาคเซรามิก โดยสามารถใช้เป็นวัสดุที่สามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพเพื่อนำมาทดแทนกระดูกอ่อน

J.JO. Connor และคณะ [64] ได้ทำการศึกษาความสมบูรณ์ของการอัดขึ้นรูปของผง UHMWPE บริสุทธิ์เกรด 1900 H ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 145-200 องศาเซลเซียส เวลาคงอุณหภูมิที่ 10-90 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่ออัตราการยืดตัวและปริมาณความเป็นผลึกของวัสดุพอลิเมอร์

Min ZhiRonga และคณะ [65] ได้ทำการศึกษาอีพ๊อกซี่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่อนุภาคขนาด 3.8 นาโนเมตร จากการวิจัยพบว่าปริมาณการผสม Al2O3 ที่ปริมาณ 1.6 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุดโดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ 8 x 10-6 mm3/Nm ทดสอบโดยการวิเคราะห์จุดหลอมเหลว ค่าความร้อนจำเพาะ การเปลี่ยนสถานะ และสภาวะการเป็นผลึก ทำการทดสอบโดยใช้แรงที่ใช้ในการทดสอบ 1 MPa ความเร็วเสียดทานเท่ากับ 1 m/s โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุคู่ผสมที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการสึกหรอ

Weston J. Wood และคณะ [59] มีความต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของโพลีเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นพิเศษ (UHMWPE) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานด้านชีวการแพทย์ซึ่งผู้รับการเปลี่ยนข้อต่อมักจะประสบปัญหาจากการเสื่อมสภาพก่อนกำหนดของความสมบูรณ์ของข้อต่อ ซึ่งเทคโนโลยีคอมโพสิตโดยทั่วไปเป็นตัวเลือกที่ทำงานได้สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติเหล่านี้แต่อย่างไรก็ตาม UHMWPE ก็มีความหนืดสูงมากและการประมวลผลของวัสดุผสมจำนวนมากนั้นจำกัดอยู่ที่การผสมแบบแห้งก่อนการอัดขึ้นรูปทำให้การกระจายตัวของฟิลเลอร์แย่มากและคาดเดาไม่ได้ ในการศึกษานี้ Carbon nanofiber (CNF)–UHMWPE คอมโพสิตถูกจัดทำขึ้นโดยการผสมละลายช่วยด้วยน้ำมันพาราฟิน พาราฟินช่วยการผสมแบบละลายนั้นส่งผลให้การกระจายของฟิลเลอร์ดีขึ้นอย่างมากเมื่อทำการโหลดต่ำ เมื่อทำการผสมเทียบกับวิธีการประมวลผลทั่วไปของ UHMWPE อย่างไรก็ตามการกระจายตัวที่โหลดสูงเริ่มแรกไม่เป็นที่น่าพอใจต่อจากนั้นความเข้มข้นของน้ำมันพาราฟินก็ถูกปรับให้เหมาะสมและให้ผลเป็นคอมโพสิต UHMWPE สุดท้ายได้รับการปรับปรุงการทดสอบการสึกหรอที่การโหลดต่ำ 1 wt.% ส่งผลให้ปริมาณพาราฟินที่เหมาะสมและคุณสมบัติการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นที่ 35 vol.% UHWMPE ไปจนถึงพาราฟินซึ่งเป็นขั้นสุดท้ายคอมโพสิตให้ผลผลิตสูงกว่าที่พบในวรรณกรรมโดยใช้เทคนิคการประมวลผลที่คล้ายกัน

งามพรรณ ชะโล [66] ได้ทดสอบสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นส่วนผสมหลักผสมกับอลูมิเนียมออกไซด์ในการผลิตล้อรันแฟลท และให้ทราบถึงสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมภายใต้กระบวนการขึ้นรูปล้อรันแฟลท วัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและมีสารเติมแต่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al2O3) ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ก้อนวัสดุสำหรับการทดลองประกอบด้วย แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิ เวลา รวมถึงสัดส่วนระหว่างโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับอลูมิเนียมออกไซด์ การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 การ

ทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 type I การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลที่ได้คือสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส 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 และมีอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยส่วนผสม UHMWPE ผสมกับ Al2O3 เกรด HTM-30 ที่ 5% มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าอัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.12, 8.66E-11 mm3/N.m, และ 1.2446958 g/cm3

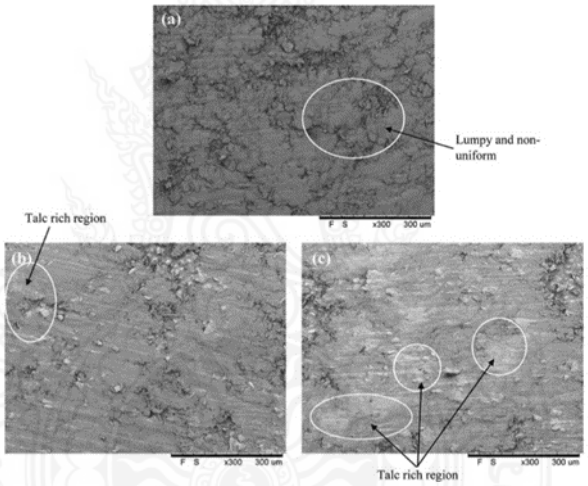
วิโรจน์ ฉัตรเกษ [53] ได้ทำการทดลองทดสอบการหาสภาวะอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาคงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปร้อนผงพอลิเมอร์ UHMWPE และศึกษาอิทธิพลตัวแปรการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ UHMWPE วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือผงพอลิเมอร์ UHMWPE บริสุทธิ์ผงวัสดุถูกนำมาทำการอัดขึ้นรูปร้อนให้เป็นแผ่นขนาดกว้าง 160 mm ยาว 80 mm และหนา 10 mm ตัวแปรการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170-210 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30-90 นาที และนำวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูปมาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางเคมี จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศจากการทดสอบพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดขึ้นรูปร้อนวัสดุ UHMWPE คือต้องใช้อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที วัสดุที่จากการขึ้นรูปจะมีอัตราการยืดตัวสูงและอัตราการสึกหรอต่ำ

V.S. Aher. et al. [2] ศึกษา เพื่อตรวจสอบผลกระทบของพื้นผิวสัมผัสกับประสิทธิภาพทางไตรโบโลยี ของวัสดุ UHMWPE และ คอมโพสิต จากการทดสอบทางไตรโบโลยีที่สภาวะแห้งและสภาวะต่าง ๆ ที่แตกต่างกันโดยโหลดที่เลือกนั้นจะเป็น 181.42 N, 171.61 N, และ 156.9 N ที่ความเร็วการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่แตกต่างกัน 0.12 m/s, 0.105 m/s และ 0.09m/s. ในการทำงานนี้ใช้ ดิสก์สแตนเลส 304 และแผ่นดิสก์ที่มีรูปแบบ พื้นผิวสามเหลี่ยม ถูกนำมาใช้สำหรับการทดสอบความแตกต่างของพื้นผิวสัมผัสนั้นอยู่ที่ 0%, 10%, 20% โดยทดสอบด้วยเครื่องทดสอบไตรโบโลยีแบบของ pin-on-disc (TRLE-PHM400). การทดสอบพบว่ามีการสึกหรอ ที่อัตราต่ำสุดของวัสดุ UHMWPE ที่ +2% ที่ความหนาแน่นของรอยบุ๋มอยู่ที่ 10% ด้วยทิศทางพื้นผิวของ bases ที่มีการออกแบบพื้นผิวรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า พบว่าพื้นผิวการสึกหรอของ UHMWPE ที่ผสมคาร์บอนนั้น จะเกิดร่องที่มีลักษณะแบน

D. Xiong et al. [7] ได้ศึกษาพฤติกรรมการเสียดทานและการสึกหรอของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (UHMWPE) ที่เสียดสีกับ Al2O3 ภายใต้การเสียดสีแบบเลื่อนในสภาวะแห้งและสภาวะการหล่อลื่นของพลาสมา น้ำกลั่น และน้ำเกลือ ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องมือไตรโบโลยีแบบ Pin on Disk ที่ผลิตขึ้นเองที่อุณหภูมิคงที่ 37 ± 1°C โดยมีการตรวจสอบพื้นผิวที่มีการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการศึกษาพบว่า การเสียดทานของ UHMWPE มีความไวต่อสถานะการดูดซึมน้ำมาก อัตราการสึกหรอของ UHMWPE ภายใต้การเสียดทานแบบเลื่อนใน

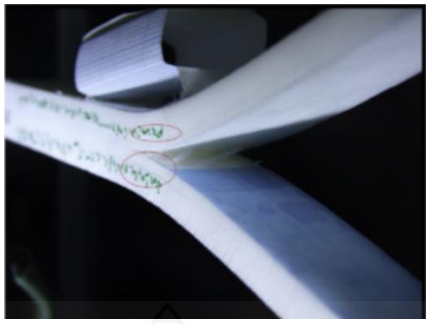
สภาวะแห้งจะสูงที่สุด เมื่อถูกหล่อลื่นด้วยพลาสมานั้น การสึกหรอจะแตกต่างกันไปภายใต้แรงเสียดทาน สภาวะแบบแห้งและสภาวะที่มีการหล่อลื่นต่างๆ

การศึกษาเกี่ยวกับโลหะและเซรามิก [54] ซึ่งเป็นวัสดุอ่อนและวัสดุแข็งเพื่อที่จะหาด้านที่ดีกว่าสำหรับพื้นผิว ซึ่งการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างเหล็ก และ UHMWPE ดำเนินการเพื่อประเมินผลของรูปแบบร่องรอยการสึกหรอที่เงื่อนไขความเร็วโหลดที่แตกต่างกัน ซึ่งที่น้ำหนักเบาเพียง 100 N พื้นผิวของเหล็กหรือ UHMWPE สามารถลดแรงเสียดทานได้ความหนาแน่นของพื้นที่ที่เหมาะสมแตกต่างกันอย่างไรก็ตามที่น้ำหนัก 700 N เฉพาะลวดลายพื้นผิวUHMWPE สามารถลดแรงเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความหนาแน่นของพื้นที่ตั้งแต่ 16% ถึง30% สามารถลดความลึกการสึกหรอเฉลี่ยได้อย่างมีประสิทธิภาพอัตราการลดสูงสุดของความลึกการสึกหรอเฉลี่ยคือ 36% ของ Tribo-pair ซึ่งได้มาจากรูปแบบที่มีความหนาแน่นของพื้นที่ 30% ในขณะเดียวกันก็มีลวดลายพื้นผิวบนพื้นผิวของเหล็กสามารถลดการสึกหรอเฉลี่ยความลึกเฉพาะเมื่อความหนาแน่นของพื้นที่ 40% สูงสุดอัตราการลดลงของความลึกการสึกหรอเฉลี่ยคือ 20% ผลการทดสอบจะถูกวิเคราะห์เพิ่มเติมในแง่ของความเครียดต่อไป

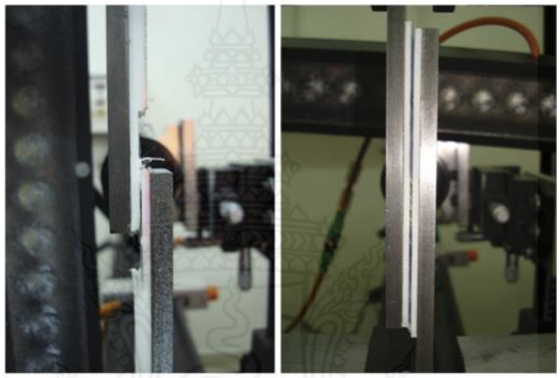


รูปที่ 2.23 ไมโครกราฟ SEM ของฟิล์มถ่ายโอนที่เกิดขึ้นที่โหลด 30 N และความเร็วการเลื่อนที่ 0.2094 m/s (a) UHMWPE, (b) 10 wt% talc / UHMWPE, (c) 20 wt% talc/UHMWPE [55]

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบลักษณะการสึกหรอของโพลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (UHMWPE) [55] เสริมด้วยอนุภาคแป้ง เพื่อวิเคราะห์อัตราการสึกหรอและสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของแรงเสียดทาน (COF) ของพื้นผิว UHMWPE โดยวิธีการตอบสนอง (RSM) เดิมคือใช้เพื่อคาดการณ์การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวแปรควบคุมเพื่อลดการสึกหรอของ UHMWPE มันถูกค้นพบว่าอัตราการสึกหรอและ COF เฉลี่ยของ UHMWPE สามารถลดลงได้โดยรวมเมื่อผสมแป้ง การวิเคราะห์ SEM ของพื้นผิวที่สึกหรอและฟิล์มถ่ายโอนระบุว่าระดับของการสึกหรอบนพื้นผิวของ UHMWPE ลดลงเฉลี่ยในช่วงทดสอบสำหรับ UHMWPE ผสมแป้งจะได้โหลดอนุภาค 20 wt% โหลด 12.020 N และเลื่อนความเร็ว 0.3786 m/s จากผลการทดลองดังกล่าวสามารถใช้อนุภาคแป้งทาตัวเป็นการเสริมแรงในการใช้งานคอมโพสิต UHMWPE เพื่อลดการสึกหรอและแรงเสียดทานอย่างรุนแรงได้



รูปที่ 2.24 การแยกตัวระหว่างการทดสอบความเป็นไปได้ของชิ้นงานดัดแปลง DCB ที่มีความกว้าง 20 mm ของโหลดในอัตราการเคลื่อนที่ 0.5 mm/min [56]



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างหลังจากการทดสอบ interlaminar shear ของ (a) SLJ และ (b) DENS [56]

Ido Meshi และคณะ [56] ได้ทำการทดลองสองแบบเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการของ UHMWPE คอมโพสิตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านขีปนาวุธเนื่องจากมีความต้านทานแรงดึงสูง และความหนาแน่นต่ำ โดยมีการทดสอบแบบคานคู่ (DCB) และการทดสอบแบบ interlaminar shear (ILS) ซึ่งในการทดลองนั้นจะต้องคำนึงถึงรูปทรงเรขาคณิตและเลเยอร์ซ้อนที่เป็นสิ่งสำคัญจากมาตรฐาน ASTM เพื่อดูขนาดของรอยร้าวที่เหมาะสมและพื้นผิวที่ร้าวแสดงให้เห็นถึงความต้านทานการแตกสูงกว่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เพื่อศึกษากลไกการขยายของผิว UHMWPE ผลการทดสอบเชิงพาณิชย์ HB26 (DH) การมองเห็นวัตถุและพฤติกรรมการแตกร้าว ซึ่งการทดสอบ ILS ที่เสนอนั้นเป็นวิธีที่ไม่ซ้ำใครในการกำหนดให้ใกล้เคียงความเค้นเฉือนระหว่างโมเลกุลที่สม่ำเสมอและเด่นชัดหลังจากทำการทดลอง พบว่าการทดลองทั้งสองแบบมีความแตกต่างเล็กน้อยในด้านค่าความแข็งแกร่งและความต้านทานแรงดึงและการแตกหักสูง

วิชาญชัย ปลีนารัมย์ และคณะ [57] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ได้มีการผสมผงอลูมิเนียม ที่ 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% พบว่าสมบัติทางกลประกอบด้วย ค่า Yield strength, ค่า Ultimate tensile strength, ค่า Elongation at Break และค่า Modulus of elasticity โดยที่อัตราส่วนที่มีการผสมผงอลูมิเนียมที่ 2.5 wt% นั้นจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.25 MPa, 24.15 MPa, 249.64% และ 702.12 MPa โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมเป็น 5, 7.5, และ 10 wt% นั้นจะมีค่าต่างๆ ที่มากเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่อัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมสูงสุดที่ 10 wt% โดยมีค่าเท่ากับ 27.55 MPa, 32.76 MPa, 287.80% และ

840.60 MPa ตามลำดับ โดยที่ค่าความต้านทานแรงกระแทกที่อัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียม 2.5 wt% จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 63.54 wt% ซึ่งอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมสูงสุดที่ 10 wt% จะเห็นได้ว่าสมบัติทางกลนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าต้านทานแรงกระแทกจะมีค่าที่ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านวิศวกรรมได้เป็นบางกรณี และขั้นตอนที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงคือกระบวนการผสมสารทั้งสองเข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถสอดแทรกและการกระจายตัวของอนุภาคสารทั้งสองสารนั้นเข้ากันได้ดี รวมไปถึงกระบวนการในการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนที่จะส่งผลให้สมบัติทางกลจากการทดสอบในแต่ละสมบัตินั้นมีค่าที่คลาดเคลื่อนได้

ชาญชัย ปลีนารัมย์ และคณะ [58] ได้ทำการศึกษาการทดสอบพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่มีการผสมผงอลูมิเนียม เพื่อหาไตรโบโลยี โดยประกอบไปด้วย ค่าอัตราการสึกหรอ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และค่าความหนาแน่น โดยที่อัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมที่ 2.5 wt% นั้นพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.72E-08 $mm^3/N.m$, 0.12 และ 1.085872 g/cm^3 ตามลำดับ โดยมีค่าสูงขึ้นไม่มากนัก เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมเป็น 5, 7.5 และ 10 wt% ซึ่งอัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมสูงสุดที่ 10 wt% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6.89E-10 $mm^3/N.m$, 0.15 และ 1.865656 g/cm^3 ซึ่งประสิทธิภาพทางไตรโบโลยีจะมีค่าเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากค่าอัตราการสึกหรอ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากปริมาณอัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียม

บทที่ 3
การดำเนินการวิจัย

รายละเอียดในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินการวิจัยที่ประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ หลักการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ทางกลและไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักและมีสารเติมแต่งเป็น อลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดขึ้นรูปผง UHMWPE การทดสอบสมบัติทางความร้อน ทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักและศึกษาเกี่ยวกับผง Al_2O_3 จากวารสารวิชาการและวิจัย หนังสือ อินเทอร์เน็ต และสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรต่างๆ

3.1.1.2 การกำหนดตัวแปร ระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงาน

3.1.1.3 จัดหาซื้อวัสดุผงโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE และสารเพิ่มสมบัติทางกล คือ ผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เพื่อสร้างวัสดุเชิงประกอบแบบใหม่ ด้วยอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

3.1.1.4 วิเคราะห์อนุภาคผงโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงและผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยเครื่อง SEM และ XRD เช่น องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ ขนาดอนุภาคของผงสารตั้งต้น และสารเติมแต่ง

3.1.1.5 สร้างแม่พิมพ์สี่เหลี่ยมสำหรับการขึ้นรูปผงให้เป็นแผ่นชิ้นงานคอมโพสิต

3.1.1.6 ทำการผสมผง UHMWPE และผง Al_2O_3 ตามอัตราส่วนที่กำหนด

3.1.1.7 ทำการอัดขึ้นรูปผงที่ทำการผสมไว้แต่ละอัตราส่วนที่กำหนดด้วยเครื่องอัด Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 160x80x50 mm

3.1.1.8 ทำการตัดชิ้นงานทดสอบตามลักษณะการทดสอบ

3.1.1.9 ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อน ทางกลและทดสอบความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE ผสมผง Al_2O_3

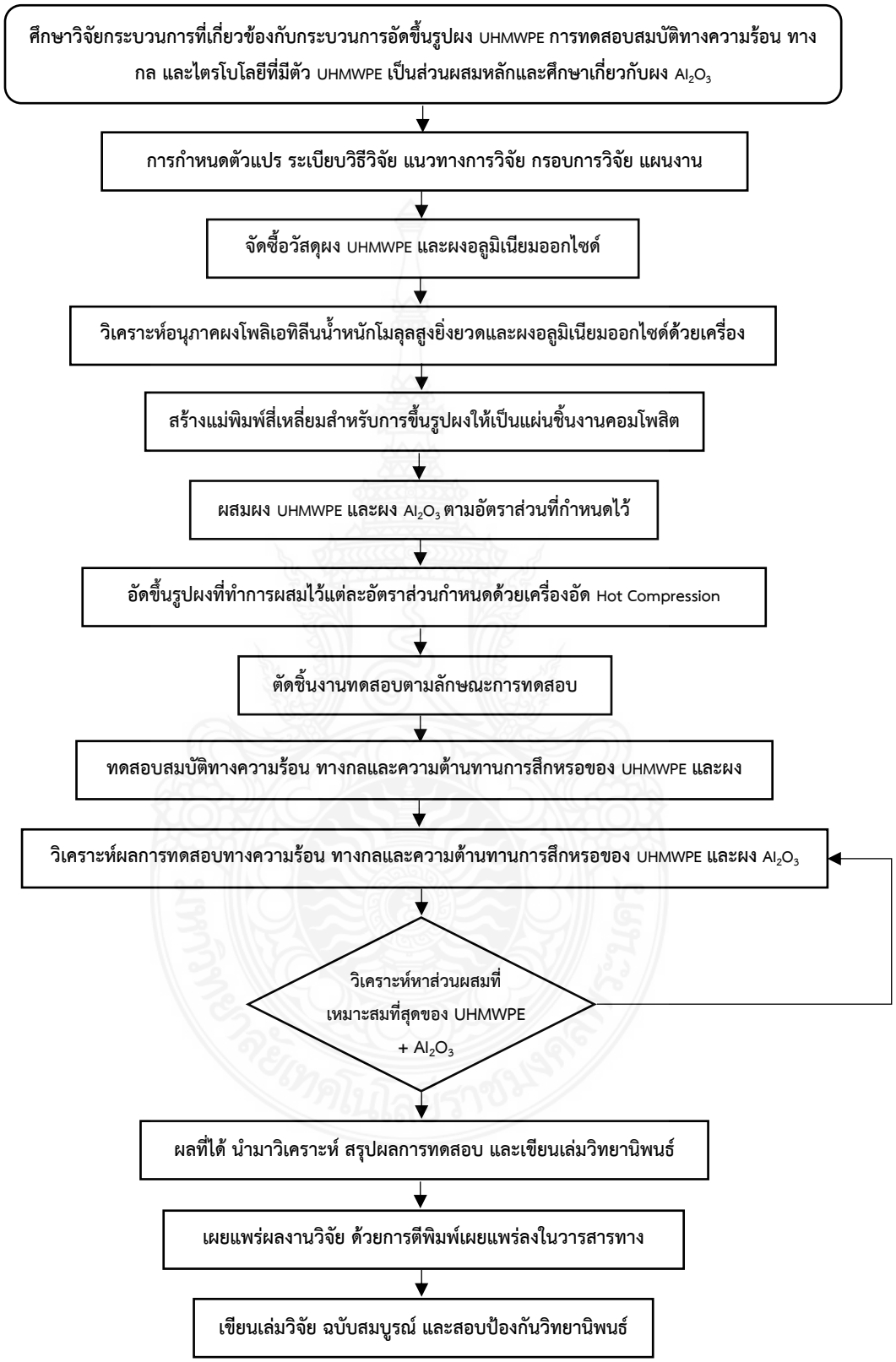
3.1.1.10 วิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE ผสมผง Al_2O_3

3.1.1.11 วิเคราะห์หาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของ UHMWPE composite

3.1.1.12 นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ สรุปผลการทดสอบ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

3.1.1.13 เผยแพร่ผลงานวิจัยด้วยการตีพิมพ์เผยแพร่ลงในวารสารทางวิชาการ

3.1.1.14 สอบป้องกันวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

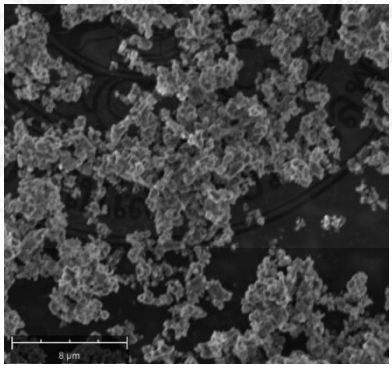
3.1.2.1 วัสดุผง UHMWPE U511 เป็นโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นพิเศษ พร้อมตัวกันการกัดกร่อน (CS) ในรูปแบบผงโดยมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 5.5 ล้านกรัมต่อโมล มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 125 µm น้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากให้คุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์หลายประการ รวมถึงความต้านทานต่อการเสียดสีสูง ความต้านทานแรงกระแทก 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 x 106
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

ที่มา: http://www.irpcmarket.com/upload/document/msds-1527672190.pdf

3.1.2.2 Al_2O_3 หมายเลข SA32 ของบริษัท Nippon Light Metal Company มีขนาดอนุภาค 5 µm มีคุณสมบัติประกอบด้วย 1) Specific gravity 3.96, 2) Melting point 2045 °C, 3) Sintering Temp. 1750 °C



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายขยายลักษณะสัณฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์เบอร์ SA32

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัยมีดังนี้

3.1.3.1 เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu รุ่น ATX224R ชั่งวัสดุแบบชั่งจากด้านบน ชนิดอ่านละเอียด แสดงผลเป็นตัวเลข ความละเอียดในการอ่านได้ 0.0001 กรัม ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 220 กรัม จานขนาดกว้างxยาว 180×180 มิลลิเมตร ได้รับมาตรฐาน: ISO 9001

3.1.3.2 เครื่องผสมสารแบบตัววี ตัวเครื่องทำจากแสตนเลส ใช้สำหรับการผสมพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเข้ากับผงอลูมิเนียมด้วยการผสมแบบแห้ง

3.1.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดตั้งโต๊ะพร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุ (FESEM with EDS) ยี่ห้อThermo Scientific ประสิทธิภาพสูง มีกำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า

3.1.3.4 เครื่องขัดเตรียมผิวชิ้นงานจานคู่ Metaserv 250 สามารถปรับความเร็วรอบที่ปรับได้ ตั้งแต่ 50–500 รอบต่อนาที

3.1.3.5 อุปกรณ์ในการเตรียมผงเพื่อผสมผง UHMWPE และผงอลูมิเนียมเข้าด้วยกัน

3.1.3.6 ตู้อบความร้อน ปรับอุณหภูมิได้ถึง 300 องศาเซลเซียส ตั้งเวลาการทำงานได้ เตาอบลมร้อน (ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L)

3.1.3.7 เครื่องอัดเบ้าพอลิเมอร์ อัดเบ้าขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยไฮดรอลิค ควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า แรงดันการอัดสูงสุด 55 ตัน สามารถทำความร้อนสูงสุดได้ 400 องศาเซลเซียส แท่นอัดเบ้า มีขนาดกว้าง 300 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร

3.1.3.8 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาดความกว้าง 80 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร สามารถอัดชิ้นงานให้มีความหนาในช่วง 5-30 มิลลิเมตร

3.1.3.9 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านแรงดึง เครื่องทดสอบแรงกระแทก และเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore D

3.1.3.10 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีการ Block on ring

3.2 การดำเนินการเตรียมผงวัสดุ UHMWPE ผสมกับอนุภาค Al_2O_3

ในการทดลองมีการกำหนดอัตราส่วนผสมของผงอนุภาค Al_2O_3 ต่อผง UHMWPE เท่ากับ 5, 8 และ 10 wt% โดยทำการผสมด้วยน้ำหนักรวม 100 g ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดน้ำหนักรวม 100 กรัม ของผงอนุภาค Al_2O_3 ต่อผง UHMWPE

ชิ้นทดสอบ	อัตราส่วนผสม (wt%)		ปริมาณการผสมรวม (กรัม)		น้ำหนักรวม (กรัม)
	ผง Al_2O_3	ผง UHMWPE	ผง Al_2O_3	ผง UHMWPE	
1	2.5 %	97.50 %	2.5	97.50	100
2	5 %	95.00 %	5	95.00	100
3	7.5 %	92.50 %	7.5	92.50	100
4	10 %	90.00 %	10	90.00	100

ขั้นตอนการเตรียมผง UHMWPE สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักผง UHMWPE ด้วยปริมาณต่างๆ ตามอัตราส่วนการผสมที่กำหนดในตารางด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg ดังแสดงในรูปที่ 3.2

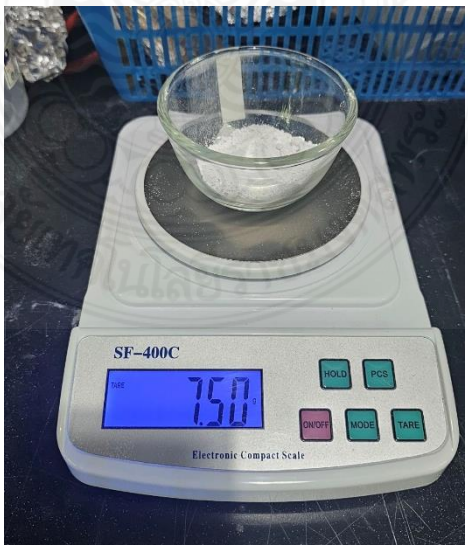


รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ในการเตรียมผงและการชั่งน้ำหนักผง UHMWPE ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg

2. ชั่งน้ำหนักผงอนุภาค Al_2O_3 ด้วยปริมาณตามอัตราการผสมที่กำหนด ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg ดังรูปที่ 3.3

3. ละลายผงอนุภาค Al_2O_3 ในเมทิลแอลกอฮอล์ด้วยอัตราส่วนผงอนุภาค Al_2O_3 ประมาณ 20 g ต่อเมทิลแอลกอฮอล์ 50 ml ทำให้เกิดการกระจายสลายตัวและละลายในเมทิลแอลกอฮอล์ได้ดียิ่งขึ้นด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.4

4. เทผงอนุภาค Al_2O_3 ที่ละลายในเมทิลแอลกอฮอล์ผสมกับผง UHMWPE ตามอัตราส่วนที่กำหนด เติมเมทิลแอลกอฮอล์ 500 ml แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง High speed homogenizer ด้วยความเร็วรอบ 32,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การชั่งตวงน้ำหนักผงอนุภาค Al_2O_3



รูปที่ 3.5 การละลายผงอนุภาค Al_2O_3 ในเมทิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser



รูปที่ 3.6 การผสมผงอนุภาค Al_2O_3 + UHMWPE แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง High speed homogenizer



รูปที่ 3.7 เทผง UHMWPE ที่ปั่นผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ใส่ในถาดและนำไปเข้าตู้อบลมร้อน

5. เทผง UHMWPE ที่ปั่นผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ใส่ในถาดที่เตรียมไว้แล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ใช้เวลาประมาณ 3 ช.ม ดังแสดงในรูปที่ 3.6

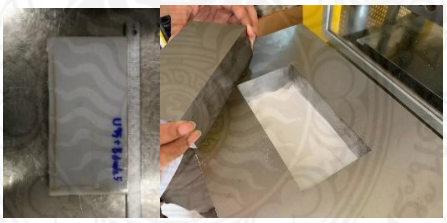
6. หลังจากที่ทำการอบแห้งแล้วจะได้สารประกอบผง UHMWPE ที่มีส่วนผสมของ Al_2O_3 ผสมอยู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 ผง UHMWPE ที่มีส่วนผสมของ Al_2O_3 ผสมอยู่ภายในหลังจากที่ทำการอบแห้งแล้ว

3.3 การอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสมอนุภาค Al_2O_3

UHMWPE ผสม Al_2O_3 หลังจากผ่านการอบแห้งแล้วจะนำไปทำการอัดขึ้นรูปทันทีเพื่อป้องกันไม่เกิดการรวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศที่ทำให้ผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 เกิดความชื้น ทำการอัดด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 300x350x10 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ด้วยเครื่อง Compression press ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปและชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมีความหนาประมาณ 10 mm ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.9 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 300x350x10 mm



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องอัดเบ้าพอลิเมอร์สำหรับขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อนผงอนุภาคUHMWPE ผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3

3.4 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล

3.4.1 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) ในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) ของวัสดุ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (relative term) การทดสอบความแข็งสำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมทำการทดสอบโดยทั่วไปสามารถทำการทดสอบได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ (ตารางที่ 3.3) กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพอลิเมอร์หรือพลาสติกที่มีลักษณะแข็งหรือมีความแข็งสูง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมธาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิด ต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (plasticized PVC) และพอลิเอทิลีน หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell คือ การวัดความลึกของลูกบอล เหล็กกล้าที่ใช้เป็นตัวกดวัด (indenter) โดยในการทดสอบจะมี 3 ขั้นตอนหลักๆ โดยเริ่มจากการวางน้ำหนักรอง (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 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงที่ใช้กดดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.3

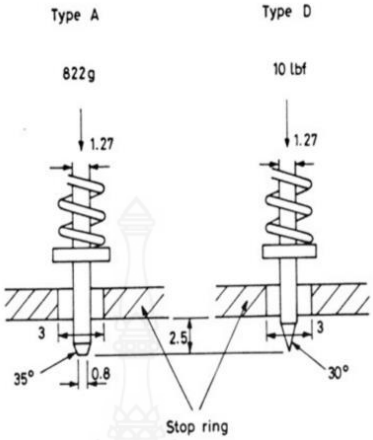
ตารางที่ 3.3 ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ

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 จะใช้ สำหรับพลาสติกที่มีความแข็งสูงโดยในแต่ละสเกลที่ใช้ในการทดสอบนั้นถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 จะถือว่าความไว (sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไปและจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Durometer การใช้ durometer วัดความแข็งพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบกดเข็มหัววัดลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของเข็มหัววัด (ถึงจุด stop ring) แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ (เช่นประมาณ 10 วินาที) ซึ่งตัวเลขที่อ่านค่าได้จาก durometer นี้จะไม่มีหน่วย

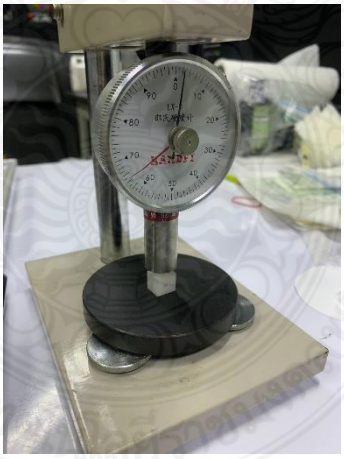
Durometer ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ Shore A และ แบบ Shore D ดังลักษณะของวิธีการที่แสดงในแผนภาพในรูปที่ 3.10-3.11 ซึ่งวิธีการทดสอบความแข็ง Durometer ทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัว

กด โดยทั่วไปแล้ว Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่าในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย [1]



รูปที่ 3.11 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็งแบบ Shore A และ แบบ Shore D

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้ ผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยแรงกดหรือน้ำหนักที่กดลงบนชิ้นทดสอบเท่ากับ 4550 กรัม การทดสอบทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ HANDPI รุ่น LX-D วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D และลักษณะการทดสอบความแข็ง

3.4.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นครากความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ LLOYD INSTRUMENTS รุ่น LR 10K plus ที่มีขนาดแรงดึงสูงสุด 10 kN ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12



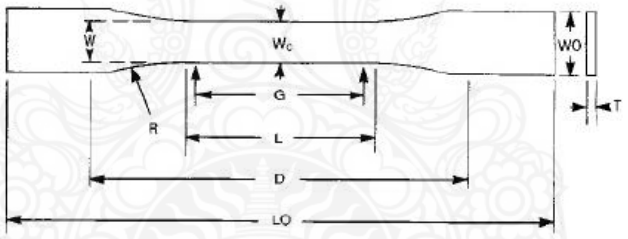


(ก)เครื่องทดสอบแรงดึง (ข) ลักษณะการจับยึดชิ้นงาน

รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบแรงดึงและลักษณะการจับยึดชิ้นงาน

โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 type I ซึ่งมีลักษณะกำหนดค่าพิกัดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ในการทดสอบแรงดึงกำหนดความเร็วในการดึงทดสอบเท่ากับ 50 mm/min ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบนความหนาไม่เกิน 7 mm มีลักษณะแสดงในรูปที่ 3.14

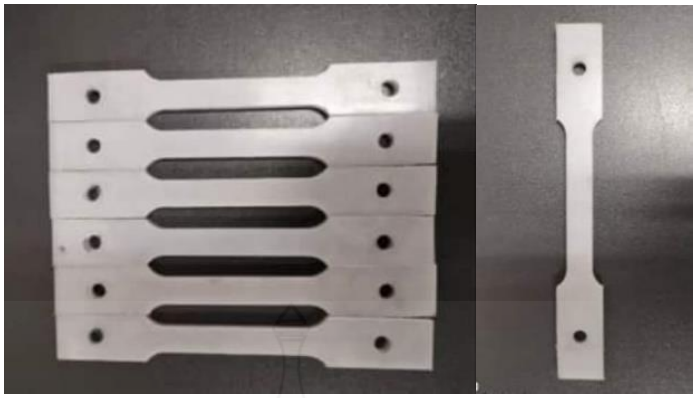
D 638 – 03



Specimen Dimensions for Thickness, *T*, mm [in.][A]

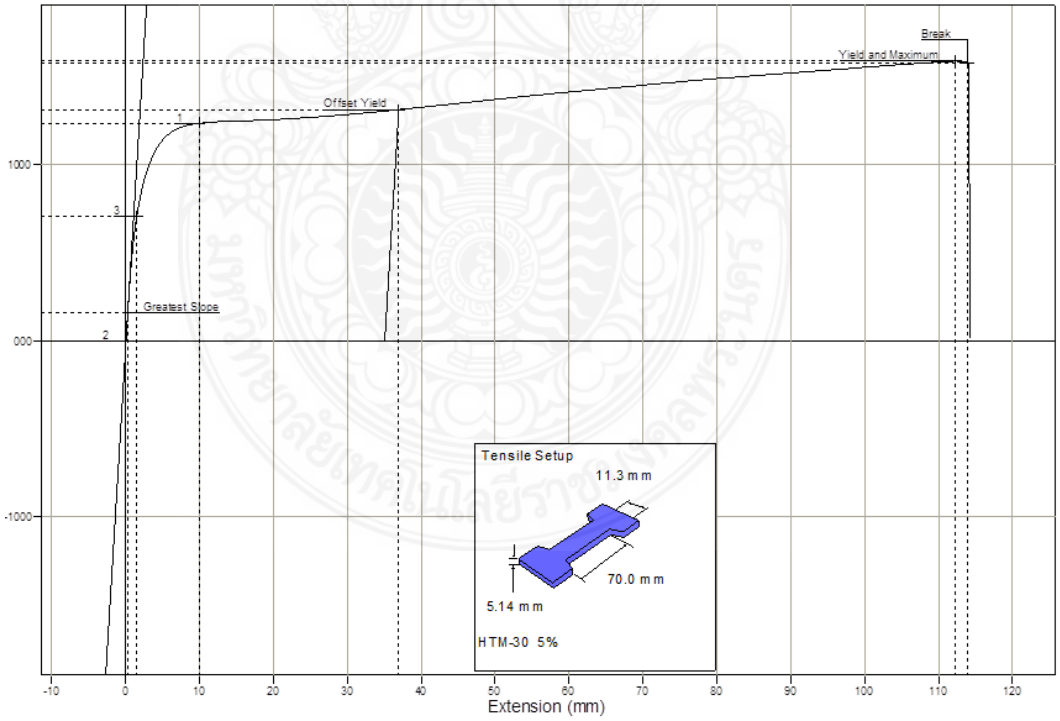
Dimensions (see drawings)	7 [0.28] Type I	Tolerances
W—Width of narrow section[E,F]	13 [0.50]	±0.5 [±0.02][B,C]
L—Length of narrow section	57 [2.25]	±0.5 [±0.02][C]
WO—Width overall, min[G]	19 [0.75]	+ 6.4 [+ 0.25]
WO—Width overall, min[G]	...	
LO—Length overall, min[H]	165 [6.5]	no max [no max]
G—Gage length[I]	50 [2.00]	±0.25 [±0.010][C]
G—Gage length[I]	...	±0.13 [±0.005]
D—Distance between grips	115 [4.5]	±5 [±0.2]
R—Radius of fillet	76 [3.00]	±1 [±0.04][C]
RO—Outer radius (Type IV)	...	±1 [±0.04]

รูปที่ 3.14 ค่าพิกัดของส่วนต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง

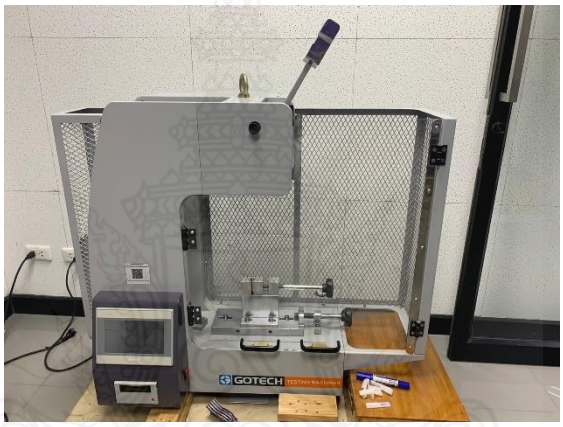
หลังจากนั้นจึงทำการดึงชิ้นทดสอบให้แยกออกจากกันด้วยความเร็วของการดึงคงที่เท่ากับ 50 mm/min การทดสอบแรงดึงจะต้องเฝ้าติดตามและบันทึกแรงดึง (F) อัตราการยืดตัวของวัสดุ (ΔL) แล้วทำการแปลงกลับเป็นค่า Engineering stress และ strain ดังตัวอย่างกราฟผลการทดสอบแรงดึงที่แสดงในรูปที่ 3.16 ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามารถนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่าความเค้นคราก (Yield strength, σ_y) ความเค้น แรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength, σ_u) ความเค้น ณ จุดแตกหัก (breaking strength, σ_b) และความยืด ณ จุดแตกหัก (elongation at break, %ε)



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

3.4.3 การทดสอบแรงกระแทก

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้เป็นการทดสอบความเหนียวหรือการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกชิ้นงานพอลิเมอร์ แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D256 พลังงานกระแทก 1, 2.75 และ 5.5 จูล มุมทดสอบของค้อน 150 องศา สามารถแปลงหน่วยในการแสดงผลเป็น J, kg-cm, และ lb-in ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และมีข้อควรระวังในการทดสอบนั้น คือขนาดของรอยบาก (notch) ต้องคงที่ เพราะขนาดจะมีผลต่อค่าแรงกระแทกหรือค่าความเหนียวได้ นอกจากนี้ความเหนียวของชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบแรงดึงกับค่าที่จากแรกกระแทกอาจจะให้ผลไม่สอดคล้องกันก็ได้เนื่องจากเป็นการทดสอบที่สภาวะต่างกัน



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบแรงกระแทกชิ้นงานพอลิเมอร์ แบบ Izod ตามมาตรฐาน ASTM D256

3.4.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block on Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบ ดังลักษณะเครื่องที่แสดงในรูปที่ 2.20 ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอของห้องปฏิบัติการไตรโบโลยีสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ โดยกำหนดขนาดขนาดความกว้างxความยาวx ความหนาเท่ากับ 10x10x10 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีลักษณะแสดงในรูปที่ 2.20 ซึ่งพื้นผิวของชิ้นทดสอบถูกเตรียมขึ้นด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 พื้นผิววงแหวนมีความหยาบเท่ากับ 0.2 ไมครอน ทำจากเหล็กกล้าแบริ่ง (AISI 52100) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 มิลลิเมตร ที่ผ่านการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 HRC แรงที่ใช้กดลงบนชิ้นทดสอบเท่ากับ 150 นิวตัน เวลาที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 180 นาที ความเร็วของการหมุนวงแหวนเท่ากับ 300 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทางของการหมุนทดสอบ 5,000 เมตร โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะของการทดสอบแบบแห้ง สำหรับในส่วนของวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบนั้น วิเคราะห์จากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดด้วยทศนิยม 4 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 3.19 คำนวณอัตราการสึกหรอด้วยการชั่งน้ำหนัก

ชิ้นงานทดสอบเพื่อหาปริมาตรที่สูญเสีย และนำไปหารกับผลคูณระหว่างแรงที่ใช้ในการกดบน Block กับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ [5]



รูปที่ 3.18 เครื่องชั่งน้ำหนัก Shimadzu digital รุ่น ATX224 ความละเอียด 0.1 mg (0.0001 g) สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ

หลังจากชิ้นทดสอบผ่านการหมุนทดสอบจนได้ระยะทาง 5,000 เมตร ตามที่กำหนดแล้ว โดยจะนำชิ้นทดสอบนั้นออกจากเครื่องทดสอบจากชุดจับยึดชิ้นทดสอบและนำไปทำการชั่งน้ำหนักเพื่อดูน้ำหนักหลังการทดสอบเพื่อมาคำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียไปจากการทดสอบ โดยที่ค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอนั้น สามารถคำนวณหาอัตราการสูญเสียปริมาตรของชิ้นทดสอบเทียบกับแรงกดชิ้นทดสอบ คูณด้วยระยะทางของการทดสอบ ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.1

3.5 การทดสอบทางความร้อน

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์ค่าจุดหลอมเหลวของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยเครื่อง NETZSCN SFA 449 Jupiter ดังรูปที่ 3.19 เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ทางกายภาพ ปฏิกิริยาเคมี ของสารตัวอ่างโดยการเผา ซึ่งความร้อนกับสารตัวอย่าง น้ำหนักของ UHMWPE ที่ผสมกับ อลูมิเนียมออกไซด์จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอุปกรณ์รับสัญญาณของเครื่องจะรับข้อมูลของน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะรายงานผลคุณสมบัติทางความร้อน จุดหลอมเหลว โดยมีอัตราการให้ความร้อนในการวิเคราะห์ตั้งแต่ 0.001 ถึง 50 เคลวินต่อนาที โดยปริมาณ UHMWPE + อลูมิเนียมออกไซด์แต่ละสัดส่วนนั้นจะใช้ปริมาณ 10 กรัม ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.19 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน ยี่ห้อ NETZSCN SFA 449 JUPITER

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบโดยทำการวิเคราะห์ค่าจุดหลอมเหลวของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยเครื่อง NETZSCH รุ่น LFA467 HT ดังรูปที่ 3.20 เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ทางกายภาพ ปฏิกิริยาเคมี ของสารตัวอ่างโดยการใช้แสง มีความยาวคลื่นถึง 2 MHz แสงที่วิ่งผ่านกับสารตัวอย่าง ของ UHMWPE ที่ผสมกับ อลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งอุปกรณ์รับสัญญาณของเครื่องจะรับข้อมูล โดยจะรายงานผลคุณสมบัติทางความร้อน ค่าการนำความร้อน



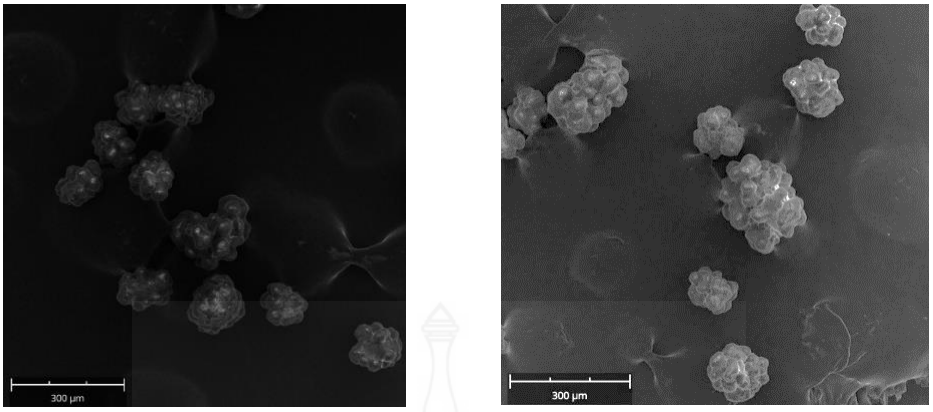
รูปที่ 3.20 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น LFA467 HT

บทที่ 4
ผลการดำเนินงาน

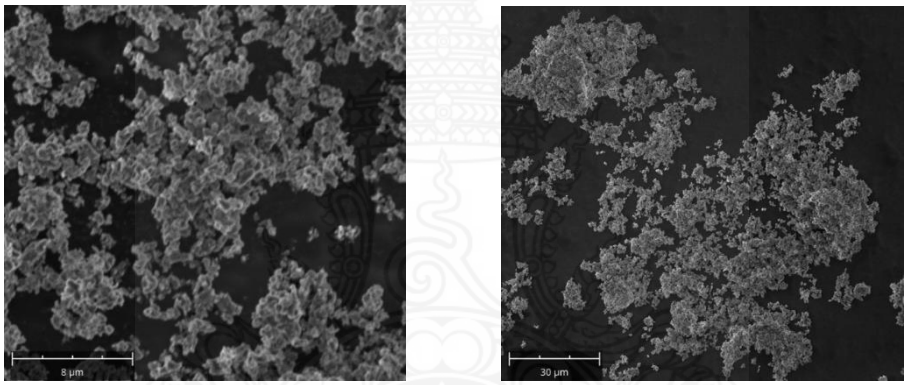
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยทั้งหมดที่ได้ดำเนินการด้วยกระบวนการที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วยการวิเคราะห์ผลของการทดสอบสมบัติทางกลและผลของการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของผง UHMWPE โดยพิจารณาจากสมบัติทางกลที่ดีที่สุดและความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุด ผสมฟิลเลอร์ที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่อัตราการผสมร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบหาปริมาณฟิลเลอร์อลูมิเนียมที่มีผลต่อสมบัติทางกลและอัตราการสึกหรอ โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ XRD Pattern สำหรับ UHMWPE และ Al_2O_3

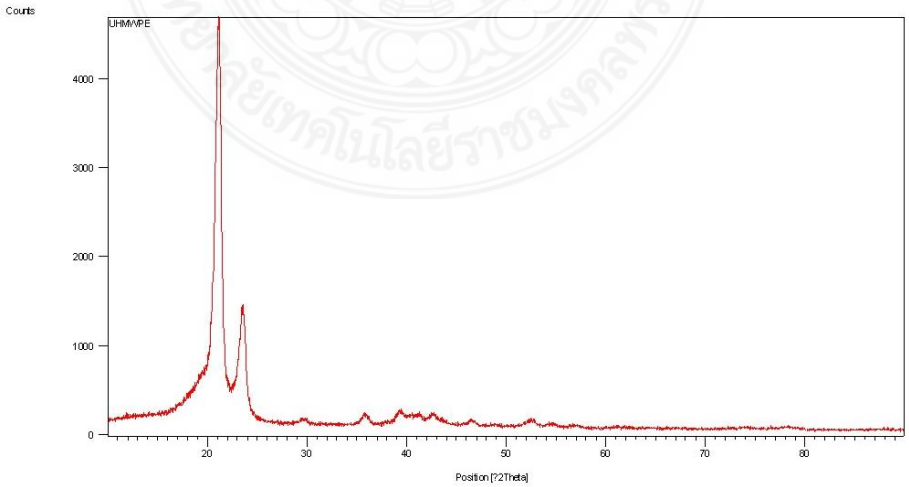
วัสดุฟิลเลอร์ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ ก่อนทำการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของผงวัสดุที่ทดสอบ จะต้องทำการเคลือบผิวทองคำขาวลงบนผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Sputter Coaters ยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES ซึ่งใช้สำหรับการเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสุดท้ายการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าในสภาวะความเป็นสุญญากาศสูง (HV) ซึ่งจะใช้โลหะฉาบลงบนตัวอย่างภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 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 ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าโครงสร้างผลึกของสสารนั้นมีโครงสร้างแบบใด หรือเป็นวัสดุอะไร โดยเครื่องวิเคราะห์ทั้งหมดที่ใช้ศึกษาโครงจุลภาคชิ้นวัสดุทดสอบของ สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 และ 3 มิติ ดังรูปที่ 4.1-4.6 ผลลัพธ์ที่ได้คือการยืนยันว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็น UHMWPE และ Al_2O_3 อย่างแท้จริง



รูปที่ 4.1 รูปลักษณ์สัณฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.2 รูปลักษณ์สัณฐานของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด(SEM) ที่กำลังขยาย 30 ไมครอน



รูปที่ 4.3 XRD Pattern ของ UHMWPE ที่ใช้ในงานวิจัย

จากรูปที่ 4.1 –4.3 เป็นการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดและผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เข้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 และ 3 มิติ อนุภาคผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดจะมีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆ และมีพังผืดยึดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มีขนาดกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน สำหรับผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) จะมีลักษณะเป็นแท่งปริซึมและกลมคละเคล้ากันที่มีขนาดเฉลี่ย 2-5 ไมครอน ผลลัพธ์ที่ได้คือการยืนยันว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็น UHMWPE และ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) อย่างแท้จริง

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

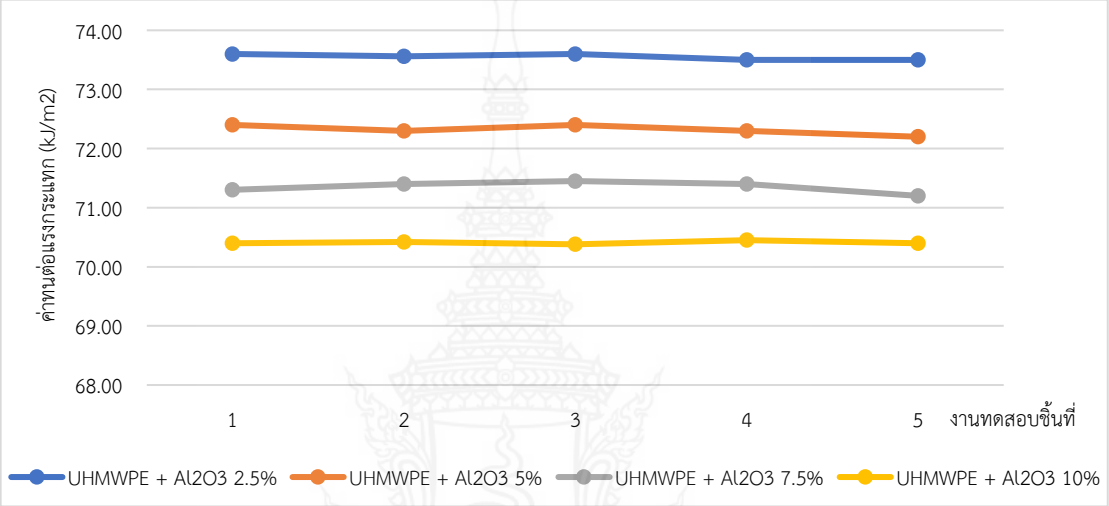
4.2.1 การทดสอบการกระแทก

ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกมีขนาดชิ้นงานทดสอบ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถของชิ้นทดสอบในการรับแรงกระแทก โดยใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก ยี่ห้อ GOTECH testing Mechanic InC. รุ่น GT-7045-HML โดยการทดสอบชิ้นทดสอบแบบ Charpy ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยขนาดที่ใช้ทดสอบนั้นมีขนาดความกว้าง x ความยาว x ความหนา เท่ากับ 2.5x55x10 มิลลิเมตร มีความลึกของรอยบาก 2 มิลลิเมตร โดยใช้มาตรฐาน ASTM E23 โดยชิ้นทดสอบที่มีการผสมระหว่าง UHMWPE ที่เป็นวัสดุหลักและผสมฟิลเลอร์ที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่อัตราส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 แต่ละอัตราส่วนผสมผ่านการทดสอบแรงกระแทกด้วยชิ้นงานทดสอบจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ ทำให้ได้ผลการทดสอบคือค่าความทนต่อแรงกระแทก (kJ/m^2) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ร้อยละของ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สัดส่วนต่างๆ

Specimens	ค่าทนต่อแรงกระแทกชิ้นทดสอบที่ (kJ/m^2)					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	73.60	73.56	73.60	73.50	73.50	73.55
UHMWPE + Al_2O_3 5%	72.40	72.30	72.40	72.30	72.20	72.32
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	71.30	71.40	71.45	71.40	71.20	71.35
UHMWPE + Al_2O_3 10%	70.40	70.42	70.38	70.45	70.40	70.41

จากตารางที่ 4.1 พบว่าผลการทดสอบแรงกระแทก ชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง UHMWPE กับอลูมิเนียมออกไซด์ ที่สัดส่วนเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกต่ำลง โดยมีความทนต่อแรงกระแทก เฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% มีค่าเท่ากับ 73.55 kJ/m^2, 72.32 kJ/m^2, 71.35 kJ/m^2 และ 70.41 kJ/m^2 ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านการทดสอบแรงกระแทก จะลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผล ค่าความทนต่อแรงกระแทกของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละชิ้นทดสอบ

จากรูปที่ 4.4 แสดงผลของการทดสอบค่าความทนต่อแรงกระแทกของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่าความทนต่อแรงกระแทกจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

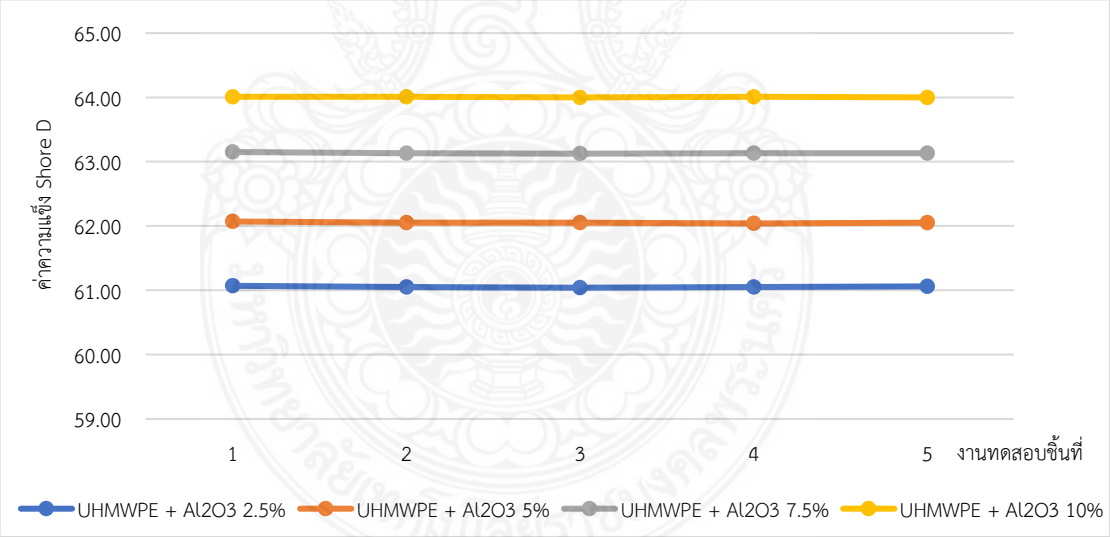
4.2.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งเป็นการแสดงสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความต้านทานในการเกิดรอยกดที่พื้นผิว ซึ่งในการทดสอบในครั้งได้เลือกการทดสอบความแข็งแบบ Durometer แบบ Shore ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 140 °C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 180 นาที ใช้การทดสอบแบบ Shore D ที่หัวเข็มมีลักษณะแหลม (หัวเข็มเป็นส่วนสำคัญมากที่จะต้องเลือกให้ถูกต้อง) การวัดความแข็งในหน่วย Shore D นั้นจะวัดความแข็งออกมาด้วยการพิจารณาจากระยะของหัวเข็มที่จมลงไปในเนื้อวัสดุแล้วแปลงค่าออกมาเป็นค่าความแข็งในหน่วย Shore ผลการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 (JIS K 7215 D, ISO R 868 D)

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	ค่าความแข็ง Shore D					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	61.07	61.05	61.04	61.05	61.06	61.05
UHMWPE + Al_2O_3 5%	62.07	62.05	62.05	62.04	62.05	62.14
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	63.15	63.13	63.13	63.12	63.13	63.13
UHMWPE + Al_2O_3 10%	64.01	64.01	64.00	64.01	64.00	64.00

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความแข็ง Shore D ชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ ที่อัตราส่วนผสมระหว่าง UHMWPEกับอลูมิเนียมที่สัดส่วนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็ง Shore D เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าความแข็ง Shore D เฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 61.05, 62.50, 63.13 และ 64 ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าความแข็งสูงสุดเบื้องต้นนี้ ที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมร้อยละ 10 คือ 64 shore D



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของการทดสอบค่าความแข็งของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

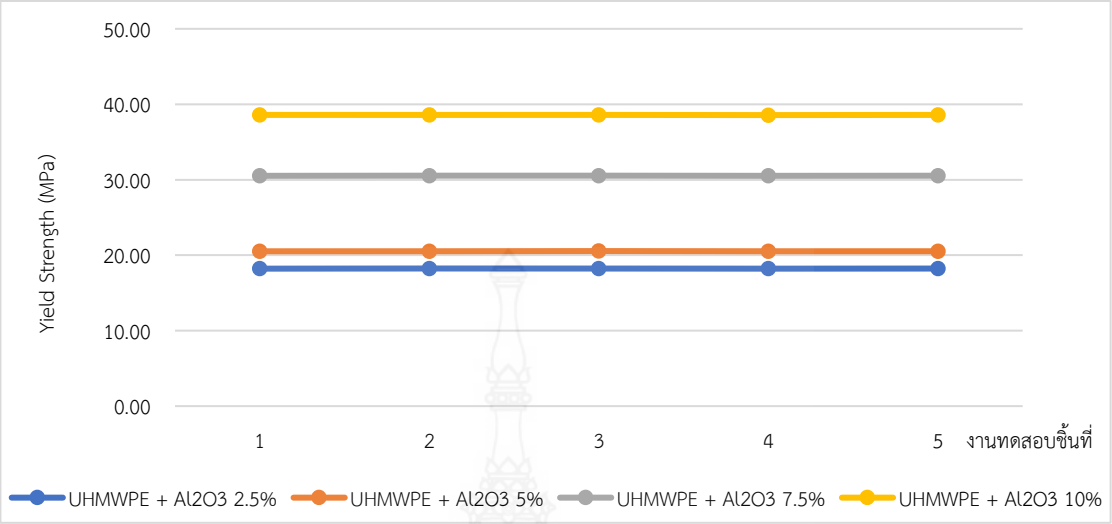
4.2.3 การทดสอบแรงดึง

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X Plus ของห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร พบว่า ชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 140°C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 180 นาที จะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Breaking Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of elasticity (MPa) ด้วยการเตรียมชิ้นงานทดสอบชุดละ 5 ชิ้นงานและนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละค่า จาการทดสอบพบว่าที่ส่วนผสมระหว่าง UHMWPE และอลูมิเนียมออกไซด์ที่เหมาะสม คือ UHMWPE + Al_2O_3 ค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 – 4.6 และรูปที่ 4.6 – 4.9

ตารางที่ 4.3 ค่าทดสอบแรงดึง ค่า Yield Strength ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	Yield Strength (MPa)					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	18.22	18.24	18.23	18.22	18.23	18.23
UHMWPE + Al_2O_3 5%	20.52	20.54	20.55	20.53	20.54	20.53
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	30.52	30.54	30.54	30.52	30.53	30.53
UHMWPE + Al_2O_3 10%	38.58	38.59	38.58	38.57	38.58	38.58

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าทดสอบแรงดึง ค่า Yield Strength ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 140°C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 180 นาที จำนวน 5 ชิ้นทดสอบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 18.23 MPa, 20.53 MPa, 30.53 MPa และ 38.58 MPa ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าทดสอบแรงดึง Yield Strength สูงสุด ที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมร้อยละ 10 wt% คือ 38.58 MPa



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Yield Strength ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

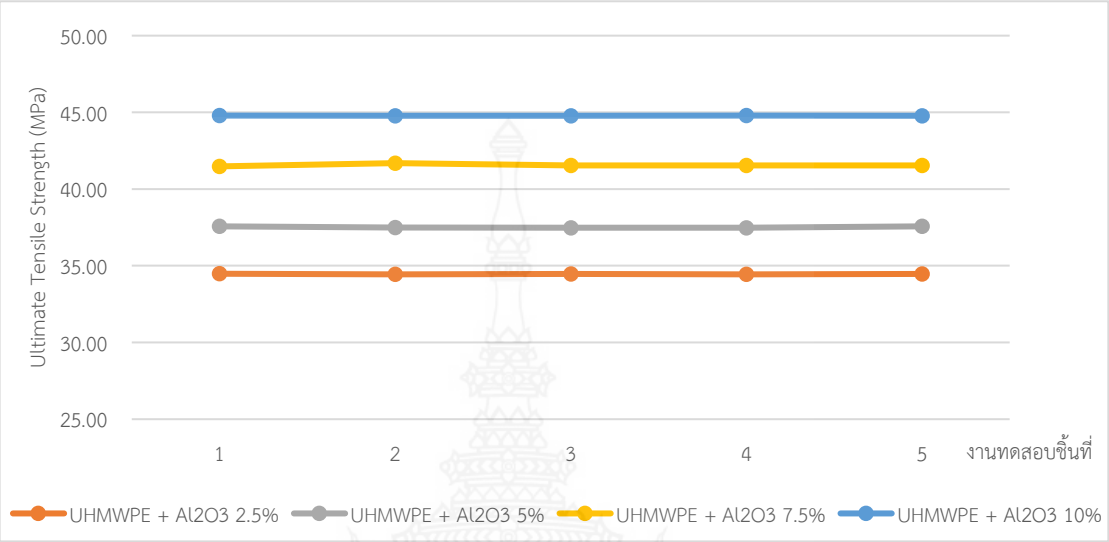
จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของการทดสอบแรงดึง ค่า Yield Strength UHMWPE + Al_2O_3 ของแต่ละการทดสอบนั้น โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่าความทดสอบแรงดึง ค่า Yield Strength จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.4 ค่าทดสอบแรงดึง ค่า Ultimate Tensile Strength ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	Ultimate Tensile Strength (MPa)					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	34.48	34.44	34.46	34.44	34.47	34.15
UHMWPE + Al_2O_3 5%	37.57	37.49	37..48	37.48	37.57	37.51
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	41.48	41.69	41.55	41.54	41.55	41.56
UHMWPE + Al_2O_3 10%	44.79	44.78	44.78	44.79	44.78	44.78

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าทดสอบแรงดึง ค่า Ultimate Tensile Strength ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 140°C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 180 นาที จำนวน 5 ชิ้นทดสอบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ

UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 34.15 MPa, 37.51 MPa, 41.56 MPa และ 44.78 MPa ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าทดสอบแรงดึง ค่า Ultimate Tensile Strength สูงสุด ที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10 wt% คือ 44.78 MPa



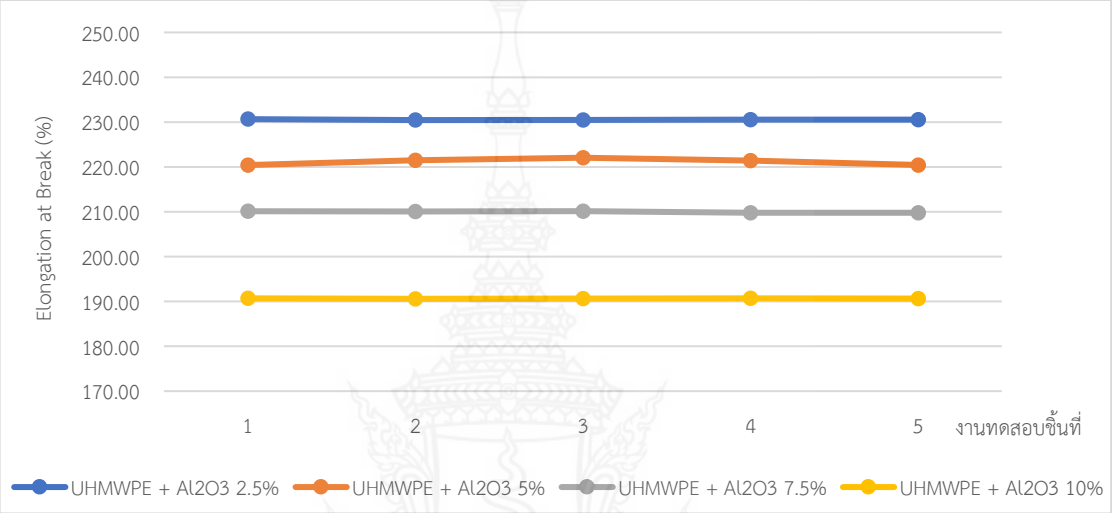
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Ultimate Tensile Strength ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของการทดสอบแรงดึง ค่า Ultimate Tensile Strength ของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่า Ultimate Tensile Strength จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.5 ค่าทดสอบแรงดึง ค่า Elongation at Break ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	Elongation at Break (%)					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	230.66	230.45	230.50	230.55	230.54	230.63
UHMWPE + Al_2O_3 5%	220.45	221.46	222.05	221.45	220.44	221.17
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	210.12	210.10	210.11	209.78	209.80	209.98
UHMWPE + Al_2O_3 10%	190.70	190.6	190.66	190.70	190.66	190.66

จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่าทดสอบแรงดึง ค่า Elongation at Break ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 140°C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 180 นาที จำนวน 5 ชิ้นทดสอบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 230.63%, 221.17%, 209.98% และ 190.66% ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าทดสอบแรงดึง ค่า Elongation at Break สูงสุด ที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 2.5 คือ 230.63%



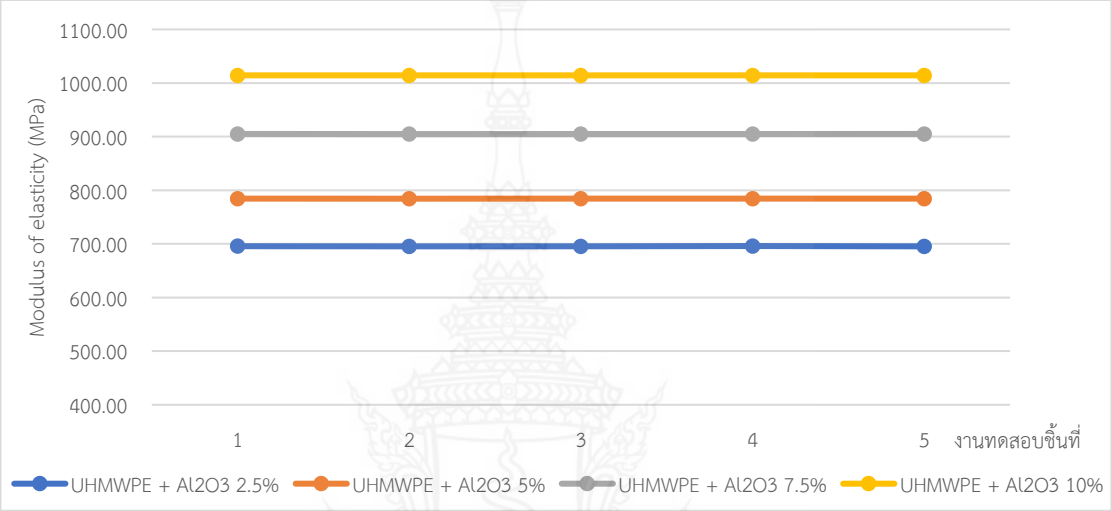
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Elongation at Break ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ (Al_2O_3)

จากรูปที่ 4.8 แสดงผลของการทดสอบแรงดึง ค่า Elongation at Break ของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่า Elongation at Break จะลดลงตามอัตราส่วนที่ผสม

ตารางที่ 4.6 ค่าทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of elasticity ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	Modulus of elasticity (MPa)					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	695.78	695.69	695.58	695.77	695.70	695.70
UHMWPE + Al_2O_3 5%	784.48	784.49	784.50	784.50	784.48	784.49
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	905.14	904.89	904.92	905.10	905.14	905.03
UHMWPE + Al_2O_3 10%	1014.41	1014.40	1014.41	1014.40	1014.41	1014.41

จากตารางที่ 4.6 พบว่าค่าทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of elasticity ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 140°C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 180 นาที จำนวน 5 ชิ้นทดสอบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 695.70 MPa, 784.49 MPa, 905.49 MPa และ 1014.41 MPa ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of elasticity สูงสุด ที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 10 wt% คือ 1014.41 MPa



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of elasticity ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of elasticity ของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่า Modulus of elasticity จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์

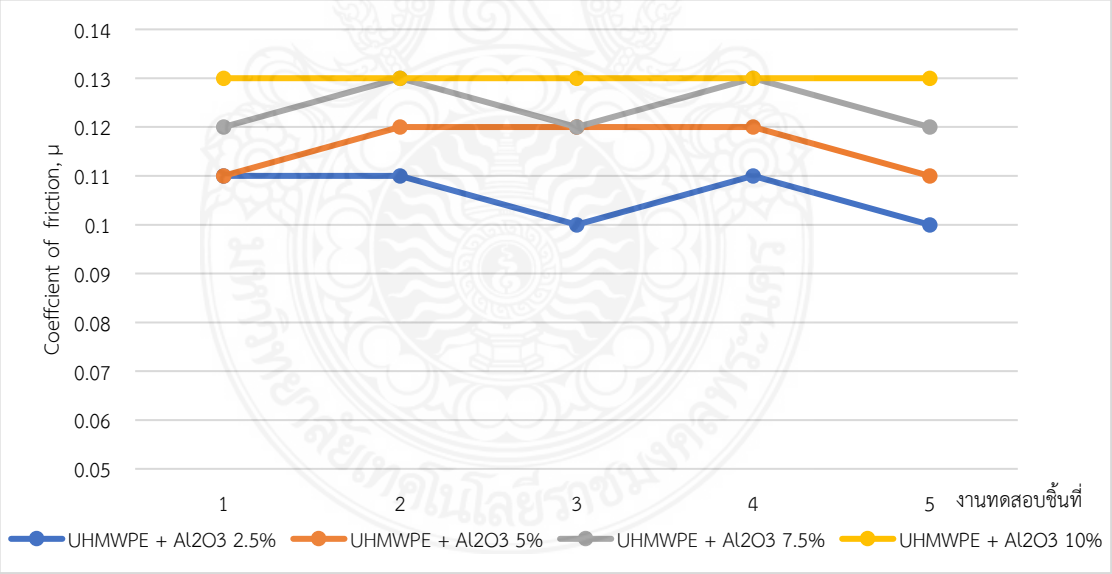
4.2.4 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบเกี่ยวกับการสึกหรอเป็นการหาค่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานที่เกิดจากการกระทำเชิงกลโดยสัมผัสกับของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส โดยปกติการสึกหรอจะเป็นอันตรายมาก แต่ถ้าหากเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยอาจจะยอมรับได้ ในการทดสอบในครั้งนี้เป็นการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ค่าร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 จำนวน 5 ชิ้นทดสอบ ตามที่แสดงในตารางที่ 4.7 - 4.9

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	Coefficient of friction, μ					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.10
UHMWPE + Al_2O_3 5%	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	0.12	0.13	0.12	0.13	0.12	0.12
UHMWPE + Al_2O_3 10%	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ของจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ มีค่าเฉลี่ยของ UHMWPEผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 0.10, 0.11, 0.12 และ 0.13 ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction) สูงสุด ที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมร้อยละ 10 คือ 0.13



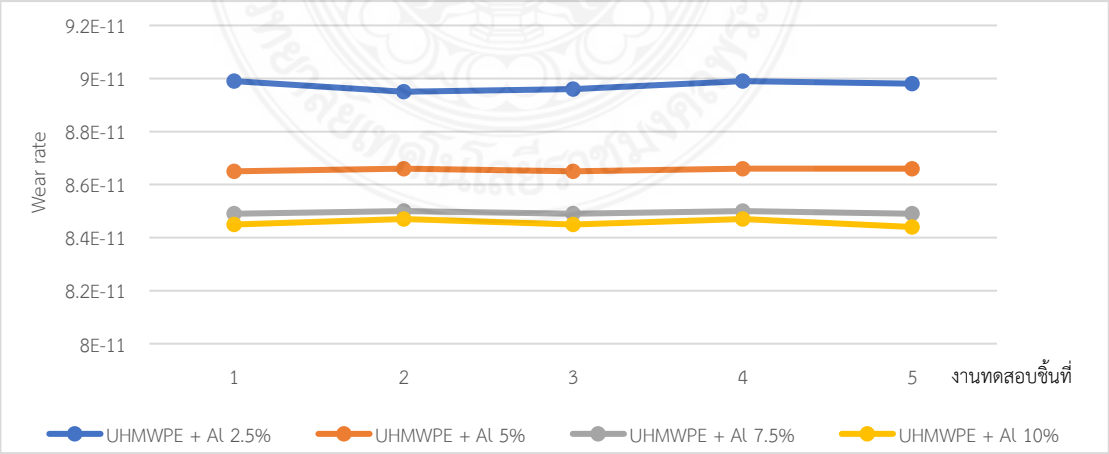
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดสอบไตรโบโลยี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลของการทดสอบไตรโบโลยี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.8 ค่าอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	Wear rate (mm^3/N.m)					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	8.99E-11	8.95E-11	8.96E-11	8.99E-11	8.98E-11	8.97E-11
UHMWPE + Al_2O_3 5%	8.65E-11	8.66E-11	8.65E-11	8.66E-11	8.66E-11	8.66E-11
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	8.49E-11	8.50E-11	8.49E-11	8.50E-11	8.49E-11	8.49E-11
UHMWPE + Al_2O_3 10%	8.45E-11	8.47E-11	8.45E-11	8.47E-11	8.44E-11	8.45E-11

จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่าอัตราการสึกหรอ (Wear rate) จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ของจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ มีค่าเฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 8.97E-11mm^3/N.m, 8.66E-11mm^3/N.m, 8.49E-11 mm^3/N.m และ 8.45E-11 mm^3/N.m ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ต่ำสุดที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 10 คือ 8.45E-11 mm^3/N.m



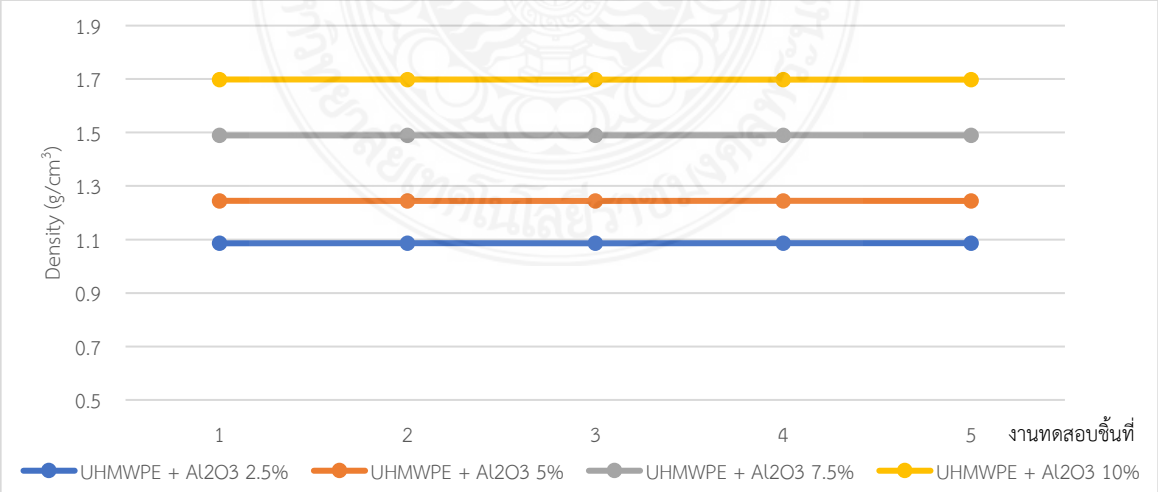
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดสอบไตรโบโลยี ค่าอัตราการสึกหรอ ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลของการทดสอบไตรโบโลยี ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.9 ค่าความหนาแน่น (Density) ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	Density (g/cm^3)					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	1.085815	1.085814	1.085811	1.085812	1.085814	1.085813
UHMWPE + Al_2O_3 5%	1.244695	1.244697	1.244696	1.244698	1.244697	1.244696
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	1.489326	1.489329	1.489329	1.489327	1.489329	1.489328
UHMWPE + Al_2O_3 10%	1.698510	1.698518	1.698514	1.698515	1.698514	1.698514

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าความหนาแน่น (Density) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ของจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ มีค่าเฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 1.085813 g/cm^3, 1.244696g/cm^3, 1.489328g/cm^{3}และ 1.698514 g/cm^3 ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าความหนาแน่น (Density) สูงสุดที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 10 คือ 1.698514 g/cm^3



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการทดสอบไตรโบโลยี ค่าความหนาแน่น ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

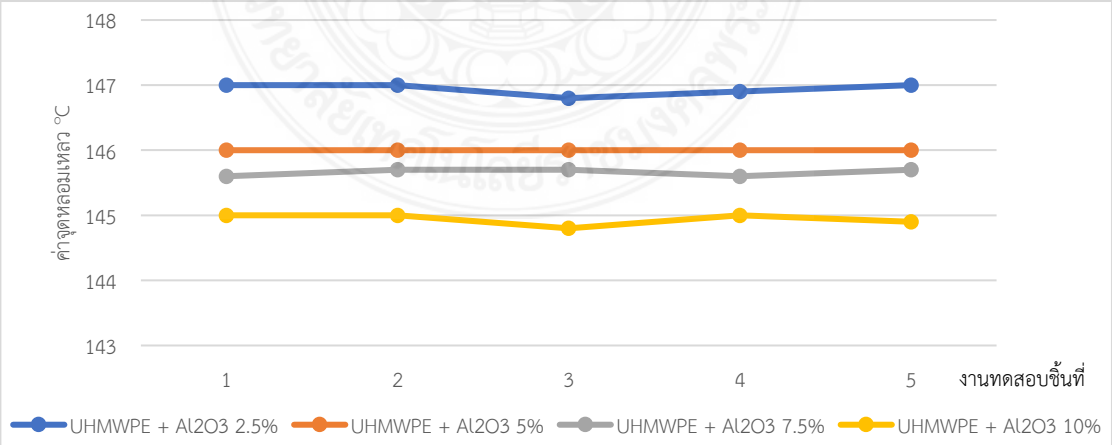
จากรูปที่ 4.11 แสดงผลของการทดสอบไตรโบโลยี ค่าความหนาแน่น ของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่าความหนาแน่นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตารางที่ 4.10 ค่าจุดหลอมเหลว ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	°C					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	147	147	146.8	146.9	147	147
UHMWPE + Al_2O_3 5%	146	146	146	146	146	146
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	145.6	145.7	145.7	145.6	145.7	145.7
UHMWPE + Al_2O_3 10%	145	145	144.8	145	144.9	145

จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่าจุดหลอมเหลว จะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่เพิ่มขึ้น ของจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ มีค่าเฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 147 °C, 146 °C, 145.7 °C และ 145 °C ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าจุดหลอมเหลวต่ำสุดที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 10 คือ 145 °C



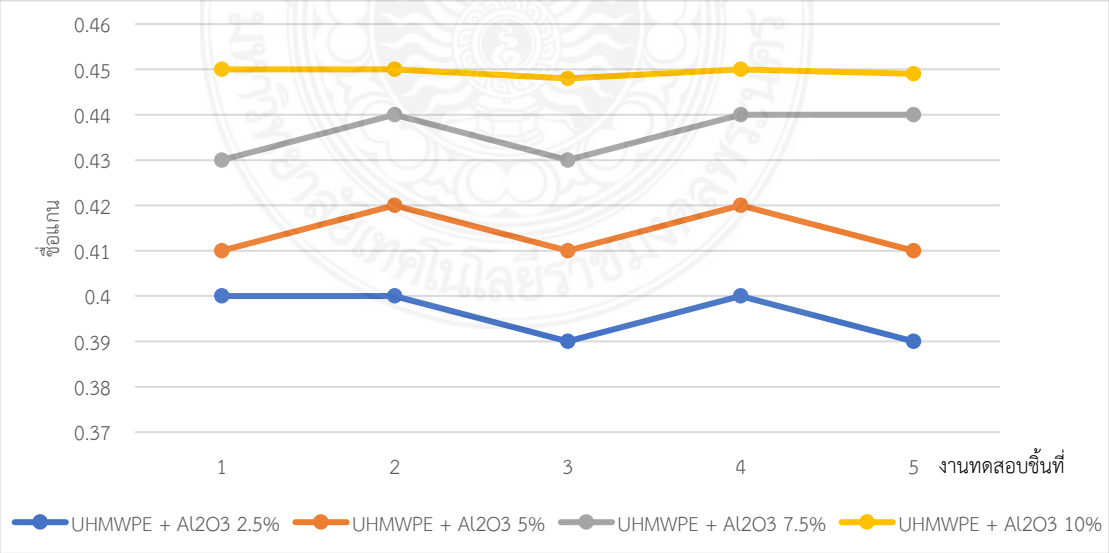
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ค่าจุดหลอมเหลว ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของการทดสอบทางสมบัติทางความร้อน ค่าการนำความร้อน ของ UHMWPE + Al_2O_3 แต่ละการทดสอบ โดยที่แต่ละชิ้นทดสอบนั้นจะผสมตามอัตราส่วนผสมระหว่าง 2.5, 5, 7.5 และ 10 wt% แต่ละชิ้นทดสอบพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงในอัตราส่วนผสมเดียวกัน โดยเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เข้าไปค่าการนำความร้อนจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.11 ค่าการนำความร้อน ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Specimens	W/mK					
	1	2	3	4	5	Average
UHMWPE + Al_2O_3 2.5%	0.4	0.4	0.39	0.4	0.39	0.39
UHMWPE + Al_2O_3 5%	0.41	0.42	0.41	0.42	0.41	0.41
UHMWPE + Al_2O_3 7.5%	0.43	0.44	0.43	0.44	0.44	0.44
UHMWPE + Al_2O_3 10%	0.45	0.45	0.448	0.45	0.449	0.45

จากตารางที่ 4.11 พบว่าค่าการนำความร้อน จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ของจำนวน 5 ชิ้นทดสอบ มีค่าเฉลี่ยของ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 มีค่าเท่ากับ 0.39, 0.41, 0.44 และ 0.45 ตามลำดับ สำหรับการพิจารณาในด้านค่าความหนาแน่น (Density) สูงสุดที่อัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ร้อยละ 10 คือ 0.45 จากรูปที่ 4.13 ค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมออกไซด์



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน ค่าการนำความร้อน ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมอลูมิเนียมที่ร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ของโครงการที่ต้องการศึกษาสมบัติทางกลและประสิทธิภาพทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด(UHMWPE) ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ โดยใช้ผง UHMWPE เป็นวัสดุตั้งต้นและใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum Oxide) เป็นวัสดุฟิลเลอร์ ขึ้นรูปวัสดุด้วยกรรมวิธี Hot compression molding process ภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 140°C และเวลาคงอุณหภูมิที่ 180 นาที สามารถสรุปผลการดำเนินการศึกษาวิจัยออกเป็นกลุ่มการทดลองและตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยประกอบด้วยโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาสมบัติทางกลและประสิทธิภาพทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โดยใช้ผง UHMWPE เป็นวัสดุตั้งต้นและใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นวัสดุฟิลเลอร์ ใช้วิธีผสมระหว่าง ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด UHMWPE และ ผงอลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยวิธีผสมแบบเปียกโดยมีตัวกลางคือเอทิลแอลกอฮอล์เพื่อให้การผสมนั้นเข้ากันได้ดีขึ้นรูปวัสดุด้วยกรรมวิธี Hot compression molding process ภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 140°C และเวลาคงอุณหภูมิที่ 180 นาที ชิ้นงานทดสอล UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) ร้อยละ 2.5, 5, 7.5 และ 10 ตามลำดับ มีจำนวนละ 5 ชิ้นงานทดสอบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบทางกล ของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ประกอบไปด้วยค่าความแข็ง, ค่าทนต่อแรงกระแทก, Yield strength (MPa), Ultimate tensile strength (MPa), Elongation at Break (%), และModulus of elasticity โดยมีอัตราส่วนการผสมของผงอลูมิเนียมออกไซด์ ที่ 2.5 wt% นั้นจะมีค่าเท่ากับ 61.05 Shore D, 73.55 kJ/m^2, 18.23 MPa, 34.15 MPa, 230.63%, 695.70 MPa เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมออกไซด์เป็น 5, 7.5 และ 10 wt% จะส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการทดสอบสมบัติทางกล ที่ อัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10 wt% จะมีค่าเท่ากับ 64 Shore D, 70.41 kJ/m^2, 38.58 MPa, 44.78 MPa, 190.66%, 1014.41 MPa โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้ในบางกรณี ทั้งนี้ ต้องให้ความสำคัญกับกระบวนการผสมสารทั้งสองเข้าด้วยกันให้สามารถสอดแทรกและกระจายอนุภาคผงได้ทั่ว รวมทั้งกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนที่จะส่งผลให้สมบัติทางกลจากการทดสอบในแต่ละสมบัติอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

2. ผลการทดสอบไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่น โดยจำนวนชิ้นทดสอบตัวอย่างรวม 5 ชิ้น ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนและผงอลูมิเนียมออกไซด์นั้น พบว่าชิ้นงานทดสอบที่มีการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 5, 7.5 และ 10 จะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นไม่มากนักหรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.698514 g/cm^3 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าที่ลดลงเมื่อมีการเติมผงอลูมิเนียม

ออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.13 และจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอต่ำลงโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.45E-11mm^3/N.m

3. ผลการทดสอบทางความร้อน โดยหาค่าการนำความร้อน และจุดหลอมเหลว โดยทดสอบชิ้นดสอบรวม 5 ชิ้น ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) พบว่าชิ้นงานทดสอบที่มีการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ อัตราส่วนผสม 2.5 wt% จะมีจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานจะอยู่ที่ 147 °C และพบว่าค่าการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเมื่ออัตราส่วนผสมของผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่จะส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้นไม่มากนักหรืออาจจะไม่มีระยยะที่สำคัญมากพอ โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.13 W/mK

5.2 ข้อเสนอแนะ

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

ในการทดลองขึ้นรูป UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ด้วยสภาวะของการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยตัวแปร คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาต่างๆ นั้น เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล แต่อาจยังมีตัวแปรอื่นๆอีกที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลด้วย เช่น ชนิดของสารเพิ่มคุณภาพหรือฟิลเลอร์อื่นๆ อีกทั้งในกระบวนการเย็นตัวของวัสดุหลังการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีรูปแบบการเย็นตัวอย่างเร็วหรือการเย็นตัวอย่างช้า ก็ยังส่งผลต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน

เนื่องด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) มีหลายขนาดหลายชนิดรวมถึงความบริสุทธิ์ ดังนั้นการเลือกใช้ฟิลเลอร์ที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) ก็มีผลอย่างมากต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] ประกอบ ชาติภุกต์ และคณะ, “พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบเพื่อความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม,” *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร,* กรุงเทพ, 2559.

[2] Ronald Montoya. (Feb, 2022). What Are Run-Flat Tires?,” [ออนไลน์], Available: https://www.edmunds.com/driving-tips/run-flat-tires-a-primer.html

[3] Jignesh Sabhadiya. What Is A Run Flat Tire And How They Work?,” [ออนไลน์], Available: https://www.engineeringchoice.com/run-flat-tires/

[4] BUYACAR TEAM. (Sep 17, 2021). What are run-flat tyres?,” [ออนไลน์], Available: https://www.buyacar.co.uk/cars/497/what-are-run-flat-tyres

[5] ประกอบ ชาติภุกต์, พลรัชต์ บุญมี, ธีระวัฒน์ แม้นด้วง และราม ชาติภุกต์, “ล้อ Run-flat สำหรับรถยนต์บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกราะ,” รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ.2561.

[6] S.M. Kurtz, “UHMWPE Biomaterials Handbook,” 2 nd., Elsevier Ins., China, 2009.

[7] Gul R. “Improved UHMWPE for use in total joint replacement,” *Ph.D. Dissertation. Boston: Massachusetts Institute of Technology*, 1997.

[8] 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.

[9] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra PJ. “Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history,” *Polymer,* 1990;31:1435–40.

[10] Barnetson A, Hornsby PR. “Observations on the sintering of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) powders,” *J aterials Sci Letters,* 1995;14:80–4.

[11] Bellare A, Cohen RE. “Morphology of rod stock and compressionmoulded sheets of ultra-high- molecular-weight polyethylene used in orthopaedic implants,” *Biomaterials, 1996*; 17:2325–33.

[12] 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.

[13] Shenoy AV, Saini DR. “Compression moulding of ultra-high molecular weight polyethylene,” *Plast Rubber Proc Appl*, 1985; 5:313–17.

[14] Wang X-Y, Li S-Y, Salovey R. “Processing of ultra-high molecular weight polyethylene,” *J Appl Poly Sci,* 1988; 35:2165–71.

[15] 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.

[16] McKenna GB, Crissman JM, Khoury F. “Deformation and failure of ultra-high molecular weight polyethylene,” *ANTEC ’81,* 1981; 39:82–4.

[17] 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.

[18] Farrar DF, Brain AA. “The microstructure of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements,” *Biomaterials,* 1997; 18:1677–85.

[19] Halldin GW, Kamel IL. “Powder processing of ultra-high molecular weight polyethylene. I. Powder characterization and compaction,” *Poly Eng Sci,* 1977; 17:21–6.

[20] Halldin GW, Kamel IL. “Powder processing of ultra-high molecular weight polyethylene, II. Sintering,” *ANTEC 77,* 1977; 35:298–300.

[21] Olley RH, Hosier IL, Bassett DC, Smith NG. “On morphology of consolidated UHMWPE resin in hip cups,” *Biomaterials,* 1999; 20:2037–46.

[22] 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.

[23] Lykins MD, Evans MA. “A comparison of extruded and molded UHMWPE,” *Trans 21st Soc Biomater,* 1995; 18:385.

[24] Gwidon W. Stachowiak and Andrew W. “Batchelor, Tribology Series 24, Engineering Tribology,” *Butterworth Heinemann*, 1993.

[25] Jamal Takadoum. “Materials and Surface Engineering in Tribology, CPI Antony Rowe Ltd, Chippenham,” *Wiltshire, Great Britain,* 2008.

[26] I. V. Kragelskii, “Friction and Wear, Elmsford,” *Pergamon Press,* 1982.

[27] S. Bahadur, “The development of transfer layers and their role in polymer tribology,” *Wear,* no.245, pp. 92, 2000.

[28] 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.

[29] V. A. Bely, A. I. Sviridenok, M. I. Petrokovets and V. G. Savkin, “Friction and Wear in Polymer–Based Materials,” *Oxford, Pergamon Press,* 1982.

[30] K. R. Makinson and D. Tabor, *Proc. Roy. Soc.,* 1964, no. A281, pp. 49.

[31] A. I. Sviridenok, V. A. Bely, V. A. Smurugov, and V. G. Savkin, *Wear,* vol. 25, pp. 301, 1973.

[32] K. Tanaka, Y. Uchiyama and S. Toyooka, *Wear,* vol. 23, pp. 153, 1973.

[33] 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.

[34] I. V. Kragelskii, M. N. Dobychin and V. S. Kombalov, "Friction and Wear Calculation Methods," *Oxford, Pergamon Press,* 1982.

[35] S. P. Gubin, Yu. A. Koksharov, G. B. Khomutov and G. Yu. Yurkov, Russ. Chem. Rev., 2005, vol. 74, pp. 489.

[36] L. Yu and S. Bahadur, *Wear,* vol. 214, pp. 245, 1998.

[37] V. L. Vakula and L. M. Pritykin, "Physical Chemistry of Polymer Adhesion," *(Khimia, Moscow*) (in Russian), 1984.

[38] C.W. Bunn and E.R. Howells, "Structures of Molecules and Crystals of Fluorocarbons," *Nature,* vol. 174, pp. 549–551, 1954.

[39] 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.

[40] 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.

[41] K. R. Makinson and D. Tabor. "The Friction and Transfer of Polytetrafluoro–ethylene," *Proc. Roy. Soc., London, Series A,* vol. 281, pp. 49–61, 1964.

[42] D.H. Buckley, "Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication," *Elsevier, Amsterdam,* 1981.

[43] D. Gong, Q. Xue and H. Wang, "ESCA Study on Tribochemical Characteristics of Filled PTFE," *Wear,* vol. 148, pp. 161–169, 1991.

[44] 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.

[45] B. Briscoe, "Wear of Polymers: an Essay on Fundamental Aspects," *Tribology International,* vol. 14, pp. 231–243, 1981.

[46] K. Tanaka and T. Miyata, "Studies on the Friction and Transfer of Semi–Crystalline Polymers," *Wear,* vol. 41, pp. 383–398, 1977.

[47] V.K. Jain and S. Bahadur, "Material Transfer in Polymer–Polymer Sliding," *Wear,* vol. 46, pp. 177–198, 1978.

[48] 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.

[49] 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

[50] ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรมและคณะ, “อิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันกดอัดและเวลาในการอัดขึ้นรูปที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคสมบัติทางกลและพฤติกรรมการสึกหรอของพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง,” *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ,* หน้า 651-656, กรกฎาคม 2561.

[51] นพณัช พวงมาลีและคณะ, “อิทธิพลของแรงกระทำความเร็วผิวสัมผัสและความหยาบผิวคู่สัมผัสที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงภายใต้การลื่นไถลแบบแห้ง,” *การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ,* หน้า 657-662, กรกฎาคม 2561.

[52] ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ, ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี, “การปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุทางการแพทย์เพื่อลดการสึกหรอ,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย,* ครั้งที่ 25, ตุลาคม 2554.

[53] วิโรจน์ ฉัตรเกษ, “อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 2557.

[54] Bo Zhang, Wei Huang, Jingqiu Wang, Xiaolei Wang. “Comparison of the effects of surface texture on the surfaces of steel and UHMWPE,” *Tribology International,* Vol. 65, pp. 138-145, Jan. 2013.

[55] Boon Peng Chang, Hazizan Md Akil, Ramdziah Bt Nasir, Abbas Khan. “Optimization on wear performance of UHMWPE composites using reponse surface methodology,” *Tribology International,* vol. 88, pp. 252-262, 2015.

[56] Ido Meshi, Iris Amarilio, Dana Benes, Rami Haj-Ali. “Delamination behavior of UHMWPE soft layered composites,” *Composites Part B,* Vol. 98, pp. 166-175, May. 2016.

[57] R.M. Trommer, M.M. Maru, W.L. Oliveira Filho, V.P.S. Nykanen, C.P. Gouvea, B.S. Archanjo, E.H. Martins Ferreira, Rui F. Silva, C.A. Achete, “Multi-Scale Evaluation of Wear in UHMWPE-Metal Hip Implants Tested in a hip Joint Simulator,” *Biotribology*, vol. 4, pp. 1-11, 2015.

[58] Alaleh Safari, Montserrat Espanol, Maria-Pau Ginebra, Michel J. Cervantes, Nazanin Emami. “Effect of dynamic loading versus static loading on the frictional behavior of a UHMWPE pin in artificial biolubricants,” *Biosurface and Biotribology,* Vol. 3, pp. 35-44, 2017.

[59] Weston J. Wood, Russ G. Maguire, Wei Hong Zhong, “Improved wear and mechanical properties of UHMWPE-carbon nanofiber composites through an optimized paraffin-assisted melt-mixing process,” *Composites: Part B,* Vol. 42, pp. 584-591, 2011.

[60] Sanjeev Sharma, Jayashree Bijwe, Stephane Panier, “Assessment of potential of nano and micro-sized boron carbide particles to enhance the abrasive wear resistance of UHMEPE,” *Composites Part B,* Vol. 99, pp. 312-320, 2016.

[61] RunFlat International, Material. (2021), [ออนไลน์], Available: https://runflatinternational.com/material/

[62] O. Hussain, B. Ahmad and S. Saleem, “Tribological performance of biomedical grade UHMWPE/nano-Al2 O3 / Vitamin-C hybrid composite for cartilage replacements,” Mater. Lett., vol. 291, p. 129-515, May. 2021

[63] F. S. Senatov et al., “Biocompatible polymer composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene perspective for cartilage defects replacement,” J. Alloys Compd., vol. 586, pp. S544–S547, Feb. 2014

[64] J. J. Wu, C. P. Buckley, J. J. O’Connor, “Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions,” Biomaterials, pp. 3773-3783, Sep. 2002.

[65] Min ZhiRonga, Ming QiuZhanga, GuangShia, Qiu LongJia, BerndWetzelc, KlausFriedrichc, Graft polymerization onto inorganic nanoparticles and its effect on tribological performance improvement of polymer composites, Tribology International, 2003, Pages 697-707

[66] Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk, “Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al2O3 for Application in Engineering,” RMUTP Research Journal, vol. 16, no. 1, 2022, pp. 192-202.

[67] วิชาญชัย ปลีนารัมย์, “การศึกษาสมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดด้วยการผสมโลหะเสริมแรงน้ำหนักเบา” การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการครั้งที่ 9, โรงแรมเฮอริเทจ เชียงราย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 1-3 พฤษภาคม 2567.

[68] วิชาญชัย ปลีนารัมย์, “การเพิ่มประสิทธิภาพทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดด้วยการผสมโลหะเสริมแรงน้ำหนักเบา” การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการครั้งที่ 9, โรงแรมเฮอริเทจ เชียงราย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 1-3 พฤษภาคม 2567.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

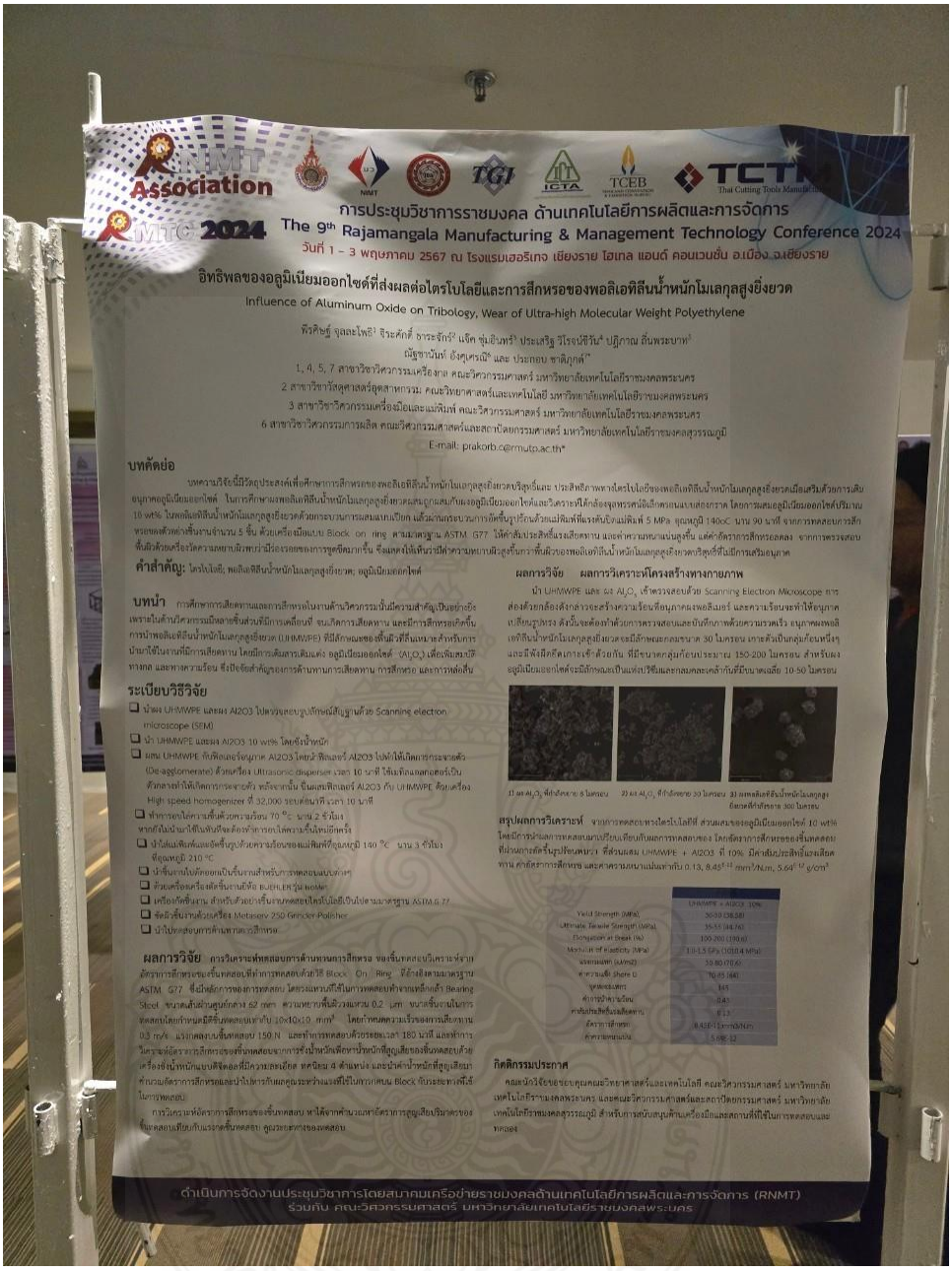
ภาพการนำเสนอเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ



รูปที่ ก-1 การนำเสนอบทความวิชาการ



รูปที่ ก-2 การนำเสนอบทความวิชาการ



รูปที่ ก-3 โปสเตอร์บทความในการนำเสนอ

ภาคผนวก ข

ใบรับรองผ่านการนำเสนอผลงานทางวิชาการ



รูปที่ ก-4 ใบประกาศนียบัตรบทความเรื่อง อิทธิพลอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อต่อสมบัติทางความร้อนและทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด



รูปที่ ก-4 ใบประกาศนียบัตรบทความเรื่อง อิทธิพลอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลไรโบโลยีและการสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

ภาคผนวก ค

บทความวิจัยที่นำเสนอเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอริเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

อิทธิพลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนและทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Influence of Aluminum Oxide on Thermal and Mechanical Properties of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene

พีรศิษฐ์ จุลละโพธิ[1] จิระศักดิ์ ธาระจักร์[2] แจ็ค ชุ่มอินทร์[3] ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน[4] ปฏิภาณ ลิ่นพระบาท[5]
ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี[6] และ ประกอบ ชาติภุกต์[7]*
[1, 4, 5, 7] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2] สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[3] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[5] สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

Peerasit Chullabodhi[1] Jirasak Tharajak[2] Jack Chumin[3] Prasert Wirotcheewan[4] Padipan Tinprabath[5]
Natchanun Angsuseranee[6] 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
[5] Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด ที่ได้รับการเติมแต่งด้วยอลูมิเนียมออกไซด์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ มีสมบัติต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม มาทำการเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ แต่เนื่องจากมีสมบัติบางประการที่ยังไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในงานทางวิศวกรรม จึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มสารเติมแต่ง บทความนี้ได้ทำการเลือกใช้อลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสัดส่วน 10 wt% มาผ่านกระบวนการผสมแบบเปียก ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อนในแม่พิมพ์ และทำการทดสอบสมบัติทางกลและทางความร้อน แล้วดำเนินการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ไม่มีการเติมแต่งสารใดๆ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสัดส่วน 10 wt% สามารถส่งผลให้ค่าความแข็ง Shore D ค่าความเค้นคราก ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าความต้านทานแรงกระแทก มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์ และมีค่าการนำความร้อนของคอมโพสิต UHMWPE/Al2O3 เพิ่มขึ้นจาก 0.33 เป็น 0.48 W/(mK)

คำสำคัญ: อลูมิเนียมออกไซด์; สมบัติทางความร้อน; สมบัติทางกล; พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอริเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

Abstract

The objective of this study was to investigate the properties of high-molecular-weight polyethylene (HMWPE) modified with aluminum oxide for engineering applications. Due to its low friction coefficient and excellent wear and corrosion resistance properties, HMWPE exhibits promising mechanical properties. It was comparatively analyzed against other types of polyethylene. However, because of certain inadequacies in engineering applications, it became imperative to incorporate additives. Aluminum oxide was selected at a weight ratio of 10 wt% and processed via wet blending followed by hot compression molding. Mechanical and thermal properties were subsequently evaluated in comparative analyses against unmodified HMWPE. Findings show that adding 10 weight percent aluminum oxide greatly improves the hardness (Shore D), tensile strength, impact resistance, and compressive strength of HMWPE compared to pure HMWPE. Moreover, the thermal conductivity of the UHMWPE/Al_2O_3 composite increased from 0.33 to 0.48 W/mK.

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

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบัน มนุษย์ได้มีความพยายามศึกษาค้นคว้าหาวิธีในการที่จะพัฒนาเทคโนโลยีให้มีความทันสมัยกว่าเดิมด้วยการพัฒนาวัสดุให้สามารถใช้งานได้หลากหลายเพิ่มมากขึ้น โดยสามารถพบได้จากผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) ถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ อาทิ เช่น เฟือง เกียร์ แบริ่ง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่าง ๆ เจริญยุทธ เดชวายุกุล [1] ได้มีการกล่าวไว้ว่า ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร และอุตสาหกรรมอาหาร ได้มีการนำ UHMWPE ไปใช้งานเป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหินหรือพื้นกระบะรถบรรทุกเป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะนำวัสดุต่างๆ ทั้งโลหะ อโลหะ ไม้ ยาง ฯ นำมาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ ให้กับพอลิเมอร์นั้นๆ เช่น สมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อนเป็นต้น ซึ่งเรียกว่าพอลิเมอร์ผสม ซึ่งการนำเอา UHMWPE ที่ทำการขึ้นรูปแล้วมาประยุกต์ใช้งาน ทางด้านวิศวกรรม เนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือ พลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi Crystalline) มีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่โดดเด่นตามที่กล่าวไปในข้างต้นนั้น S.M. Kurtz. [2] ให้คำนิยามไว้ว่า อลูมิน่า (Alumina) มีชื่อทางเคมีคือ อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide : Al_2O_3) มีรูปร่างโมเลกุลเป็นแบบทรงเหลี่ยมแปดหน้า (octahedral ; 6 coordinate) จัดเป็นออกไซด์ที่มนุษย์นั้นนำมาใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ดึกดำบรรพ์จนกระทั่งถึงปัจจุบันและยังคงมีการพัฒนาและถูกนำมาใช้งานมากขึ้น ซึ่งอลูมิเนียมออกไซด์มีความบริสุทธิ์ โดยมีความถ่วงจำเพาะ 3.4-4.0 จุดหลอมเหลว 2,030 องศาเซลเซียส ความแข็ง เท่ากับ 9 O. Hussain et al. [3] ได้มีการนำเสนอวัสดุผสมแบบไฮบริด UHMWPE/nano-Al_2O_3/Vitamin-C ที่เหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นกระดูกอ่อนเทียมในข้อต่อเทียม โดย Al_2O_3 จะถูกนำมาใช้เป็น สารเติมแต่งเพื่อต้านทานการสึกหรอใน UHMWPE ผลการวิจัยพบว่าเมื่อนำ Al_2O_3 ปริมาณ 2 wt% มาผสม จะมีประสิทธิภาพด้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุผสมอื่นๆ โดยสารเติมแต่งชนิด Al_2O_3 นี้จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิด UHMWPE

F.S. Senatov et al. [4] ได้มีการศึกษาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล ของโครงสร้างอนุภาค และความเข้ากันได้ของสารประกอบนาโนที่เกิดจากการผสมเชิงกลโดยใช้ผง UHMWPE และสารเติมแต่งหลาย

ชนิด โดยนำมาใส่ในเครื่องบดและผสมสาร แบบตั้งโต๊ะชนิด Planetary Ball Milling ผลการศึกษาพบว่า รูปร่างอนุภาค และความเข้มข้นของ Al_2O_3 ต่อคุณสมบัติของคอมโพสิต แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมทริกซ์โพลีเอทิลีนด้วยอลูมินาที่กระตุ้นด้วยกลไกในรูปของผงนาโนหรือไมโครสเฟียร์ โดยการเสริมโพลีเมอร์ด้วยอนุภาคนาโนนั้นจะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอได้เป็นอย่างมาก และไม่พบสัญญาณของการสะสมไฟบรินในซีรั่มในเลือดบนพื้นผิวของตัวอย่าง นอกจากนี้แล้วยังไม่พบสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิวิทยาทางสรีรวิทยาในสัตว์ที่ฝังตัวอย่างไว้ ที่ได้มีการกระตุ้นเชิงกลการกดร้อนและเติมอนุภาคเซรามิก โดยสามารถใช้เป็นวัสดุที่สามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพเพื่อนำมาทดแทนกระดูกอ่อน J.J. Wu et al. [5] ได้ทำการศึกษาความสมบูรณ์ของการอัดขึ้นรูปของผง UHMWPE บริสุทธิ์เกรด 1900 H ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 145-200 องศาเซลเซียส เวลาคงอุณหภูมิที่ 10-90 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่ออัตราการยืดตัวและปริมาณความเป็นผลึกของวัสดุพอลิเมอร์ M.Z. Ronga et al. [6] ได้ทำการศึกษาอีพ็อกซี่ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่อนุภาคขนาด 3.8 นาโนเมตร จากการวิจัยพบว่าปริมาณการผสม Al_2O_3 ที่ปริมาณ 1.6 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุดโดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ 8 x 10^{-5} mm^3/Nm ทดสอบโดยการวิเคราะห์จุดหลอมเหลว ค่าความร้อนจำเพาะ การเปลี่ยนสถานะ และสภาวะการเป็นผลึก ทำการทดสอบโดยใช้แรงที่ใช้ในการทดสอบ 1 MPa ความเร็วเสียดทานเท่ากับ 1 m/s โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุคู่ผสมที่ใช้ในการทดสอบการต้านทานการสึกหรอ W. Wood and W.-H. Zhong [7] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอและความเข้ากันได้ของโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงกับเส้นใยนาโนคาร์บอนโดยใช้สารประกอบอินทรีย์ไซลีน โดยทำการการทดสอบไตรโบโลยีแบบ Pin on disk ภายใต้สภาวะที่มีการหล่อลื่น ผลการทดสอบพบว่า สารที่เติมมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพนั้น สามารถลดอัตราการสึกหรอได้ และทนความร้อนได้ดี ที่เกิดจากความร้อนของแรงเสียดทาน อีกยังมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สามารถนำมาเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการใช้งาน สำหรับงานด้านชีวการแพทย์ได้ งามพรรณ ชะโล และ ประกอบ ชาติภุกต์ [8] ได้ทดสอบสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นส่วนผสมหลักผสมกับอลูมิเนียมออกไซด์ ในการผลิตล้อรันแฟลท และให้ทราบถึงสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมภายใต้กระบวนการขึ้นรูปล้อรันแฟลท วัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและมีสารเติมแต่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ก้อนวัสดุสำหรับการทดลองประกอบด้วย แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิ เวลา รวมถึงสัดส่วนระหว่างโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับอลูมิเนียมออกไซด์ การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 type I การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลที่ได้คือ สภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส 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 มีค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 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 วิโรจน์ ฉัตรเกษ [9] ทำการทดลองทดสอบการหาสภาวะอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาคงอุณหภูมิ ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปร้อนผงพอลิเมอร์ UHMWPE และศึกษาอิทธิพลตัวแปรการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ UHMWPE วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ ผงพอลิเมอร์ UHMWPE บริสุทธิ์ ผงวัสดุถูกนำมาทำการอัดขึ้นรูปร้อนให้

เป็นแผ่นขนาดกว้าง 160 มม. ยาว 80 มม. และหนา 10 มม. ตัวแปรการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 - 210 องศาเซลเซียส แรงดัน 5 - 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 - 90 นาที และนำวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูป มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมี จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ จากการทดสอบพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดขึ้นรูปร้อนวัสดุ UHMWPE คือต้องใช้อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส แรงดัน 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที วัสดุที่จากการขึ้นรูปจะมีอัตราการยืดตัวสูงสุด 460.49 % และอัตราการสึกหรอต่ำสุด 6.62×10^{-8} mm^3/Nm

ดังนั้นบทความนี้จึงพิจารณาสารเติมแต่งที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ โดยคาดว่าจะส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้และเป็นทางเลือกของวัสดุวิศวกรรมคอมโพสิตแบบหนึ่ง

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการวิจัย

- เครื่องผสมสารแบบตัววี ตัวเครื่องทำจากแสตนเลส ใช้สำหรับการผสมพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเข้ากับผงอลูมิเนียมออกไซด์ เป็นการดำเนินงานด้วยการผสมแบบแห้ง
- เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X Plus ด้วย Load cell ขนาด 1 กิโลนิวตัน
- เครื่องตัดชิ้นงานความเร็วสูง
- เครื่องทดสอบแรงกระแทกสำหรับพอลิเมอร์ยี่ห้อ GOTECH testing Machines InC. โมเดล GT-7045-HML
- เครื่องขัดเตรียมผิวชิ้นงานจานคู่ Metaserv 250 สามารถปรับความเร็วรอบที่ปรับได้ตั้งแต่ 50–500 รอบต่อนาที
- เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu รุ่น ATX224R ชั่งวัสดุแบบชั่งจากด้านบน ชนิดอ่านละเอียดแสดงผลเป็นตัวเลข ความละเอียดในการอ่านได้ 0.0001 กรัม ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 220 กรัม จานขนาดกว้างxยาวเท่ากับ 180×180 มิลลิเมตร ได้รับมาตรฐาน: ISO 9001
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดตั้งโต๊ะพร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุ (FESEM with EDS) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Phenom Pharos ประสิทธิภาพสูง มีกำลังขยายสูงสุด 1,000,000 เท่า
- ตู้อบความร้อน ปรับอุณหภูมิได้ถึง 300 องศาเซลเซียส ตั้งเวลาการทำงานได้
- เครื่องอัดเบ้าพอลิเมอร์ อัดเบ้าขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยไฮดรอลิค ควบคุมด้วยระบบไฟฟ้า แรงดันการอัดสูงสุด 55 ตัน สามารถทำความร้อนสูงสุดได้ 400 องศาเซลเซียส แท่นอัดเบ้า 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 สามารถอัดชิ้นงานให้มีความหนาในช่วง 5-30 มิลลิเมตร
- เครื่อง DSC ยี่ห้อ รุ่น ใช้วัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบ กับสารมาตรฐาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยน สถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น
- เครื่องมือสำหรับ Thermal conductivity analysis instruments ใช้เพื่อวัดค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity)

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

2.2.1 นำผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) และผงอลูมิเนียมออกไซด์ไปตรวจสอบรูปลักษณ์สัญฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.2.2 ชั่งพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และผงอลูมิเนียมออกไซด์ 10 wt% โดยชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu

2.2.3 ทำการผสม UHMWPE กับฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 โดยเริ่มจากการการนำฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 ไปทำให้เกิดการกระจายตัว (De-agglomerate) ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อป้องกัน

และแยกฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 ไม่ให้จับตัวเป็นกลุ่มก้อน โดยใช้เมทิลแอลกอฮอร์เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการกระจายตัว หลังจากนั้นจึงทำการปั่นผสมฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 รวมกับ UHMWPE ด้วยเครื่อง High speed homogenizer ด้วยความเร็วรอบ 32,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้เมทิลแอลกอฮอร์เป็นตัวกลางช่วยในการปั่นผสม เนื่องจากผง UHMWPE มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเมทิลแอลกอฮอร์ส่งผลให้ UHMWPE สามารถจมลงในเมทิลแอลกอฮอร์ได้ และนอกจากนี้เมทิลแอลกอฮอร์ยังสามารถกำจัดออกได้ง่ายจากระเหยออกได้ตามธรรมชาติ

2.2.4 ทำการอบไล่ความชื้นสำหรับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และผงอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยความร้อน 70 °C นาน 2 ชั่วโมง

2.2.5 หากยังไม่นำมาใช้ในทันทีจะต้องทำการอบไล่ความชื้นใหม่อีกครั้ง

2.2.6 นำใส่แม่พิมพ์และอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนของแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 140 °C นาน 3 ชั่วโมง ทั้งนี้จะต้องตั้งอุณหภูมิของฮีตเตอร์ไว้ที่ 210 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดการสูญเสียความร้อน และทำให้ภายในแม่พิมพ์มีอุณหภูมิถึง 148 องศาเซลเซียส เพียงพอที่จะทำการหลอม UHMWPE

2.2.7 นำชิ้นงานที่ถอดออกจากแม่พิมพ์ไปตัดออกเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบต่างๆ ด้วยเครื่องเครื่องตัดชิ้นงานยี่ห้อ BUEHLER รุ่น IsoMet และเครื่องกัดชิ้นงาน สำหรับตัวอย่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 มีขนาดดังรูปที่ 1 และชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามรูปที่ 2

2.2.8 ขัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง MetaServ 250 Grinder-Polisher & Vector LC 250 Power Heads

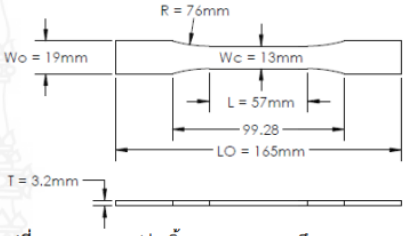
2.2.9 ทดสอบหาค่าความต้านทานแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AG-X Plus

2.2.10 ทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งพอลิเมอร์ Shore D สเกล Shore D

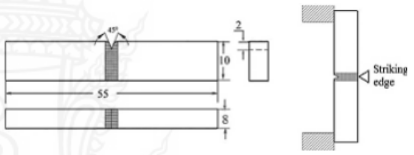
2.2.11 ทดสอบค่าความต้านทานแรงกระแทกด้วยเครื่อง GOTECH testing Machines InC. โมเดล GT-7045-HML

2.2.12 ใช้เครื่อง DSC วัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบ กับสารมาตรฐาน เพื่อหาจุดหลอมเหลว

2.2.13 ใช้เครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบให้พลังงานด้วยแสง ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น LFA467 HT สำหรับ UHMWPE + Al_2O_3



รูปที่ 1 ขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 [10]

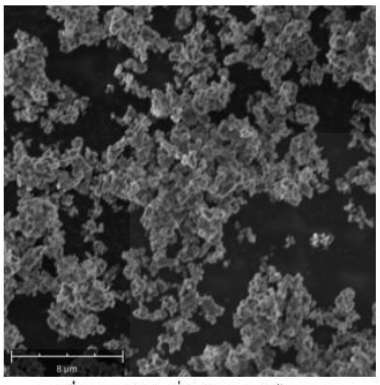


รูปที่ 2 ขนาดและรูปร่างชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM E23 [11]

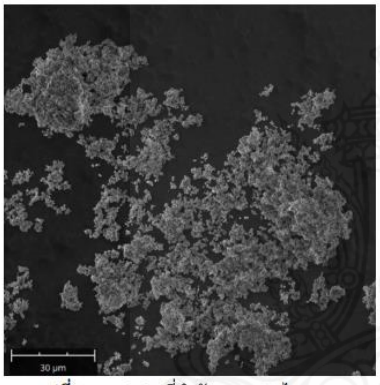
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ

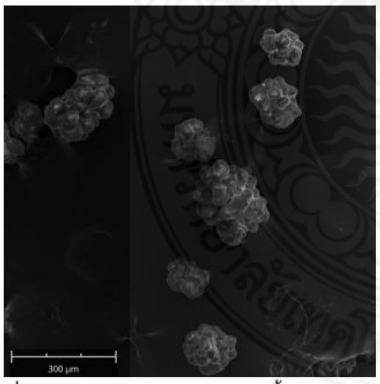
จากการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และผงอลูมิเนียมออกไซด์เข้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ผลดังรูปที่ 3-4 การส่องด้วยกล้องดังกล่าวจะสร้างความร้อนที่อนุภาคผงพอลิเมอร์ และความร้อนจะทำให้อนุภาคเปลี่ยนรูปทรง ดังนั้นจะต้องทำด้วยการตรวจสอบและบันทึกภาพด้วยความรวดเร็ว อนุภาคผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดจะมีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆ และมีพังผืดยึดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มีขนาดกลุ่มก้อนประมาณ 150-200 ไมครอน สำหรับผงอลูมิเนียมออกไซด์จะมีลักษณะเป็นแท่งปริซึมและกลมคละเคล้ากันที่มีขนาดเฉลี่ย 10-50 ไมครอน



รูปที่ 3 ผง Al_2O_3 ที่กำลังขยาย 8 ไมครอน



รูปที่ 4 ผง Al_2O_3 ที่กำลังขยาย 30 ไมครอน



รูปที่ 5 รูปร่างสัณฐานของผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่กำลังขยาย 300 ไมครอน

3.2 ผลการทดสอบค่าความแข็ง

จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็ง Durometer ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2240 (JIS K 7215 D, ISO R 868 D) ผลการทดสอบชิ้นงานจำนวน 5 ชิ้นทดสอบให้ค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 65 Shore D เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ไม่มีการผสมสารเติมแต่งใด ๆ ลงไปจะมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ที่ 64 Shore D

3.3 ผลการทดสอบค่าแรงดึง

ผลจากการทดสอบแรงดึงจำนวนชิ้นงานตัวอย่างรวม 5 ชิ้นที่ส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดและผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10 wt% และเฉลี่ยค่าออกมาจะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of Elasticity (MPa) มีค่าเท่ากับ 38.58 MPa, 44.76 MPa, 190.6%, 1010.4 MPa ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ไม่มีการผสมสารเติมแต่งใด ๆ ลงไปจะมีค่า Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of Elasticity (MPa) เท่ากับ 19.22 MPa, 23.88 MPa, 240.5% และ 640.6 MPa ตามลำดับ

3.4 ผลการทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก มีขนาดชิ้นงานทดสอบความกว้างxความหนา โดยประมาณเท่ากับ 2.5x10 มิลลิเมตร มีความลึกของรอยบาก 2 มิลลิเมตร ในกรณีพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 10 wt% ได้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเท่ากับ 70.6 kJ/m^2 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ไม่มีการผสมสารเติมแต่งใด ๆ ลงไปจะมีค่าความทนต่อแรงกระแทกเท่ากับ 84.6 kJ/m^2

3.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากการทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าการนำความร้อนแบบให้พลังงานด้วยแสง ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น LFA467 HT สำหรับ UHMWPE recycle ได้ค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.45 W/mK และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 145 °C พบว่าจุด

หลอมเหลวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ HUMWPE บริสุทธิ์ ที่ 148 °C และมีค่าการนำความร้อนสูงขึ้นอันเนื่องมาจากหารผสมอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่า UHMWPE

4. อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพทำให้เห็นรูปลักษณ์สันฐานของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดและผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมกันแบบเปียกจะช่วยให้เกิดการแทรกซึมและกระจายตัวได้ดี ในช่วงของการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนนั้น ผลการขึ้นรูปแสดงให้เห็นว่าจะมีความร้อนสูญเสียจากแม่พิมพ์ออกไปภายนอกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้วัสดุภายในแม่พิมพ์ไม่หลอมเหลว การตั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ซึ่งจะต้องตั้งให้อุณหภูมิของตัวกดด้านบนอยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ฐานรากของแม่พิมพ์อยู่ที่ 200 องศาเซลซียส จึงส่งผลให้ความร้อนสามารถกระจายเข้าไปยังวัสดุที่อยู่ภายในทั้งนี้ยังใช้เวลาในการบ่มความร้อนให้หลอมเหลวนานถึง 3 ชั่วโมง ผลการทดสอบค่าความแข็งพบว่าในแต่ละตำแหน่งที่กดทดสอบอาจจะมีความแตกต่างที่ไม่มีนัยยะสำคัญระหว่างชิ้นงานที่ทำจากพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ สำหรับค่าการทดสอบแรงดึงนั้นพบว่าการผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์เข้ากับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการผสมนั้นพบว่า การผสมอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปจะส่งผลให้ Yield Strength, Ultimate Tensile Strength และ Modulus of Elasticity สูงขึ้น ในขณะที่ Elongation at Break และค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อผสมอลูมิเนียมออกไซด์ลงไป และค่าความต้านทานแรงกระแทกจะลดลงหากมีการผสมสัดส่วนผงอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มลงไป

5. สรุป

ผลการทดสอบของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมผงอลูมิเนียมออกไซด์ 10 wt% นั้นจะส่งผลให้สมบัติทางกลมีค่าเพิ่มขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมได้ในบางกรณี ทั้งนี้ ต้องให้ความสำคัญกับกระบวนการผสมสารทั้งสองเข้าด้วยกัน ให้สามารถสอดแทรกและกระจายอนุภาคผงได้ทั่ว รวมทั้งกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนที่จะส่งผลให้สมบัติทางกลจากการทดสอบในแต่ละสมบัติอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สำหรับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบและทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] เจริญยุทธ เดชวายุกุล, วิริยะ ทองเรือง, พิษณุ บุญนวล และ วรวุธ วิสุทธิ์เมธางกูล, "พัฒนาล้อยางเสริมชั้นโฟมยาง," รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, 2552.

[2] S.M. Kurtz, "UHMWPE Biomaterials Handbook," 2 nd., Elsevier Ins., China, 2009.

[3] O. Hussain, B. Ahmad and S. Saleem, "Tribological performance of biomedical grade UHMWPE/nano-Al_2O_3/Vitamin-C hybrid composite for cartilage replacements," *Mater. Lett.*, vol. 291, pp. 129-515, May 2021.

[4] F. S. Senatov et al., "Biocompatible polymer composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene perspective for cartilage defects replacement," *J. Alloys Compd.*, vol. 586, pp. S544–S547, Feb. 2014.

[5] J. J. Wu, C. P. Buckley, J. J. O'Connor, "Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions," *Biomaterials*, pp. 3773-3783. 2002.

[6] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, G. Shi, Q. L. Ji, B. Wetzel, and K. Friedrich, "Graft polymerization onto inorganic nanoparticles and its effect on tribological performance improvement of polymer composites," *Tribol. Int.*, vol. 36, no. 9, pp. 697–707, Sep. 2003.

[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] Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk, "Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al_2O_3 for Application in Engineering," *RMUTP Research Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 192-202, Jan.-Jun. 2022.

[9] Wirot Chudget, "An influence of process parameters on mechanincal properties and wear resistance in hot compression molding process for UHMWPE", M. Eng Thesis, 2014 Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Faculty of Engineering, Department of Production Engineering.

[10] M. Sauer, "Evaluation of the Mechanical Properties of 3D Printed Carbon Fiber Composites," May 2018.

[11] R. I. Badiger, S. Narendranath and M. S. Srinath, "Microstructure and mechanical properties of Inconel-625 welded joint developed through microwave hybrid heating," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 232, no. 14, pp. 2462–2477, Dec. 2018.

RMTC2024
การประชุมวิชาการราชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 9
1-3 พฤษภาคม 2567 ณ โรงแรม เฮอริเทจ เชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

อิทธิพลของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ส่งผลต่อไตรโบโลยีและการสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Influence of Aluminum Oxide on Tribology, Wear of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene

พีรศิษฐ์ จุลละโพธิ[1] จิระศักดิ์ ธาระจักร์[2] แจ็ค ชุ่มอินทร์[3] ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน[4] ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท[5]
ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี[6] และ ประกอบ ชาติภุกต์[7]*
[1, 4, 5, 7] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2] สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[3] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องมือและแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[6] สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: prakorb.c@rmutp.ac.th*

Peerasit Chullabodhi[1] Jirasak Tharajak[2] Jack Chumin[3] Prasert Wirotcheewan[4] Padipan Tinprabath[5]
Natchanun Angsuseranee[6] 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] 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

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ได้รับการเติมแต่งด้วยอลูมิเนียมออกไซด์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ มีสมบัติต้านทานการสึกหรอและการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ แต่เนื่องสมบัติบางประการที่ยังไม่เหมาะสมต่อการใช้งานทางวิศวกรรมจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มสารเติมแต่ง บทความนี้เลือกใช้อลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสัดส่วน 10 wt% ผ่านกระบวนการผสมแบบเปียก ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อนในแม่พิมพ์และทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ความแข็ง, อัตราการสึกหรอ และปริมาณการสึกหรอของคอมโพสิตสังเคราะห์โพลิเมอร์ ที่ได้รับการทดสอบโดย Durometer และ Tribometer มาตราส่วน D ดำเนินการเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ไม่มีการเติมแต่งสารใดๆ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยสัดส่วน 10 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็ง Shore D ค่าความเค้นคราก ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ค่าความต้านทานแรงกระแทก ค่าไตรโบโลยี มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับไตรโบโลยีและการสึกหรอของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดบริสุทธิ์

คำสำคัญ: อลูมิเนียมออกไซด์; ไตรโบโลยี; พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Abstract

This is an instruction for abstract preparation for the IE Network Conference. Please follow this guideline strictly as it would appear in the proceeding without retouching. For Thai article, an abstract in English must accompany the Thai version. It should contain a single paragraph and its length should not exceed 25 lines. It should include a concise statement of objectives and a summary of important results.

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

1. บทนำ

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) S.M. Kurtz [1] เป็นวัสดุรองพื้นที่ใช้กันมากที่สุดในการผ่าตัดเปลี่ยนข้อสะโพกและข้อเข่า เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อการสึกหรอที่ดีเยี่ยมกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา งานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงสมรรถนะให้ดียิ่งขึ้น เพื่อให้ได้อุปกรณ์ปลูกถ่ายที่ทนทานสำหรับผู้ป่วยในกลุ่มวัยรุ่นและผู้สูงอายุ พอลิเอทิลีน ที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยรังสีแกมมา ไปจนถึงพอลิเอทิลีนเชื่อมโยงสายโซ่ทั้งรุ่นแรกและรุ่นที่สอง ที่ได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของ UHMWPE โดยเน้นไปที่การสึกหรอทั้งในระบบการทดสอบ และกับร่างกาย ผ่านการวิเคราะห์งานวิจัยที่มีอยู่ V.S. Aher. et al. [2] ได้มีกล่าวไว้ว่า มีการใช้โพลีเมอร์และโพลิเมอร์คอมโพสิตมากขึ้นในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอวกาศ, ดาราศาสตร์ และอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้ให้ความแข็งแกร่งสูงต่ออัตราส่วนน้ำหนัก โดยในงานวิจัยนี้ศึกษา เพื่อตรวจสอบผลกระทบของพื้นผิวสัมผัสกับประสิทธิภาพทางไตรโบโลยีของวัสดุ UHMWPE และ คอมโพสิต เมื่อพิจารณาถึงสภาพการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่สภาวะแห้งและสภาวะต่าง ๆ ที่แตกต่างกันโดยโหลดที่เลือกนั้นจะเป็น 181.42 N, 171.61 N, และ 156.9 N ที่ความเร็วการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่แตกต่างกัน 0.12 m/s, 0.105 m/s และ 0.09m/s. ในการทำงานนี้ใช้ ดิสก์สแตนเลส 304 และแผ่นดิสก์ที่มีรูปแบบพื้นผิวสามเหลี่ยมถูกนำมาใช้สำหรับการทดลองผลของความแตกต่างของพื้นผิวสัมผัสนั้นอยู่ที่ 0%, 10%, 20% และการวางแนวในรูปแบบของพื้นผิวได้รับการทดสอบเครื่องทดสอบแบบของ pin-on-disc (TRLE-PHM400). สังเกตได้ว่าการสึกหรอที่เฉพาะเจาะจงอย่างน้อยสำหรับ UHMWPE 2% สำหรับความหนาแน่น 10% ด้วยทิศทางพื้นผิวของ bases ที่มีการออกแบบพื้นผิว H.S. Vadivel et al. [3] ได้กล่าวว่า UHMWPE นั้นมีประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมเมื่อถูกนำมาใช้งานสำหรับวัสดุที่มีพื้นผิวสัมผัสในการสัมผัสแบบไทรโบโลยี โดยทั่วไปแล้ว UHMWPE ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุล เท่านั้นที่ถือว่าเหมาะสมกับการใช้งานดังกล่าว ซึ่งเกรดของ UHMWPE ที่มีจำหน่ายแตกต่างกันไปตามขนาดของอนุภาค และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล ขนาดอนุภาคของ UHMWPE จะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและคุณสมบัติที่ทำให้เกิดช่องว่าง โดยการวิจัยนี้จะศึกษาผลของการวิเคราะห์วัสดุ UHMWPE โดยจะสังเกตว่าแม้จะสังเกตเห็นความแตกต่างเพียงเล็กน้อยในคุณสมบัติของต่างๆ ของ UHMWPE นั้นยังไม่เพียงพอที่จะสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคนั้น จะส่งผลต่อคุณสมบัติและประสิทธิภาพของวัสดุ O. Hussain et al. [4] ได้นำเสนอวัสดุผสมแบบไฮบริดระหว่าง UHMWPE/nano-Al_2O_3/Vitamin-C ที่เหมาะสำหรับการนำไปใช้เป็นกระดูกอ่อนเทียมในข้อต่อเทียมโดยที่ Al_2O_3 นั้นได้ถูกนำมาใช้เป็น สารเติมแต่งเพื่อต้านทานการสึกหรอเมื่อผสมกับ UHMWPE พบว่าที่ Al_2O_3 ปริมาณ 2 wt% จะมีประสิทธิภาพการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าวัสดุผสมอื่นๆ จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการปรับปรุง

สมบัติเชิงหน้าที่ของพอลิเมอร์คอมโพสิต UHMWPE

F.S. Senatov et al. [5] มีการวิจัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคุณสมบัติเชิงกล โครงสร้างจุลภาค และความเข้ากันได้ทางชีวภาพของสารประกอบนาโนที่ได้จากการกระตุ้นเชิงกลของผง UHMWPE และตัวเติมอนุภาคหลายประเภท Planetary ศึกษาผลของรูปร่างอนุภาคและความเข้มข้นของ Al_2O_3 ต่อคุณสมบัติของคอมโพสิต แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการเสริมแรงเมทริกซ์โพลีเอทิลีนด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ ที่ผสมในรูปของผงนาโนหรือไมโครสเฟียร์ การเสริมโพลีเมอร์ด้วยอนุภาคนาโนจะช่วยเพิ่มความต้านทานการสึกหรอได้เป็นอย่างมาก การทดสอบพบว่าไม่พบสัญญาณของการสะสมไฟบรินในซีรั่มในเลือดบนพื้นผิวของตัวอย่าง นอกจากนี้ยังไม่พบสัญญาณของการเปลี่ยนแปลงทางพยาธิวิทยาทางสรีรวิทยาหรือกายวิภาคศาสตร์ในสัตว์ที่ฝังในตัวอย่างไว้ ที่ได้จากการกระตุ้นเชิงกลและการกดร้อนและการเติมอนุภาคเซรามิก จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุที่เข้ากันได้ทางชีวภาพเพื่อทดแทนกระดูกอ่อน Syed Zameer [6] เนื่องจากข้อจำกัดของวัสดุชีวภาพที่เป็นโลหะทั่วไป จึงมีความพยายามในการพัฒนาคอมโพสิตเมทริกซ์โพลีเมอร์ไฮบริดรูปแบบใหม่สำหรับการใช้งานรับน้ำหนักของข้อต่อสะโพกในร่างกายมนุษย์. วัสดุโพลีเอทิลีนเมทริกซ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ โดยผสม 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเส้นใยแก้ว ชนิด E และอนุภาค TiO_2 ที่มีเปอร์เซ็นต์การเสริมแรงต่างกันโดยใช้การเครื่องฉีดอัดชิ้นงานคอมโพสิตที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น ได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง ความล้าการทดสอบ, SEM, การทดสอบการวิเคราะห์การสึกหรอ และการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับสิ่งมีชีวิต เพื่อประเมินกลไกและคุณสมบัติทางไตรโบโลยี ซึ่งจำเป็นสำหรับการนำมาใช้งานกับการรับน้ำหนักของข้อต่อกระดูก โดยแรงดึงสูงสุดได้รับนั้นจะอยู่ที่ 41.5 MPa และโมดูลัสเท่ากับ 7.5 GPa พฤติกรรมของเส้นโค้ง S-N ที่ได้รับหลังจากการทดสอบ มีลักษณะเป็นเส้นตรง นอกจากนี้ยังเผยให้เห็นว่าการแตกหักเกิดจากการแตกหักแบบเปราะ การสึกหรอของชิ้นงานคอมโพสิตเกิดจากการเสียดาน ความหนาแน่นของชิ้นงาน เพิ่มขึ้นหลังจากจุ่มลงในสารละลายของเหลวในร่างกายจำลอง D. Xiong et al. [7] พฤติกรรมการเสียดทานและการสึกหรอของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) ที่เสียดสีกับเซรามิก Al_2O_3 ภายใต้การเสียดสีแบบเลื่อนในสภาวะแห้งและสภาวะการหล่อลื่นของพลาสมาสด น้ำกลั่น และน้ำเกลือดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องมือไตรโบโลยีแบบ Pin on Disk ที่ผลิตขึ้นเองที่อุณหภูมิ 37 ± 1°C มีการตรวจสอบพื้นผิวที่มีการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการวิจัยพบว่าพฤติกรรมการเสียดทานของ UHMWPE มีความไวต่อสถานะการดูดซึมน้ำมาก อัตราการสึกหรอของ UHMWPE ภายใต้การเสียดทานแบบเลื่อนในสภาวะแห้งจะสูงที่สุดและอยู่ในพลาสมา การหล่อลื่นต่ำที่สุด กลไกการสึกหรอจะแตกต่างกันไปภายใต้แรงเสียดทานสภาวะแห้งและสภาวะการหล่อลื่นต่างๆ J.J. Wu et al. [8] ได้ทำการศึกษาความสมบูรณ์ของการอัดขึ้นรูปผง UHMWPE บริสุทธิ์เกรด 1900 H ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 145-200 องศาเซลเซียส เวลาคงอุณหภูมิที่ 10-90 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิหลอมละลายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่ออัตราการยืดตัวและปริมาณความเป็นผลึกของวัสดุพอลิเมอร์ Min ZhiRonga [9] ได้ทำการศึกษาอีพ็อกซี่โดยการผสมอลูมิน่าออกไซด์ที่อนุภาคขนาด 3.8 นาโนเมตร จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณการผสม Al_2O_3 ที่ปริมาณ 1.6 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุดโดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ 8 x 10-6 mm^3/Nm โดยทำการทดสอบและวิเคราะห์จุดหลอมเหลว ความร้อนเพาะ การเปลี่ยนสถานะ และสภาวะเป็นผลึก ทำการทดสอบโดยวิธีการทดสอบความเสียดทานด้วยวิธี Ring on Disc แรงที่ใช้ในการทดสอบ 1 MPa ความเร็วเสียดทานเท่ากับ 1 m/s โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุคู่ผสมที่ใช้ในการเสียดสี

งามพรรณ ชะโล [10] ได้ทดสอบสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นส่วนผสมหลักผสมกับอลูมิเนียมออกไซด์ ในการผลิตล้อรันแฟลท และให้ทราบสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมภายใต้กระบวนการขึ้นรูปล้อรันแฟลท วัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและมีสารเติมแต่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตัวแปรที่

ออกเป็นชิ้นงานสำหรับการทดสอบแบบต่างๆ ด้วยเครื่องเครื่องตัดชิ้นงานยี่ห้อ BUEHLER รุ่น IsoMet และเครื่องกัดชิ้นงาน ด้วยเครื่องเครื่องตัดชิ้นงานยี่ห้อ BUEHLER รุ่น IsoMet

2.2.7เครื่องกัดชิ้นงาน สำหรับตัวอย่างชิ้นงานทดสอบไตรโบโลยีเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM G 77

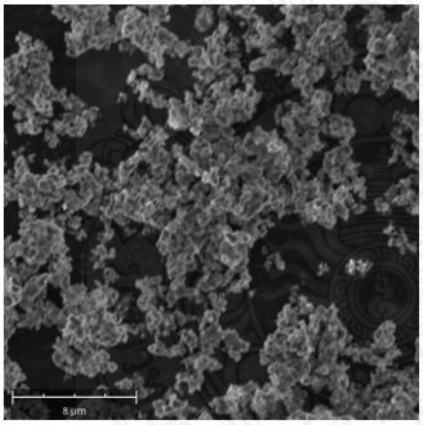
2.2.8ขัดผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Metaserv 250 Grinder-Polisher

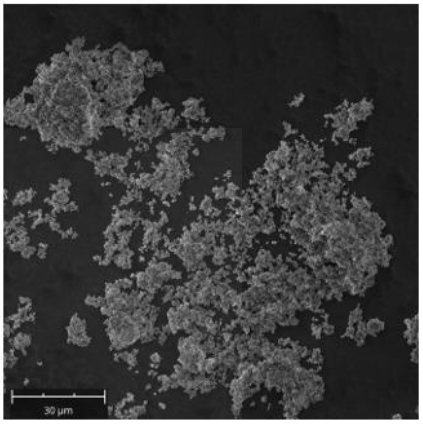
2.2.9 นำไปทดสอบการต้านทานการสึกหรอ

3. ผลการวิจัย

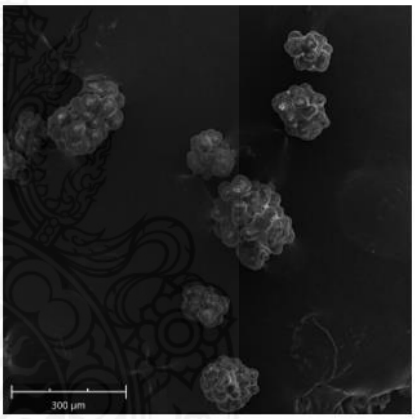
3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพ

จากการนำพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด และผงอลูมิเนียมออกไซด์เข้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ผลดังรูปที่ 3-4 อนุภาคผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดจะมีลักษณะกลมขนาด 30 ไมครอน เกาะตัวเป็นกลุ่มก้อนหนึ่งๆ และมีพังผืดยึดเกาะเข้าด้วยกัน ที่มีขนาดกลุ่มก้อนขนาดประมาณ 150-200 ไมครอน สำหรับผงอลูมิเนียมออกไซด์จะมีลักษณะเป็นแท่งปริซึมและกลมคละเคล้ากันที่มีขนาดเฉลี่ย 10-50 ไมครอน





รูปที่ 3 รูปร่างสัณฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่กำลังขยาย 8 และ 30 ไมครอน



รูปที่ 4 รูปร่างสัณฐานของผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่กำลังขยาย 300 ไมครอน

3.3 ผลการไตรโบโลยีและการสึกหรอ

ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นของ UHMWPE+อลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น 2.5, 5, 7.5 และ 10 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นไม่มากนักหรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.698514 g/cm3 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์

แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.13 และจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอต่ำโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 8.45E-11mm3/N.m

4. อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพทำให้เห็นรูปลักษณ์สันฐานของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดและผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมกันด้วยวิธีผสมแบบเปียกที่มีตัวกลางเป็นเอทิลแอลกอฮอล์เพื่อการผสมที่เข้ากันได้ดี และนำไปอบให้แห้งสนิทเพื่อไล่ความชื้น และในช่วงของการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนนั้น ผลการขึ้นรูป ความร้อนจะสูญเสียจากแม่พิมพ์ออกไปภายนอกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้วัสดุภายในแม่พิมพ์ไม่หลอมเหลว การตั้งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ซึ่งจะต้องตั้งให้อุณหภูมิของตัวกดด้านบนอยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ฐานรากของแม่พิมพ์อยู่ที่ 200 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้ความร้อนสามารถกระจายเข้าไปยังวัสดุที่อยู่ภายในทั้งนี้ยังใช้เวลาในการบ่มความร้อนให้หลอมเหลวนานถึง 3 ชั่วโมง ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหนาแน่นของ UHMWPE+อลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น 5, 7.5 และ 10 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นไม่มากนักหรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการสึกหรอต่ำลง

5. สรุป

ผลกาทดสอบของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดที่ผสมผงอลูมิเนียมพบว่าชิ้นงานทดสอบที่มีการเติมผงอลูมิเนียมออกไซด์ทำให้มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าชิ้นทดสอบตัวควบคุมที่ไม่มีการเติมและมีค่าความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงขึ้นเมื่อทำการตรวจสอบร่องรอยการสึกหรอพบว่ามีค่าความหยาบผิวสูงขึ้นอันเนื่องมาจากอนุภาคผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผสมลงไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สำหรับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบและทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S.M. Kurtz, “The origin of UHMWPE in Total HIP Arthroplasty” UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition) 2016., Pages 33-44

[2] V.S. Aher “An experimental investigation on tribological performance of UHMWPE composite under textured dry sliding conditions” Jurnal Tribologi 24.,2020 110-125

[3] H.S. Vadivel et al, “Do the particle size, molecular weight, and processing of UHMWPE affect its thermomechanical and tribological performance?” Elsevier, Journal of Materials Research and Technology 2021;12 pages 1728-1737

[4] O. Hussain, B. Ahmad and S. Saleem, “Tribological performance of biomedical grade UHMWPE/nano-Al2 O3 / Vitamin-C hybrid composite for cartilage replacements,” Mater. Lett., vol. 291, p. 129-515, May 2021.

[5] F. S. Senatov et al., “Biocompatible polymer composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene perspective for cartilage defects replacement,” J. Alloys Compd., vol. 586, pp. S544–S547, Feb. 2014

[6] Syed Zameer et al, “Mechanical and Tribological Behavior of Bio Polymer Matrix Composites for Biomedical Prosthesis

Applications", Advanced Materials Research Vol.1105, 2015, pp 7-12

[7] D.S. Xiong, "Friction and wear properties of UHMWPE/Al2O3 ceramic under different lubricating conditions", Elsevier, Wear 250, 2001 pages 242-245

[8] J.J. Wu, C.P. Buckley, J.JO. 'Connor, Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions, Biomaterials, 2002, Pages 3773-3783.

[9] Min ZhiRonga, Ming QiuZhanga, GuangShia, Qiu LongJia, BerndWetzelc, KlausFriedrichc, Graft polymerization onto inorganic nanoparticles and its effect on tribological performance improvement of polymer composites, Tribology International, 2003, Pages 697-707

[10] งามพรรณ ชะโล,ประกอบ ชาติภุกต์ , "สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบด้วยอลูมิเนี่ยมออกไซด์สำหรับใช้ในงานวิศวกรรม",วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 16 ฉบับที่1 ,มกราคม-มิถุนายน 2565, หน้า 192-202.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล จ่าเอกพีรศิษฐ์ จุลละโพธิ
วัน เดือน ปีเกิด 1 เมษายน 2536
ภูมิลำเนา 62/149 ถ.พหลโยธิน แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	**ชื่อสถาบัน**	**ปีที่สำเร็จการศึกษา**
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย สระบุรี	2552
ระดับประกาศนียบัตร(ปวช.)	โรงเรียนช่างฝีมือทหาร	2555
ระดับปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์	2559

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน
ตำแหน่งวิศวกรระบบ และผู้จัดการโครงการ บริษัท ทูเดย์ สปรินท์ จำกัด กรุงเทพมหานคร