



การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบ
สำหรับล้อ Run-flat

A Study of Mechanical Properties of UHMWPE Composite for Run-flat

งามพรรณ ชะโล
Ngampan Chalo

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564



การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบ
สำหรับล้อ Run-flat

A Study of Mechanical Properties of UHMWPE Composite for Run-flat

งามพรรณ ชะโล
Ngampan Chalo

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอทีลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เชิงประกอบสำหรับล้อ Run-flat
ชื่อ นามสกุล	งามพรรณ ชะโล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ประกอบ ชชาติภักดิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พองสมุทร)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์สิน)

..... กรรมการ

(ดร.ประกอบ ชชาติภักดิ์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

..... รักษาการแทนคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์)

วันที่ 20 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2565

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบสำหรับล้อ Run-flat
ชื่อ นามสกุล	งามพรรณ ชะโล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบและหาสูตรส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักกับบอลูมิเนียมออกไซด์ โดยส่งผลให้สามารถใช้ผลิตล้อรันแฟลท และให้ทราบสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมภายใต้กระบวนการขึ้นรูปล้อรันแฟลท วัสดุสองชนิดที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและมีสารเติมแต่งเป็นบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้ก้อนวัสดุสำหรับการทดลองประกอบด้วย แรงอัดขึ้นรูป อุณหภูมิ เวลา รวมถึงสัดส่วนระหว่างโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดกับบอลูมิเนียมออกไซด์ การทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 type I การทดสอบการสึกกร่อนตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลที่ได้คือสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 °C นาน 90 นาที ด้วย Al_2O_3 เกรด HTM 30 ร้อยละ 5 ซึ่งมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมออยู่ในช่วง 2 ถึง 5 μm ผลการทดสอบทางแรงดึงประกอบด้วย ความเค้นที่จุดคราก (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 และมีอัตราการสึกกร่อนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยส่วนผสม UHMWPE ผสมกับ Al_2O_3 เกรด HTM-30 ที่ 5% มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าอัตราการสึกกร่อน และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.12, $8.66E-11$ $mm^3/N.m$, และ 1.2446958 g/cm^3 ตามลำดับ

คำสำคัญ : สมบัติทางกล, โพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด, ล้อรันแฟลท, บอลูมิเนียมออกไซด์

Thesis title	A Study of Mechanical Properties of UHMWPE Composite for Run-flat
Author	Ngampan Chalo
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Major program	Mechanical Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2021

ABSTRACT

This research project aimed to test the mechanical properties and the capability in wear resistance of ultra-high molecular weight polyethylene composite as well as determine the optimal formulation of UHMWPE-based composites which had a main component of aluminum oxide. The developed formula was used in the manufacture of run-flat wheels and thus applied to build run-flat wheels with an understanding of the proper molding conditions under the run-flat wheel forming process. Two materials used in the research consisted of super-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) as the base material and the additive of aluminum oxide (Al_2O_3). The parameters employed in the hot compression process to obtain the specimen for the experiment consisted of compressive force, temperature, time, and the ratio between super-high molecular weight polyethylene and aluminum oxide. The test for mechanical properties consisted of an impact test, a hardness test according to the ASTM D2240 standard, a tensile test according to the ASTM D638 standard type I, and a wear test according to the ASTM G77 standard. The results indicated that a hot compression condition under a pressure of 5 MPa, a temperature of 210°C for 90 min, and using 5% Al_2O_3 HTM 30 material caused mixed uneven powder particle sizes between 2 to 5 μm . The tensile test results inferred the yield strength of 20.52 MPa, ultimate tensile strength at 29.96 MPa, breaking strength at 22.83 MPa, elongation at break at 265.8%, and modulus of elasticity at 784.46 MPa. The highest hardness was 62 shore D, the high impact strength was 586.8 J/m, and it was displayed for the wear rate of hot compression specimens made of UHMWPE mixed with 5% HTM-30. Moreover, it introduced a coefficient of friction, the wear rate, and the density of 0.12, $8.66E-11$ mm³/N.m, and 1.2446958 g/cm³, respectively.

Keywords : Mechanical Property, UHMWPE, Run-flat, Aluminum Oxide

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเมตตากรุณา ช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากอาจารย์ ดร.ประกอบ ชาติกุภต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งกรุณา มอบความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกด้านทั้งการแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจน ตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จงชัย ฟองสมุทร ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ วิโรจน์ชีวัน ที่กรุณาเป็นกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ให้ความรู้ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สมาชิกในครอบครัว และครูอาจารย์ทุกท่าน ผู้ที่ให้ความรู้ อนุเคราะห์ ส่งเสริม สนับสนุนด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ ค่อยอบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จใน การด้านการศึกษา

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำ วิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ เล่มนี้จะมีประโยชน์สำหรับผู้อ่านไม่มากก็น้อยต่อไป

งามพรรณ ชะโล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	4
1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 กรอบการวิจัย	27
2.3 การทบทวนวรรณกรรม	28
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	36
3.2 การดำเนินการเตรียมผงวัสดุ UHMWPE ผสมกับอนุภาค Al_2O_3	39
3.3 การอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ผสมอนุภาค Al_2O_3 ขนาดต่างๆ	42
3.4 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ XRD Pattern สำหรับ UHMWPE และ Al_2O_3	52
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผล	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	64
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	69



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	10
3.1	38
3.2	39
3.3	44
4.1	56
4.2	57
4.3	58
4.4	59
4.5	60

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ล้อยางรีนแฟลท ก) Self-Supporting Tire และ ข) Supporting Ring System	2
1.2 ล้อยาง ก) ล้อยางธรรมดา ข) ล้อยางรีนแฟลทแบบ Self-Supporting Tire และ ค) Self Seal Leakage Tire	2
2.1 a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา	5
2.2 แผนผังโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโมโนเมอร์และพอลิเอทิลีน	6
2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE	7
2.4 DSC กราฟของ UHMWPE	8
2.5 โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรด GUR 1020 ความหนา 100 μm จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	12
2.6 รูปแบบการสึกหรอของพอลิเมอร์; a) การสึกหรอแบบยึดติด b) การสึกหรอแบบขี้ด c) การสึกหรอแบบล้าตัว d) การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล	14
2.7 อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวหลังจากผ่านการสั่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ	16
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น	17
2.9 โครงสร้างผลึกของ PTFE และโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE	18
2.10 การสึกหรอและชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายโอนบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE	19
2.11 กลไกการถ่ายโอนพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่	20
2.12 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D	21
2.13 เครื่องทดสอบแรงดึง	22
2.14 เครื่องทดสอบแรงกระแทก	22
2.15 (a) Modulus of Toughness ของวัสดุเหนียว และ (b) วัสดุเปราะ	23
2.16 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod	24
2.17 ลักษณะพื้นที่รอยแตกแบบเปราะและแบบเหนียวในการทดสอบแรงกระแทก	25
2.18 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับ Impact Transition Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 a) โดอะแกรมเครื่องทดสอบการสึกหรอ b) ชั้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ	26
2.20 a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดชั้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ	27
2.21 เครื่องชั่งน้ำหนัก a) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadza รุ่น ATX224 สำหรับชั่งตวงน้ำหนักที่สูญเสียของชั้นทดสอบ และ b) เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.1 g ยี่ห้อ AND รุ่น EK-1200i	27
2.22 กรอบการวิจัย	28
2.23 ส่วนประกอบสะโพก	29
2.24 สะโพกเทียมแบบโททอล	29
2.25 ไมโครกราฟ SEM ของฟิล์มถ่ายโอนที่เกิดขึ้นที่โหลด 30 N และความเร็วการเลื่อนที่ 0.2094 m/s (a) UHMWPE, (b) 10 wt% talc / UHMWPE, (c) 20 wt% talc/UHMWPE	31
2.26 การแยกตัวระหว่างการทดสอบความเป็นไปได้ของชิ้นงานดัดแปลง DCB ที่มีความกว้าง 20 mm ของโหลดในอัตราการเคลื่อนที่ 0.5 mm/min	31
2.27 ตัวอย่างหลังจากการทดสอบ interlaminar shear ของ (a) SLJ และ (b) DENS	32
2.28 ร่องรอยขีดข่วนของผิว UHMWPE ที่เกิดขึ้นในแต่ชิ้นส่วนข้อต่อ	33
2.29 แบบการตั้งค่าการทดลอง	33
2.30 Micrographs SEM ของคอมโพสิตขนาดเล็กที่ขัดกับกระดาษ SiC เกรด 120 ตามลำดับความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นที่โหลด 100 N ระยะทาง 1.2 m	34
3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย	37
3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมผงและการชั่งน้ำหนักผง UHMWPE ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg	40
3.3 การชั่งตวงน้ำหนักผงอนุภาค Al_2O_3	40
3.4 การละลายผงอนุภาค Al_2O_3 ในเมทิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser	41
3.5 การผสมผงอนุภาค Al_2O_3 + UHMWPE แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง High speed homogenizer	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	41
เทพง UHMWPE ที่ปั่นผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ใสในถาดและนำไปเข้าตู้อบลมร้อน	
3.7	42
ผง UHMWPE ที่มีส่วนผสมของ Al_2O_3 ผสมอยู่ภายในหลังจากที่ทำการอบแห้งแล้ว	
3.8	42
แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 160x80x50 mm	
3.9	43
เครื่องอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ [1] และลักษณะของขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ที่ได้จากการขึ้นรูป	
3.10	44
ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง	
3.11	45
เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D และลักษณะการทดสอบความแข็ง	
3.12	45
เครื่องทดสอบแรงดึงและลักษณะการจับยึดชิ้นงาน	
3.13	46
ค่าพิคัดของส่วนต่างๆของขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638	
3.14	46
ขึ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง	
3.15	47
ตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	
3.16	47
เครื่องทดสอบแรงกระแทก	
3.17	48
เครื่องชั่งน้ำหนัก Shimadzu digital รุ่น ATX224 ความละเอียด 0.1 mg (0.0001 g) สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของขึ้นทดสอบ	
3.18	49
ชุดอุปกรณ์บันทึกภาพรอยสึกหรอของขึ้นทดสอบ	
3.19	49
ลักษณะการสึกหรอของขึ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ	
4.1	53
รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	
4.2	53
รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า	
4.3	53
รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า	
4.4	54
รูปลักษณะพื้นฐานของ Al_2O_3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, a) Al_2O_3 HTM 30 grade ที่กำลังขยาย x3000 และ b) Al_2O_3 Calcined B grade ที่กำลังขยาย x3000	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.5	องค์ประกอบธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al ₂ O ₃ HTM 30	54
4.6	องค์ประกอบธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al ₂ O ₃ B grade	54
4.7	XRD Pattern ของ UHMWPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	55
4.8	ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ต่างๆ	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมให้ความสนใจเกี่ยวกับการนำเอาพอลิเมอร์มาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักรกลมากขึ้นซึ่งจะเป็นวัสดุทางเลือกที่ดีในอุตสาหกรรมยุคปัจจุบันโดย UHMWPE เป็นอีกตัวที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรรมและด้านวิศวกรรมเครื่องกลเนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) และ UHMWPE ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแท่งหรือแผ่น consolidate UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและไม่มีการผลิตภายในประเทศ การนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้น UHMWPE สามารถนำไปใช้ได้กับเครื่องจักรกลต่างๆ ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมเครื่องสำอางที่ต้องการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์เหล่านี้โดยตรงเนื่องจาก UHMWPE ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และที่สำคัญที่สุดคือมีความแข็งแรงสูง สามารถหล่อขึ้นได้ในตัวทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรเหล่านั้นไม่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นในการหล่อขึ้น [1]

ในปัจจุบันผู้คนหันมาใช้รถยนต์กันมากขึ้นทั้งชายและหญิงซึ่งยางรถยนต์ถือเป็นส่วนสำคัญไม่น้อยไปกว่าส่วนอื่นๆ ของรถยนต์ มีหน้าที่สำคัญในการรับน้ำหนัก ยึดจับกับผิวถนน ไม่ว่าจะเป็นรถที่มีกำลังเครื่องสูง หรือต่ำล้วนก็ต้องใช้ยางที่ได้มาตรฐาน และปลอดภัย ปัญหาหนึ่งในการใช้รถก็คงหนีไม่พ้นลมยางรถรั่ว ซึ่งอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุระหว่างทางหรืออันตรายจากรูปแบบอื่นๆ ยางแบนมักเกิดขึ้นในเวลาหรือสถานที่ที่ไม่เหมาะสม คนส่วนใหญ่อาจโทรหาบริการช่วยเหลือฉุกเฉินบนท้องถนนแต่อาจจะรอประมาณ 45 นาทีถึงหนึ่งชั่วโมง หากผู้ใช้งานทราบและรู้วิธีเปลี่ยนยางอะไหล่ก็สามารถดำเนินการได้เอง แต่ก็เป็นงานที่สกปรก และมีโอกาสที่แต่งตัวไม่เรียบร้อยไม่เหมาะสมที่จะทำการเปลี่ยนล้อ ที่แย่ไปกว่านั้นในรถอาจไม่มียางอะไหล่และผู้ใช้งานที่เป็นผู้หญิงอาจไม่รู้วิธีใช้ชุดซ่อมยาง จากปัญหาเหล่านี้จึงมีผู้ผลิตยางชั้นนำคิดค้นและสร้างล้อยางที่เน้น ความทนทาน ประสิทธิภาพและความปลอดภัยที่มากขึ้น เรียกว่านวัตกรรมใหม่ของยางรถยนต์ประเภทนี้ว่า ยางล้อนิรภัย (Run Flat Tires) การใส่ยางรันแฟลทสามารถรองรับน้ำหนักของรถได้ในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้ผู้ขับขี่มีระยะทางประมาณ 50 ไมล์ในการหาร้านซ่อม แม้ว่ามันอาจจะดูเหมือนเป็นวิธีแก้ปัญหาก็สมบูร์ณ์แบบ แต่เจ้าของรถและผู้ซื้อควรรู้เกี่ยวกับข้อดีและข้อเสีย ยางรันแฟลทเป็นยางมาตรฐานสำหรับรถยนต์ใหม่จำนวนรถยนต์ที่มียางรันแฟลทเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทศวรรษที่ผ่านมา เปอร์เซนต์โดยรวมของรถยนต์ที่มีรันแฟลทนั้นอยู่ที่ 14-15% ในช่วงห้าปีที่ผ่านมา ขณะนี้จะพบกับยางรันแฟลทในรถยนต์ส่วนใหญ่ยี่ห้อ BMW, Mercedes-Benz และ Mini เป็นต้น [2]

โดยส่วนใหญ่ยาง Run Flat สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ

1) แบบ“Self-Supporting tire” ดังรูปที่ 1.1 ก) และ 1.2 ข) เป็นเทคโนโลยีรันแฟลทที่ใช้กันมากที่สุด ในรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในปัจจุบันคือ มีแก้มยางที่รองรับตัวเอง แก้มยางเสริมความแข็งแรงเพื่อรองรับรถเมื่อแรงดันอากาศต่ำ หรือแม้กระทั่งเมื่อยางสูญเสียแรงดันลงหมด ประโยชน์หลักของยางแบบนี้คือ จะพยุ่งตัวเองช่วยให้สามารถขับต่อไปบนพื้นราบได้ถึง 50 ไมล์หลังจากที่อากาศหมด โดยไม่จำเป็นต้องลงจากรถท่ามกลางอากาศหนาว ฝนตก หรือทางหลวงที่พลุกพล่านหรือบนถนนในย่านที่คับแคบของเมือง ผู้ขับขี่จะต้องลดความเร็วลงเหลือประมาณ 50 ไมล์ต่อชั่วโมงเพื่อให้ได้ช่วงระยะขับต่อสูงสุดและมีเสถียรภาพที่ดีขึ้นหลังจากเกิดการระเบิด เนื่องจากยางนี้สามารถรองรับรถได้หลายไมล์โดยไม่มีอากาศ การบังคับเลี้ยวและการควบคุมรถจะยังคงใกล้เคียงปกติ พื้นที่เก็บสัมภาระมากขึ้นหมายถึงยางอะไหล่ส่วนใหญ่จะอยู่ที่พื้นที่ห้องเก็บสัมภาระ ผู้ผลิตรถยนต์สามารถใช้พื้นที่ดังกล่าวเพื่อเพิ่มพื้นที่จัดเก็บในรถให้สูงสุดได้โดยไม่ต้องใช้พื้นที่ว่าง [2], [3]



รูปที่ 1.1 ล้อยางรันแฟลท ก) Self-Supporting Tire และ ข) Supporting Ring System [3]



รูปที่ 1.2 ล้อยาง ก) ล้อยางธรรมดา ข) ล้อยางรันแฟลทแบบ Self-Supporting Tire และ ค) Self Seal Leakage Tire [4]

2) Auxiliary-Supported Run-Flat Tires หรือ Support Ring System ดังรูปที่ 1.1 ข) เป็นระบบเสริมที่รองรับจะรวมล้อและยางที่มีเอกลักษณ์เฉพาะ สำหรับการใช้งานในรถยนต์ อุปกรณ์ดั้งเดิม ในระบบเหล่านี้ เมื่อยางแบนเมื่อใดหน้ายางจะมาสัมผัสอยู่กับวงแหวนล้อรันแฟลท ที่ติดอยู่กับกะทะล้อ ข้อดีของระบบประเภทนี้คือล้อรันแฟลทแยกออกจากยางโดยตรงเป็นชิ้นส่วนคนละชิ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะไม่สึกหรอและไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนล้อรันแฟลท และลดราคาของรันแฟลทลง (ซึ่งเสื่อมสภาพเป็นระยะและต้องเปลี่ยน) โดยมากจะถูกนำไปใช้กับรถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถเกราะล้อ ยาง หรือยานพาหนะที่ใช้ในชายแดน เป็นต้น [3]

3) Self-Sealing Run-Flat Tires ดังรูปที่ 1.2 ค) คือยางนิรภัยที่ผลิตโดยอาศัยเทคนิคการเคลือบผิวใต้ดอกยางด้วยวัสดุ “Sealant” หรือใช้ Polymer ที่สามารถซ่อมแซมรอยรั่วด้วยตัวเอง ยางแบบซีลตัวเองไม่ใช่ยางรันแฟลทในแง่ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้ลม แต่มีชั้นเคลือบหลุมร่องฟันภายในยางที่สามารถรักษาแรงดันอากาศในกรณีที่เกิดการเจาะ หากตะปูเจาะที่ยางแล้วถอดออก น้ำยาซีลจะเติมรอยรั่วให้เต็มตราบใดที่อยู่ใกล้ศูนย์กลางของดอกยางและต้องมีขนาดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร ข้อได้เปรียบที่ใหญ่ที่สุดของยางแบบชนิดนี้คือ คล้ายกับยางทั่วไป สามารถผสมและจับคู่กับยางมาตรฐานได้ และอายุการใช้งานของดอกยางก็เท่ากัน ข้อเสียคือค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น (ประมาณระดับพรีเมียมเท่ากับยางรันแฟลท) และความพร้อมในการใช้งานที่จำกัด ยางประเภทนี้ไม่ใช่ยางมาตรฐานสำหรับรถใหม่ แต่มีจำหน่ายเป็นยางทดแทน Continental และ Pirelli เป็นผู้ผลิตยางรถยนต์สองรายที่ผลิตยางแบบซีลตัวเอง [3]

ด้วยประเทศไทยยังไม่มี การขึ้นรูปล้อรันแฟลทสำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทติดเกราะที่ทำมาจากวัสดุพิเศษและยังไม่มีเทคโนโลยีในการผลิตล้อรันแฟลท สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้เลือกประเด็นการวิจัยเป็นการศึกษาหาสูตรส่วนผสมสำหรับวัสดุเชิงประกอบที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นล้อรันแฟลท ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการผลิตล้อรันแฟลทประเภท Supporting Ring System (ดูรูปที่ 1.1 ข)) โดยล้อรันแฟลทนี้ใช้โพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) เป็นวัสดุหลักและเพิ่มเติมสารบางชนิดลงไปเพื่อให้สมบัติทางกลสูงขึ้นและเหมาะสมที่จะนำมาเป็นล้อรันแฟลท ซึ่งก็คือ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) จนกลายเป็น UHMWPE Composite ซึ่งอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมและสมบัติทางกลที่ต้องพิจารณาประกอบด้วย ความแข็ง ความต้านทานแรงกระแทก ความยืดหยุ่น และการสึกหรอ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อทดสอบสมบัติทางกลและทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบสำหรับล้อ Run-flat

1.2.2 เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักสำหรับใช้ผลิตล้อ Run-flat

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ทดลองขึ้นรูป UHMWPE ผสม Al_2O_3 ด้วยสถานะของการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยตัวแปร คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาต่างๆ

1.3.2 ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีการทดสอบแบบ Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G77 ด้วยความเร็วของการทดสอบ 0.3 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 180 นาที

1.3.3 ทดสอบสมบัติทางกลประกอบด้วย การทดสอบค่าความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240, การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 และการทดสอบความต้านแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256

1.3.4 การขึ้นรูปขึ้นงานเลือกใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ได้ข้อมูลสูตรส่วนผสมเพื่อใช้สำหรับการขึ้นรูปปลั๊กอินแพลทที่มีสามารถใช้ได้กับรถยนต์ บรรทุกปกติขนาดเล็กติดเกาะ

1.4.2 ได้กระบวนการและสถานะการขึ้นรูปปลั๊กอินแพลทที่มีส่วนผสม UHMWPE composite ที่เหมาะสม สามารถนำไปใช้ในการผลิตล้อ Run flat ได้

1.4.3 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ UHMWPE ในงานอุตสาหกรรมได้

1.4.4 ได้ความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการทำงาน การเก็บข้อมูล หลักการวิเคราะห์ข้อมูลวิธีการสรุปผลและหลักการนำเสนองาน

1.4.5 ได้ข้อมูลสมบัติทางกลของ UHMWPE composite เพื่อนำไปใช้ในการสมบัติของวัสดุ ในโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

1.5 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1.5.1 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทรศัพท์/โทรสาร: 0 2836 3000 ต่อ 4138 โทรศัพท์มือถือ: 09 8279 5855

1.5.2 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์ 0 4423 3000 โทรสาร: 0 4423 3052

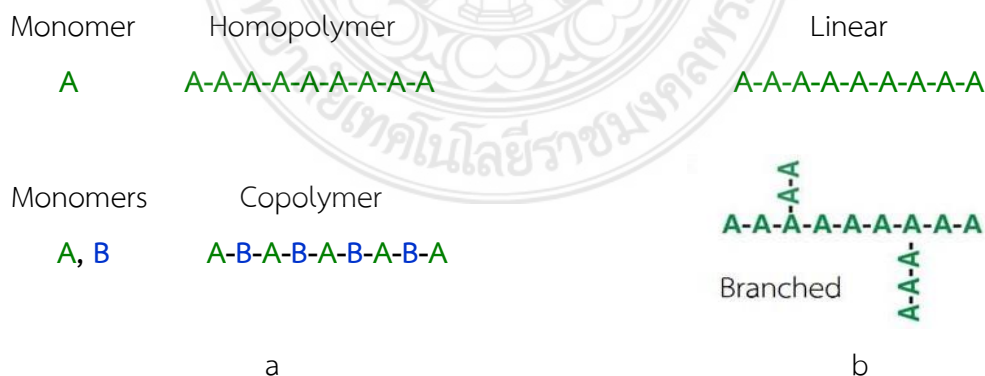
บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีของพอลิเมอร์และ UHMWPE พอลิเมอร์

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทกเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่างๆ การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เฟือง เกียร์ แบร็งค์ ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีการนำไปใช้เป็นวัสดุบุพื้นหรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหินหรือพื้นกระบะรถบรรทุกเป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ (Total joint replacement) สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ [1, 3] พอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยของไฮโดรเจนและคาร์บอนหลายๆ โมเลกุล (Poly) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งแต่โมเลกุลย่อยหรือที่เรียกว่า “โมโนเมอร์ (Monomer)” ของพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบเหมือนกันเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจะเรียกว่า Homopolymer แต่ถ้าแต่ละส่วนหรือแต่ละโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันมีความแตกต่างกันจะเรียกว่า Copolymer ดังลักษณะแผนภาพการเชื่อมต่อของสายโซ่โพลิเมอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.1a โดยที่สัญลักษณ์ A, B คือ โมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน [1], [5], [6]

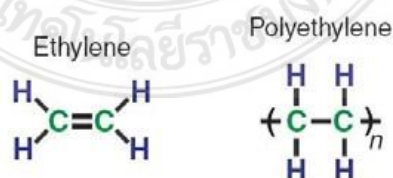


รูปที่ 2.1 a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา [1], [5], [6]

โมโนเมอร์ของพอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวกันเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.1b ซึ่งแนวโน้มของการเกิดการจัดเรียงตัวแบบกิ่งก้านสาขานี้ขึ้นอยู่กับควบคุมสภาวะของขบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นสิ่งที่ควรจำและทำความเข้าใจก็คือรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ดังลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่แสดงในรูปที่ 2a และ 2b ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างง่าย ๆ ของโครงสร้างพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Copolymer มีความเป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างย่อยหรือโมโนเมอร์ย่อยต่างชนิดกันตามชนิดของธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไป แต่ในทางปฏิบัติในอุตสาหกรรมพอลิเอทิลีนรวมทั้ง UHMWPE จะเป็น Copolymer ที่เกิดร่วมกับโมโนเมอร์อื่นๆ (ตัวอย่างเช่น พอลิพรอพิลีน (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) และนอกจากนี้รูปแบบการก่อตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ย่อยๆเชื่อมต่อเข้าด้วยกันทำให้พอลิเมอร์มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของพอลิเมอร์

2.1.1.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

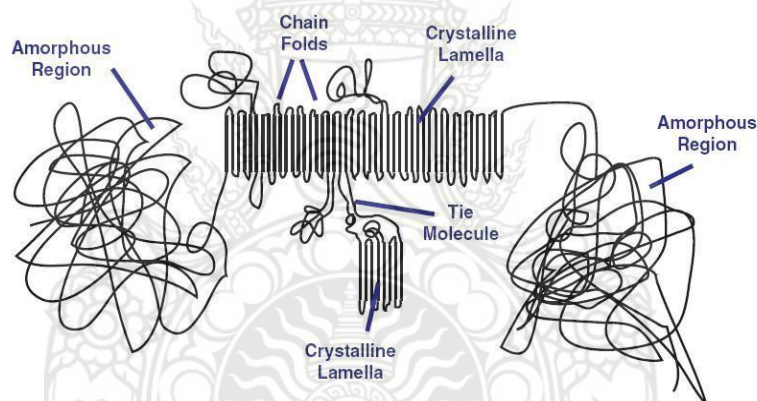
พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากแก๊สเอทิลีนโมโนเมอร์ (Ethylene monomer (C₂H₄)) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28, สูตรเคมีโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีน คือ –(C₂H₄)_n– โดยที่ n คือ degree of polymerization ซึ่งแผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและ พอลิเอทิลีน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2 [1], [5], [6]



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

สำหรับพอลิเอทิลีนสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยเอทิลีนโมโนเมอร์ตั้งแต่ 200,000 หน่วยเรียงต่อกันซ้ำๆหรือในอีกหนึ่งความหมายสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน

มากถึง 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 1×10^6 g/mol แต่ในความเป็นจริงมวลโมเลกุลที่สูงมากๆเช่นนี้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดาต่างๆไปแต่จะทำการวัดเปรียบเทียบกับอนุมาณแทนด้วยค่า intrinsic viscosity (IV) [1], [5], [6]



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

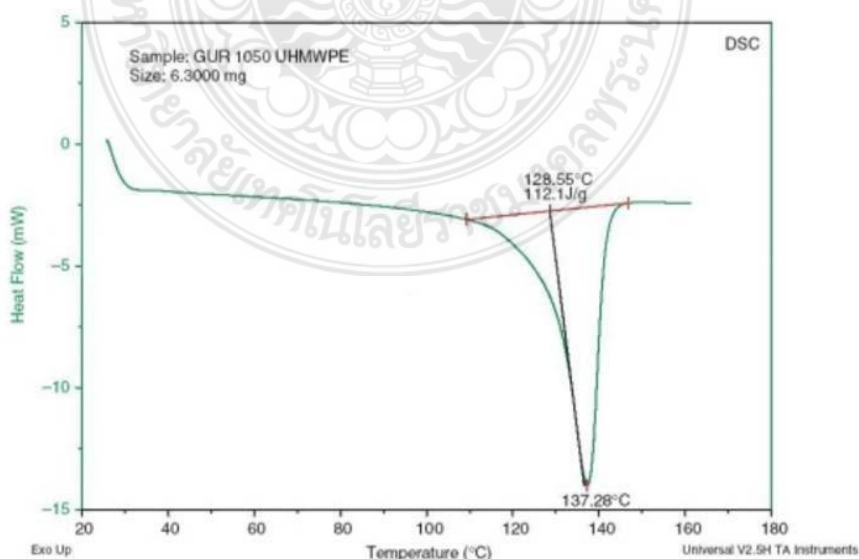
2.1.1.2 สภาพความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (Crystallinity of polymer)

วิธีการหนึ่งที่สามารถจินตนาการเห็นสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE คือสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นเชือกหรือสายโซ่ที่พันกันยุ่งเหยิงคล้ายสปาเกตตี้ที่มีความยาวมากกว่าหนึ่งกิโลเมตร เนื่องจากสายโซ่จะไม่อยู่นิ่งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและมีการดูดซับพลังงานความร้อนภายในตลอดเวลาส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point) สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE มีแนวโน้มที่จะเกิดการสับเปลี่ยนพันธะของ C-C และทำให้เกิดการพับของสายโซ่ (Chain fold) การพับของสายโซ่กลับไปกลับมาเช่นนี้ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Ordered) เฉพาะบางช่วงบริเวณ, บริเวณที่มีการพับของสายโซ่เป็นแผ่นนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและเรียกว่า “ผลึกแผ่น (Crystalline lamella)” ที่มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกบางๆ โดยผลึกแผ่นเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ภายใน

บริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) และสามารถที่จะเชื่อมต่อกับผลึกผ่านข้างเคียงได้ด้วยพันธะโมเลกุล (Tie molecule) ซึ่ง UHMWPE มีลักษณะรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลและความเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [1], [5], [6]

2.1.1.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal transition of polymer)

วิธีการหนึ่งที่ใช้จำแนกหรือทำให้เห็นความแตกต่างของลักษณะจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ อุณหภูมิที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เหล่านั้นในที่นี้จะขอแยกกล่าวไปถึงรูปแบบของสายโซ่โมเลกุล UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นสปายกึ่งดีที่ยาวและพันกันยุ่งเหยิง ซึ่งสามารถจินตนาการได้ถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกลับไปกลับมาและเกิดการบิดงอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนหรืออาจกล่าวได้ว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะต้องเผชิญกับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน 3 ด้านหลักๆ คือ อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature; T_g), อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point temperature; T_m) และอุณหภูมิไหลตัว (Flow temperature; T_f) อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature; T_g) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีพฤติกรรมเปราะคล้ายแก้ว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนไม่เพียงพอที่จะเลื่อนผ่านสายโซ่อื่นได้ และมีวิธีเดียวที่วัสดุจะตอบสนองต่อความเค้นทางกลที่มากกระทำคือการยืดออกหรือแตกออกจากพันธะที่ประกอบกันเป็นสายโซ่โมเลกุลในกรณีของ UHMWPE, T_g จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 160°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิ T_g สายโซ่โมเลกุลบริเวณพื้นที่ที่เป็นอสัณฐานภายในพอลิเมอร์จะเคลื่อนตัวได้มากขึ้นและเมื่ออุณหภูมิของ UHMWPE เพิ่มสูงขึ้นกว่า $60-90^\circ\text{C}$ ผลึกที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่เล็กกว่าผลึกในพอลิเมอร์จะเริ่มหลอมละลายซึ่งพฤติกรรมการหลอมละลายของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi crystalline polymer) รวมทั้ง UHMWPE ถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดปริมาณของ



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

ผลึกของพอลิเมอร์หรือที่เรียกว่า “สภาพความเป็นผลึก (Crystallinity)” และสามารถวัดได้ด้วยการใช้ differential scanning calorimeter (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 (Hemotherm) ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการหลอมละลายบริเวณส่วนที่เป็นผลึกภายในขั้นตอนทดสอบโดยเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลง enthalpy ของขั้นตอนทดสอบที่มีความสมบูรณ์ของผลึก 100% (Enthalpy ของ UHMWPE บริสุทธิ์ $H_f = 291 \text{ J/g}$) และคำนวณออกมาเป็นปริมาณผลึกสำหรับก้อนวัสดุ UHMWPE ส่วนใหญ่จะมีปริมาณผลึกประมาณ 50-55% ในขณะที่อุณหภูมิของพอลิเมอร์ที่ผลึกถูกทำให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลาย พอลิเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดการไหลตัว (Flow transition, T_f) และกลายเป็นของเหลวสำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า $500,000 \text{ g/mol}$ สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมการไหลได้ง่ายแต่อย่างไรก็ตามสำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า $500,000 \text{ g/mol}$ ด้วยสายโซ่โมเลกุลที่มีปริมาณมากกว่าและซับซ้อนมากกว่าจะเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการไหลส่งผลให้ UHMWPE ไม่แสดงพฤติกรรมการไหลตัวหรืออาจกล่าวได้ว่า “ไม่มีจุดไหลตัว” เหมือนพอลิเอทิลีนชนิดอื่น ๆ [1], [5], [6]

2.1.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์บริสุทธิ์ส่วนใหญ่มีสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอต่ำซึ่งบางครั้งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆเหล่านี้ด้วยการผสมสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆให้สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานและนอกจากนี้ยังมีการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูป ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูปนี้โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่าพอลิเมอร์คอมพาวด์ (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) ไททานเตต (Titanates) และเซอร์โคเนียมอะลูมินเตต (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-พอลิเอสเทอร์ อี ลาสโตเมอร์	โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (soft polyether/hard polyester)	PET,PBT
SBS	สไตรีน-บิวตะไดอีน บล็อกโคพอลิเมอร์ (triblock, soft polybutadiene /hard PS)	PS,PP,PPO
Acrylic (core-shell)	Polyacrylic 'core'/polymethacrylic 'shell'	PVC,PC,PET
MBS (core-shell)	Polybutadiene or polybutadiene/styrene 'core' Polymeethacrylic 'shell'	PVC, PC, PET,PBT
ABS	อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน เทอร์พอลิเมอร์	PVC,PC, PUR,PET
EVA	เอทิลีน-ไวนิลแอกซิเตตโคพอลิเมอร์	PVC
SBR	ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน	PS
NBR	อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีนโคพอลิเมอร์	PVC
CPE	คลอรีเนตพอลิเอทิลีน	PVC

2.1.2.3 สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers)

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติเปราะและขาดความเหนียว (Toughness) และความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ต่ำการทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะลดลงและมีความทนทานต่อ

แรงกระแทกหรือมีความเหนียวเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการผสมสารเติมแต่งที่เรียกว่า สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers) ตัวอย่างสารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 2.1 [1], [6]

2.1.2.4 ก่อผลึก (Nucleating agents)

เป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์ โดยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมหรือนิวเคลียสก่อผลึกซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางกลสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ (โครงสร้างผลึกมีความละเอียด) ส่งผลให้แสงผ่านได้มากขึ้นพอลิเมอร์จึงมีสมบัติโปร่งแสงขึ้น [1], [6]

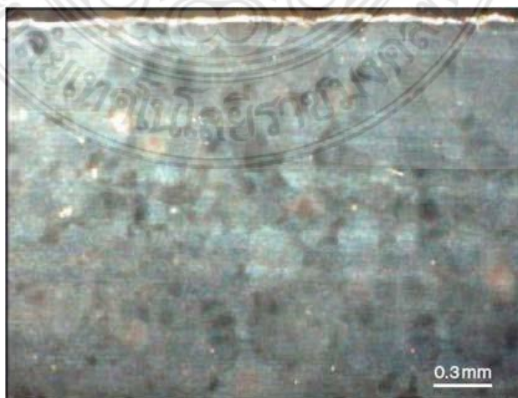
2.1.2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

กระบวนการเพิ่มความอ่อนนุ่มให้กับพอลิเมอร์หรือที่เรียกว่าพลาสติไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่ผสมเข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่าพลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งพลาสติไซเซอร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Extensibility or stretchability) ของพอลิเมอร์ [1], [6]

2.1.3 กระบวนการขึ้นรูป UHMWPE [1], [6]

จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆที่ประกอบไปด้วย C และ H ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นเพียงแค่ว่าความรู้พื้นฐานขององค์ประกอบทางเคมีเท่านั้น แต่ถ้าต้องการอธิบายให้ลึกซึ้งจนสามารถจินตนาการออกมาเป็นก้อนวัสดุ UHMWPE ที่สามารถจับต้องและนำไปใช้งานได้จะต้องอธิบายให้เห็นภาพขั้นตอนต่างๆ ของกรรมวิธีการผลิต โดยขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตชิ้นงาน UHMWPE นั้นมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยน ethylene gas ให้เป็นผง UHMWPE ด้วยกระบวนการ polymerization ขั้นตอนที่สองคือผง UHMWPE ถูกทำให้อยู่ในรูปของแข็งเป็นแผ่น แท่ง ก้อนหรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จ (Semi-Finished Product) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จด้วยวิธีการตัดเฉือน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.5c สำหรับในกรณีของชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กอาจจะทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีการตัดเฉือนซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปนี้เรียกว่า “direct compression molding (DCM)” แต่ละขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตพื้นฐานทั้ง 3 ขั้นตอนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆของ UHMWPE ตัวอย่างเช่นในกรณีของการตัดเฉือนขึ้นรูปการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปร่างภายนอกและปรากฏที่ผิวเท่านั้น แต่การเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ polymerization จะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของ UHMWPE และผลิตภัณฑ์ทั้งหมดการขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัสดุก้อน UHMWPE จะต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง เนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดสูงดังที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ซึ่ง UHMWPE จะไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ จากเหตุผลนี้ทำให้ UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูป

ทุกๆไปที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติกอาทิเช่นการฉีดขึ้นรูปการอัดรีดด้วยสกรู หรือการเป่าขึ้นรูป แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion การก่อตัวเป็นของแข็งจากการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion เกิดขึ้นภายใต้สภาวะของการรวมกันของอุณหภูมิความดันและเวลาที่เหมาะสม โดยความแม่นยำเที่ยงตรงของการรวมกันของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรที่เป็นค่าเฉพาะของ UHMWPE ถูกนำมาใช้ในการผลิตวัสดุก้อน UHMWPE เชิงพาณิชย์ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปตามหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ [1], [7]-[21] ว่ากลไกที่ควบคุมการก่อตัวเป็นของแข็งคือการแพร่ของอะตอมที่เป็นเนื้อหลัก (Self-diffusion) ในขณะที่สายโซ่โมเลกุล UHMWPE (หรือบางส่วนของสายโซ่) ของอนุภาคเกิดการแทรกตัวเข้าหากันในระดับโมเลกุล โดยจลศาสตร์ของการแพร่บริเวณขอบเกรนที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมประสานของขอบเกรนบริเวณที่อยู่ติดกัน (ที่ความดันสูง) และความร้อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (ที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งส่งผลให้ขอบเกรนแพร่มีข้อจำกัดเนื่องจากการก่อตัวเป็นของแข็ง UHMWPE จะเกิดขึ้นด้วยภายใต้อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE หลังจากการก่อตัวขึ้นรูปเป็นของแข็งผง UHMWPE จะยังคงรักษาสภาพการเป็นเม็ดอนุภาคภายในโครงสร้างเม็ดเกรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการผสม calcium-stearate ในผง UHMWPE [1], [7], [9], [18], [21] จะสังเกตเห็นโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนที่มีลักษณะจำเพาะของ UHMWPE ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยขั้นตอนทดสอบจะต้องผ่านการเตรียมด้วยวิธีการเฉพาะที่แตกต่างกัน วิธีมาตรฐานที่ใช้สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบได้มีการอธิบายไว้อย่างละเอียดในมาตรฐาน ASTM F648 โดยขั้นตอนทดสอบจะถูกเตรียมให้เป็นแผ่นบางๆคล้ายแผ่นฟิล์มที่มีความหนาในหน่วยไมโครเมตรจากนั้นจึงนำไปทำการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในโหมด dark field [1], [21] แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันไม่มีการผสม calcium-stearate ในผง UHMWPE ส่งผลให้การวิเคราะห์ตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



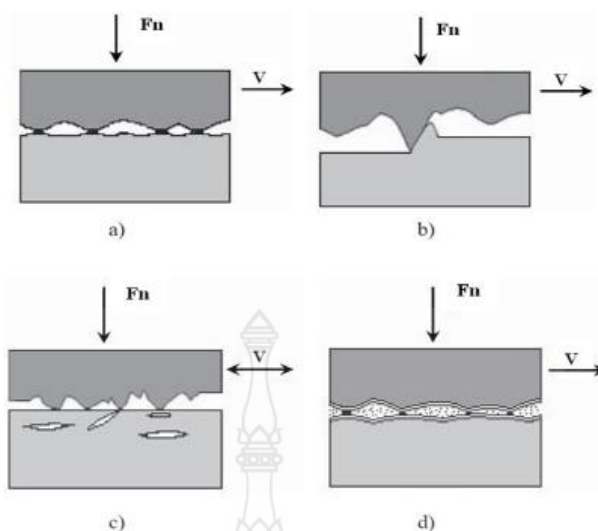
รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรด GUR 1020
ความหนา 100 μm จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [22]

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

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

2.1.4 การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์

พื้นผิวของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองเลื่อน (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสีจะเกิดการสึกหรอจากการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสที่แข็งกว่า การประยุกต์ใช้งานวัสดุคู่สัมผัสโลหะแข็งขัดถูเสียดสีกับพื้นผิวพอลิเมอร์นั้นถูกกำหนดตามความต้องการของการออกแบบทางกลและรวมถึงข้อเท็จจริงที่ว่าพอลิเมอร์สามารถต้านทานการเสียดสีกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสได้ดีกว่าการลื่นไถลเสียดสีตัวมันเองโดยรูปแบบพื้นฐานการสึกหรอของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เริ่มต้นจากก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ้าย่นื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสโลหะที่แข็งกว่า ซึ่งการก่อตัวของชั้นฟิล์มนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางด้านโทรโบเคมีของพอลิเมอร์ [1], [24] การสึกหรอของพอลิเมอร์โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มรูปแบบการสึกหรอออกได้เป็น 4 รูปแบบประกอบด้วย การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) และการสึกหรอแบบโทรโบเคมีคอล (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) ระหว่างพื้นผิวของวัสดุสองชิ้นที่นำไปสู่การเสียดทานดังกล่าวลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6a โดยจุดเชื่อมประสานเหล่านี้อ่อนแอและเกิดการเฉือนขาดบริเวณรอยต่อเชื่อมประสานของพื้นผิวทั้งสอง ซึ่งเมื่อไต่รก็ตามที่จุดเชื่อมประสานมีความแข็งแรงสูงพื้นผิวของวัสดุที่อ่อนกว่าจะถูกเฉือนและส่งผลให้เกิดการถ่ายเนื้อวัสดุไปยังพื้นผิววัสดุที่แข็งกว่า กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการไถลเสียดทานของพื้นผิวพอลิเมอร์บนพื้นผิววัสดุต่างกัน (โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลหะ) ซึ่งเมื่อไต่รก็ตามที่ความแข็งแรงของการยึดติด (adhesive bonds) ที่ก่อตัวขึ้นระหว่างพื้นผิววัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันมีความแข็งแรงมากกว่าความแข็งแรงเหนียวแน่น (cohesive strength) ของเนื้อพอลิเมอร์จะส่งผลทำให้เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เกาะยึดติดบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆถ่ายเนื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและในขณะเดียวกันฟิล์มพอลิเมอร์บางส่วนเกิดการหลุดร่อนออกจากอาณาบริเวณของความเสียดทานกลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ (wear debris) [1], [28] ผลของการสึกหรอแบบยึดติดที่เกิดจากการเฉือนขาดของจุดเชื่อมประสานความเสียดทานจะค่อยๆขยายขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นรอยร้าวที่มีขนาดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการเสีรูปร่างของจุดเชื่อมประสานที่ยึดติดกันซึ่ง Belyi และคณะได้เสนอแนวคิดไว้ว่า “การถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เป็นลักษณะจำเพาะที่สำคัญของการสึกหรอแบบยึดติดของวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบฐาน” [1], [29] ปรากฏการณ์การถ่ายเนื้อความเสียดทานนั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากวัสดุเกือบทุกชนิด โดยผลที่ตามมาของปรากฏการณ์การถ่ายเนื้อวัสดุอาจมีความแตกต่างกันถ้าขนาดของอนุภาคการถ่ายเนื้อวัสดุจากพื้นผิววัสดุหนึ่งไปยังวัสดุอื่นๆ

มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นก็จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [1], [30]–[32] ในกรณีของการสึกหรอภายใต้สภาวะการควบคุมคงที่การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะปรากฏเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ของวัสดุที่อ่อนกว่าถ่ายเนื้อไปยังพื้นผิววัสดุที่แข็งกว่า ตัวอย่างเช่นการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะในขณะที่เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะนี้จะเกิดการหลุดออกของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากพื้นผิวโลหะควบคู่กันไปด้วย ถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์หลุดออกจากพื้นผิวโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสที่กล่าวถึงนี้อาจมีผลต่อการเกาะยึดของชั้นฟิล์มซึ่งการแพร่กระจายของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะจะส่งผลทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดแต่การสึกหรอเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

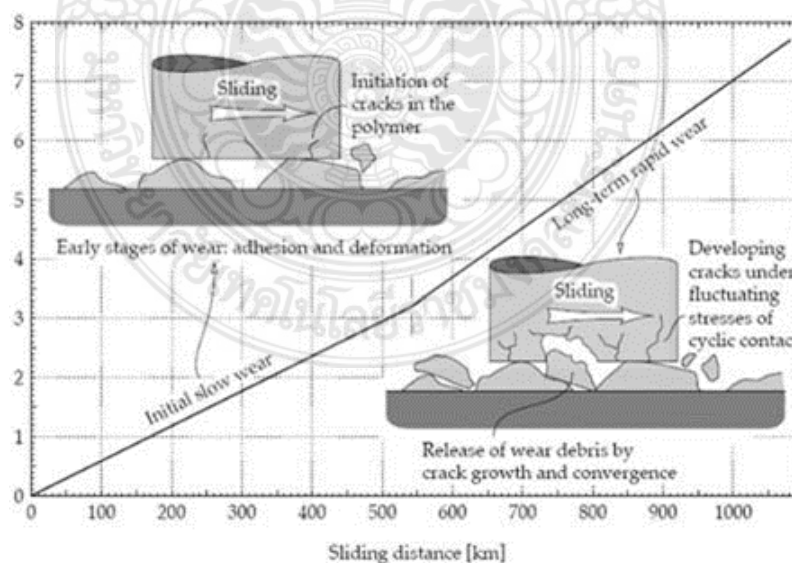
2.1.4.2 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear)

การสึกหรอแบบขัดถูเป็นรูปแบบการสึกหรอที่มีการตัดเฉือนเนื้อวัสดุเกิดขึ้นโดยเกิดจากวัสดุที่แข็งกว่าตัดเฉือนวัสดุที่อ่อนกว่า ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6b ซึ่งหลักฐานการสึกหรอแบบนี้จะปรากฏเป็นรอยขีดข่วน ร่องรอยการครูดหรือขูดออกของเนื้อวัสดุที่นำไปสู่การสูญเสียเนื้อวัสดุ กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบขัดถูนี้เกิดขึ้นจากจุดปลายความหยาบพื้นผิวที่แข็ง (Hard asperities) บนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและหรืออนุภาคแข็งเคลื่อนที่ตัดเฉือนพื้นผิวพอลิเมอร์โดยความหยาบพื้นผิวหรือความขรุขระของพื้นผิวเป็นปัจจัยที่กำหนดแรงเสียดทานซึ่งผลของการขัดถูจะแสดงออกมาในรูปของรอยขีดข่วน รอยแฉะและร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการขัดถูส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างเป็นเศษที่ถูกตัดเฉือนออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ คล้ายๆ กับเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดในงานตัดเฉือนด้วยเครื่องมือกลแต่จะมีขนาดเล็กกว่า การสึกหรอแบบขัดถูมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างเรขาคณิตของจุดปลายความหยาบพื้นผิว (Asperity) ของวัสดุคู่สัมผัสที่แข็งกว่าและส่งผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นโดยขึ้นอยู่กับรูปร่างและมุมปลายของจุดหรือบริเวณที่เกิดการขัดถูบนพื้นผิวของวัสดุคู่สัมผัส [1], [28] ในขณะที่เกิดการขัดถูเมื่อจุดปลายความหยาบพื้นผิวหรืออนุภาคขัดถูกระทำกับพื้นผิวพอลิเมอร์มีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียดซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบที่สำคัญคือ แบบที่หนึ่งเกิดการเซาะเป็นร่องบนพื้นผิวพอลิเมอร์ซึ่งบ่อยครั้งจะมีการกล่าวอ้างถึงการไถครูดที่เกิดจากการผลึกหรือตันอนุภาคและวัสดุไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นรอยไถครูดทางยาวและตันเนื้อวัสดุออกด้านข้างที่ส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นสันใกล้ๆ กับรอยไถครูดและต่อมามีการพัฒนาเกิดเป็นร่องโดยไม่มีเนื้อวัสดุถูกเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิว แบบที่สองเรียกว่า “เกิดการตัดเฉือน” เนื่องจากมีลักษณะคล้ายๆ กับการตัดเฉือนในระดับไมโครซึ่งเนื้อวัสดุถูกตัดเฉือนออกเป็นอนุภาคการสึกหรอขนาดเล็กที่ถูกขจัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ (Chip)

2.1.4.3 การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear)

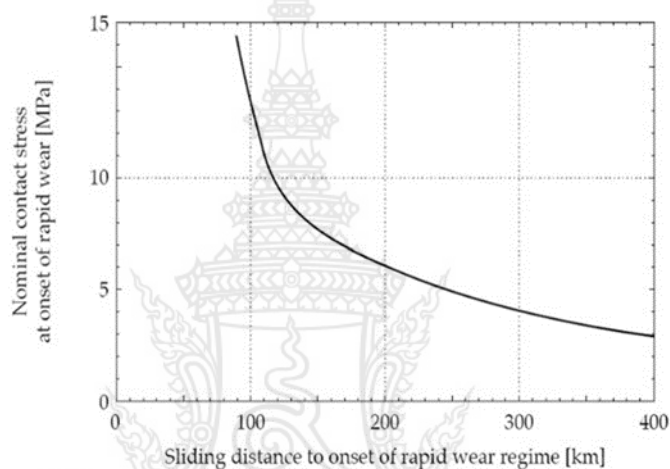
การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความเค้นวัฏจักรส่งผลให้เกิดความเครียด (Strain) ภายในเนื้อวัสดุบริเวณใต้ชั้นผิวและก่อให้เกิดเป็นรอยร้าวเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุขนานกับพื้นผิวดังลักษณะ

รูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.6c และเมื่อไหร่ก็ตามที่รอยร้าวเหล่านี้มีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงขนาดวิกฤติจะทำให้เกิดการหลุดออกมาของแผ่นชิ้นส่วนย่อยหรือเกล็ดที่เป็นอนุภาคการสึกหรอ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มักถูกกล่าวถึงว่าเป็นการสึกหรอที่เกิดจากการแตกออกของชั้นพื้นผิว (Delamination wear) กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการแพร่ขยายของรอยร้าว บริเวณที่มีการแปรรูปซ้ำๆจากการเสียดทานโดยอนุภาคการสึกหรอ (Wear debris) เกิดจากการขยายตัวและการฉีกขาดของรอยร้าวขนาดเล็กบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการสั่นไถล โดยการสึกหรอแบบล้าตัวนี้เกิดขึ้นหลังจากพอลิเมอร์สัมผัสกับการเสียดทานเป็นเวลานานซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อพอลิเมอร์เนื่องจากความเค้นภายในที่เกิดขึ้นซ้ำๆและสะสมภายใน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นซ้ำๆและสะสมอยู่ภายในไม่สามารถขจัดออกให้หมดไปได้แต่จะมีปริมาณสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและเป็นตัวเร่งที่พัฒนาไปสู่การเกิดการแตกร้าวของพอลิเมอร์ การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายอาณาบริเวณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณความเค้นสะสมที่เพิ่มขึ้นซึ่งขบวนการที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า “ความล้าเสียดทาน (Friction fatigue)” และมีความแตกต่างจากความล้าของวัสดุก่อนเนื่องจากความล้าเสียดทานเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นผิวและใต้พื้นผิวของวัสดุเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าการแตกร้าวจากความล้านี้จะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณจุดเล็กๆบนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นจุดสัมผัสความเค้นหรือเกิดการดัดแปรรูปสูงสุดจากทฤษฎีและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าภายใต้อาณาบริเวณที่รับภาระจะเป็นตำแหน่งจุดสัมผัสความเค้นสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์จะทนต่อวัฏจักรความเค้นจากการสั่นไถลกลับไปกลับมาซ้ำๆ จำนวนหลายๆรอบและต่อมาส่งผลให้บริเวณผิวสัมผัสเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวโดยพฤติกรรมการสึกหรอ



รูปที่ 2.7 อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัว หลังจากผ่านการสั่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ [33]

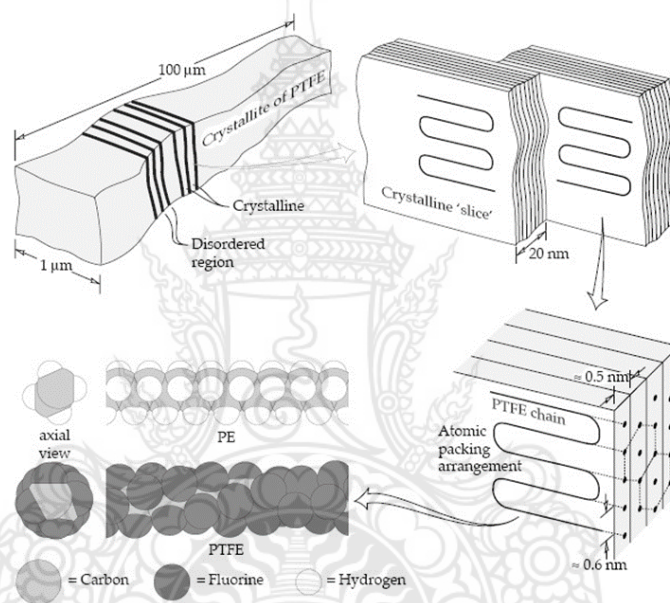
แบบลำตัวนี้สามารถสังเกตเห็นได้จากตัวอย่าง UHMWPE ที่มีการลื่นไถลด้านกับพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะที่มีความเรียบผิวสูง โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการลื่นไถลเสียดสีเป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร [1], [33] ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.7 ความเสียหายหรือการสึกหรอของพื้นผิวจากการสึกหรอแบบลำตัวพบว่าจะเกิดขึ้นหลังจากพื้นผิวพอลิเมอร์ลื่นไถลเป็นระยะทางไกลๆ โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นพร้อมๆกับการขยายตัวของรอยร้าวและอนุภาคการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของการสึกหรอจะอยู่ในรูปของเศษอนุภาคการสึกหรอที่แตกออกเป็นเศษลอนขึ้นเล็กๆบนชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้องลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของขบวนการสึกหรอแบบยึดติด [1], [33]



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอแบบลำตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น [33]

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของการสึกหรอจากการสึกหรอแบบยึดติดเป็นการสึกหรอแบบลำตัวนั้นถูกควบคุมด้วยความเค้นสัมผัส (Contact stress) ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีความเค้นสัมผัสต่ำกว่า 1 MPa การลื่นไถลเป็นระยะทางอนันต์จะทำให้การสึกหรอแบบลำตัวเกิดขึ้นเสมอและนอกจากนี้การสึกหรอแบบลำตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับการรับภาระที่สูงลื่นไถลบนพื้นผิวที่เรียบและไถลด้วยระยะทางไกลๆ อีกด้วยซึ่งรูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการทดสอบการลื่นไถลของวัสดุ UHMWPE ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของพฤติกรรมของการสึกหรอแบบลำตัวภายใต้ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นต่อระยะทางของการลื่นไถล การสึกหรอของวัสดุโดยทั่วไปจะมีความแตกต่างของปรากฏการณ์ของการสึกหรอที่เกิดขึ้น 3 ระยะ [1], [34] คือการสึกหรอระยะเริ่มต้น (Running-in) การสึกหรอระยะคงตัวหรือสม่ำเสมอ (Steady state) การสึกหรอระยะรุนแรง (Wear out) สำหรับในกรณีของการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสระหว่างโลหะ-พอลิเมอร์ ในระยะแรกจะหมายถึงการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้องลงบนพื้นผิวโลหะโดยสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้องลงบนพื้นผิวโลหะซึ่งประกอบด้วยสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของวัสดุ ความแข็งแรงของการเชื่อม

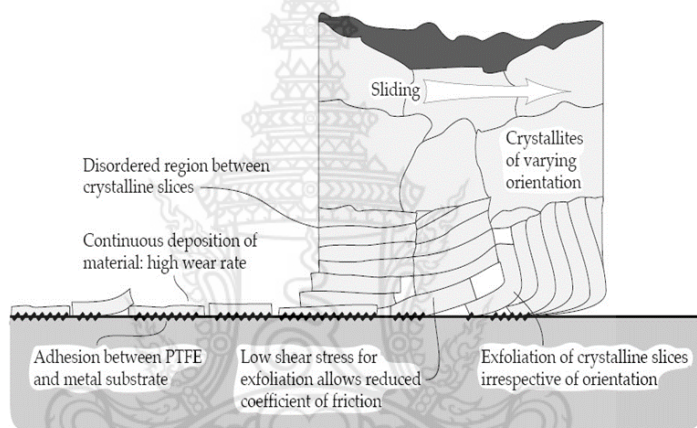
ประสานหรือเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวของโลหะบริเวณหรือส่วนของพื้นที่พื้นผิวโลหะที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ความรุนแรงของปฏิกิริยาเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะซึ่งสมบัติจำเพาะต่างๆ เหล่านี้ ถูกยืนยันด้วยผลการทดลองและรายงานผลการศึกษาวิจัยที่นำเสนอโดยนักวิจัยหลายๆท่าน [1], [27], [35], [36] ดังที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าพอลิเมอร์เกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวแข็งของโลหะด้วยวิธีการดูดซับ [1], [37] ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่าส่วนประกอบที่เกาะยึดติดแน่นอยู่ด้วยกันของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับ การดูดซับในระดับไมโครโมเลกุล (Micro molecules) ที่จำกัดการเคลื่อนที่ของหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) โดยการจำกัดการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมทางด้านโทรโพลีของพอลิเมอร์



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

สำหรับการอธิบายการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื่อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของการลื่นไถลแล้วส่งผลให้เกิดการสึกหรอของพอลิเมอร์ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเตตราฟลูออโรเอทีลีนหรือเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื่อบนพื้นผิวโลหะที่แสดงในรูปเป็นตัวอย่างชั้นฟิล์ม PTFE ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศที่มีการยึดเกาะแนบติดกับพื้นผิวโลหะอย่างแข็งแรง [1], [42] ปฏิกิริยาการเกาะยึดแนบติดที่เกิดขึ้นนี้มีความเข้าใจว่าเป็นปฏิกิริยาทางเคมีของบริเวณจุดที่สัมผัสกันระหว่างฟลูออรีน (Fluorine) และคาร์บอนกับพื้นผิวโลหะที่ลื่นไถลต่อกัน [1], [42], [43] ถึงแม้ว่าอาจจะมีความเป็นไปได้ที่ว่าการเกาะยึดแนบติดที่แข็งแรงสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ แต่โครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเฉพาะของ PTFE ทำให้เกิดกลไกของการถ่ายเนื่อฟิล์มพอลิเมอร์ที่เป็นลักษณะเฉพาะสำหรับ PTFE จากการที่มีช่องว่าง

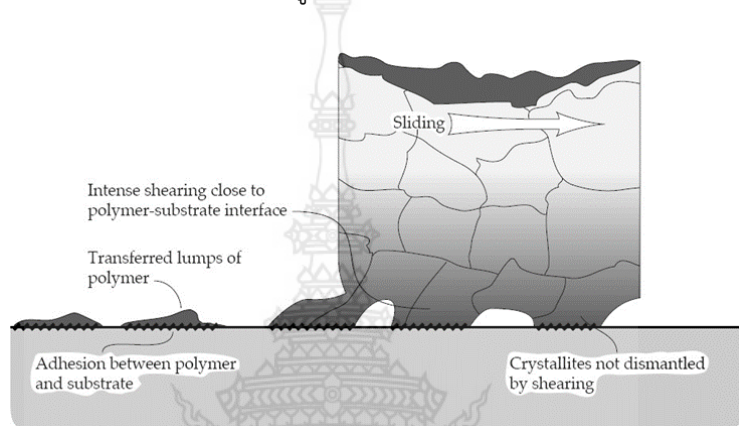
หรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกทำให้มั่นใจได้ว่าโมเลกุลของ PTFE สามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่อยู่ภายใต้ความเค้นสำหรับในส่วนของโครงผลึกของ PTFE จะประกอบด้วยชั้นของส่วนที่เป็นผลึกถูกชั้นกลางด้วยชั้นของเนื้อวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) ซึ่งอ่อนแอและเสถียรรูปได้ง่ายส่งผลให้ PTFE เกิดการแปรรูปได้ง่ายในชุดของชั้นแผ่นผลึกและอสัณฐานที่ต่อเนื่องกัน [1], [39] โดยบริเวณของ PTFE ที่ลื่นไถลสัมผัสกับพื้นผิวที่แข็งกว่าจะเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุในรูปของชั้นแผ่นเนื้อวัสดุที่ลื่นไถลออกมา ซึ่งส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำแต่มีอัตราการสึกหรอสูง [1], [40], [41] กลไกการสึกหรอของ PTFE มีลักษณะดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสึกหรอและชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายโอนบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE [25]

กลไกการถ่ายชั้นฟิล์ม (Film transfer mechanism) พอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสมีพฤติกรรมคล้ายๆ กับการถ่ายชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ของ PTFE ซึ่งปัจจุบันยังไม่พบในพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ โดยปริมาณชั้นฟิล์มพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สะสมบนพื้นผิวโลหะที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นจะกระตุ้นให้เกิดขบวนการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) เมื่อมีการลื่นไถลด้านกับพื้นผิวของแข็ง [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) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จลน์ (Kinetic coefficient of friction) ประมาณ 50% [1], [46] เนื่องจากในช่วงแรกของการเริ่มต้น การลื่นไถลมีความจำเป็นต้องใช้แรงที่สูงกว่าเป็นพิเศษสำหรับการเริ่มก่อตัวเพื่อสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ และถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส สำหรับในส่วนของกลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) จะมีลักษณะของการเกิดพฤติกรรมการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1.1 โดยก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นเป็นก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดจากการหลุดออกมาของแผ่นผลึก และเกิดการเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส



รูปที่ 2.11 กลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่ [24]

ขนาดของก้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากกลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ $1 \mu\text{m}$ [1], [46] เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่เกิดการสัมผัสมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของฟิล์มของ PTFE ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับภาระของก้อนพอลิเมอร์เป็นการรับภาระของฟิล์ม PTFE ที่มีขนาดเล็ก ลักษณะหรือรูปแบบของการถ่ายเนื้อชั้นฟิล์มพอลิเมอร์นี้ไม่ทำให้ลักษณะจำเพาะของการสึกหรอและความเสียดทานของการลื่นไถลสัมผัสขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่แสดงพฤติกรรมการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนจะไม่ใช่วัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่มีประสิทธิภาพมากนัก เมื่อไหร่ก็ตามที่วัสดุพอลิเมอร์ลื่นไถลต้านกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆพอลิเมอร์ที่มีการเกาะยึดแนบติดกันอย่างอ่อนแอหรืออ่อนแอกว่า จะเกิดการสึกหรอมากกว่า โดยเกิดการก่อตัวถ่ายเนื้อเป็นชั้นฟิล์มบนพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงของการเกาะยึดแนบติดเข้าด้วยกันมากกว่า ซึ่งพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอที่สังเกตพบในวัสดุที่ไม่ใช่พอลิเมอร์ [1], [47]

2.1.4.4 การสึกหรอแบบไตรโบเคมี (Tribochemical wear)

การสึกหรอแบบไตรโบเคมีเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การขยายตัวของชั้นฟิล์มถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวต่างๆ ที่มีการสัมผัสกันและ

สภาพแวดล้อมที่ล้อมรอบหนึ่งในรูปแบบส่วนใหญ่ของการสึกหรอแบบแบบไทรโบเคมีคอล คือการสึกหรอในลักษณะไทรโบออกซิเดชันซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากการเสียดทานเป็นตัวเร่งให้เกิดการขยายปริมาณออกไซด์ฟิล์มโดยออกไซด์ฟิล์มแยกออกจากพื้นผิววัสดุเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจนถึงความหนาวิกฤติกลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.6d กลไกการสึกหรอแบบไทรโบเคมีเกิดจากการขาดหรือแยกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และหมู่เคมีที่อยู่บริเวณด้านข้างของสายโซ่หลักและต่อมาจะเกิดการก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่การก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะและกลายเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาไทรโบออกซิเดชัน (Tribo oxidation) บนพื้นผิวโลหะแล้วถ่ายทอดไปยังพื้นผิวพอลิเมอร์ โดยอยู่ในรูปของอนุภาคที่ถ่ายทอดในระดับไมโครและนอกจากนี้ปฏิกิริยาไทรโบเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวขัดขวางการเกาะยึดติดของอนุภาคที่เกิดการถ่ายทอดในระดับไมโครกับพื้นผิวสัมผัสของลูกกลิ้ง [1], [48]

2.1.5 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกล

2.1.5.1 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 แบบขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุกล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต 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 ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์

คอมโพสิตศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12

2.1.5.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 10 kN ยี่ห้อ LLOYD INSTRUMENTS รุ่น LR 10K plus ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบนความหนาไม่เกิน 7 mm โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบแรงดึง



รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

2.1.5.3 การทดสอบแรงกระแทก

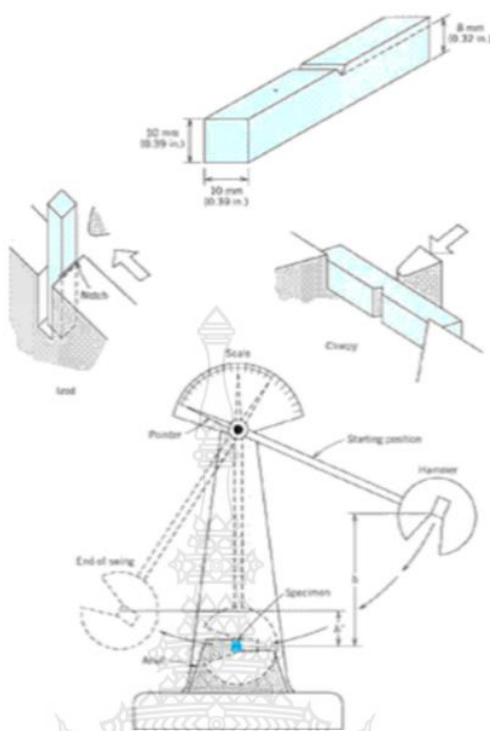
เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเหนียวที่ทนต่อการต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบโดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงกระแทกยี่ห้อ CEAST ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังแสดงในรูปที่ 2.14 [49]

ในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานบางประเภทวิศวกรจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุเพื่อประเมินโอกาสการแตกหักเสียหายและความปลอดภัยในขณะที่ใช้งานในสภาวะต่างๆ เช่น การใช้งานเหล็กกล้าทนสึกของรถดั้มที่ต้องรับแรงกระแทกจากการบรรทุกหิน เหล็กกล้าเครื่องมืองานร้อนหรือเหล็กสำหรับงานท่อความดันที่ใช้ในอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น



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) ของวัสดุโดยการตีขึ้นทดสอบขนาดมาตรฐานจนเกิดการแตกหัก จุดประสงค์ในการทำการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการรับแรงกระแทก (Dynamic Load) ของวัสดุ สำหรับค่าที่นิยมวัดมากที่สุดในการทดสอบแรงกระแทกคือ ค่า Impact Energy ซึ่งเป็นพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงกระแทก (Dynamic Impact Force) จนเกิดการแตกหัก โดยมีวิธีการทดสอบมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test เครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 2.16

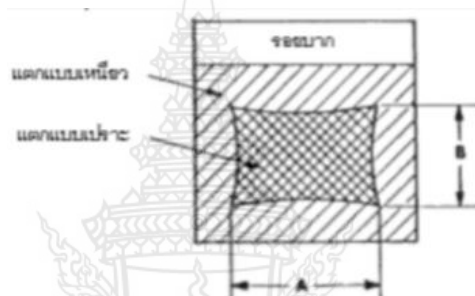


รูปที่ 2.16 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod [49]

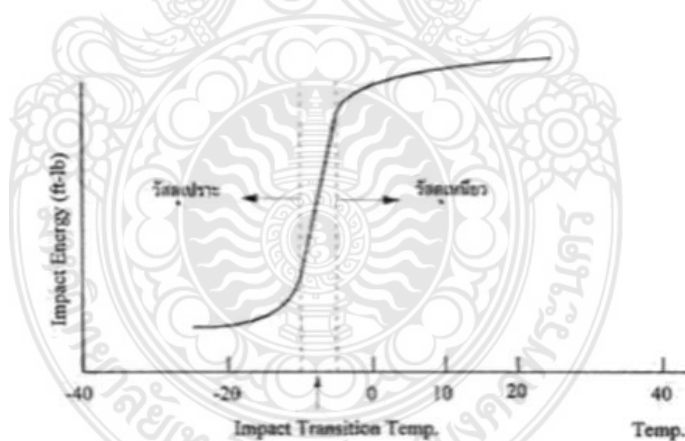
วิธีการทดสอบของทั้ง 2 ชนิดนี้คล้ายกันคือจะวางชิ้นงานทดสอบไว้รับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มที่น้ำหนักค่าหนึ่ง (น้ำหนักและขนาดของตุ้มน้ำหนักจะต้องเป็นไปตามที่มาตรฐานที่เลือกใช้ในการทำการทดสอบระบุไว้) พลังงานที่กระแทกขึ้นทดสอบขึ้นอยู่กับมวลของลูกตุ้ม และความเร็วของมันขณะกระแทก จุดกระแทกจะเป็นจุดต่ำสุดของการเหวี่ยง ซึ่งเป็นจุดที่ลูกตุ้มมีความเร็วสูงที่สุด เมื่อลูกตุ้มกระทบขึ้นทดสอบ ลูกตุ้มจะเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งในการทำให้ชิ้นทดสอบหัก ค่าพลังงานที่เสียไปนี้ก็คือ ค่า Impact Energy นั้นเอง มีหน่วยเป็น ฟุต-ปอนด์ หรือ จูลส์

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

ค่า Impact energy จะไม่นำมาใช้โดยตรงในการออกแบบแต่มีประโยชน์ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุโดยเฉพาะพวกเหล็กที่มีค่า 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 Temperature และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความเหนียว (ความเหนียว-เปราะ) ของวัสดุ [49]

สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ กำหนดค่า Impact Energy ค่าหนึ่งขึ้นมาเป็นเกณฑ์ โดยควรจะมีค่ามากกว่าพลังงานที่วัสดุจะได้รับในระหว่างการใช้งาน ถ้าวัสดุใดทดสอบแล้วมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดก็ถือว่าเป็นวัสดุเปราะซึ่งอาจเกิดการแตกหักได้ง่ายจึงไม่ควรจะนำมาใช้งานและกำหนดค่า ITT โดยให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ทดสอบได้ค่า Impact Energy เท่ากับเกณฑ์ที่

กำหนดพอดี้ (ITT ที่กำหนดโดยวิธีนี้เรียกว่า Ductility Transition Temperature) ค่าพลังงานแรงกระแทกที่ใช้เป็นเกณฑ์ คือ 20 J สำหรับการทดสอบ Charpy V-Notch (ชิ้นงานมีรอยบากรูปตัว V) ดังนั้นวัสดุที่จะนำไปใช้งานจึงควรมีค่า Impact Energy ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดหรืออาจใช้ค่า Ductility Transition Temperature ในการกำหนดสถานะการใช้งาน คือควรจะใช้งานวัสดุในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า Ductility Transition Temperature

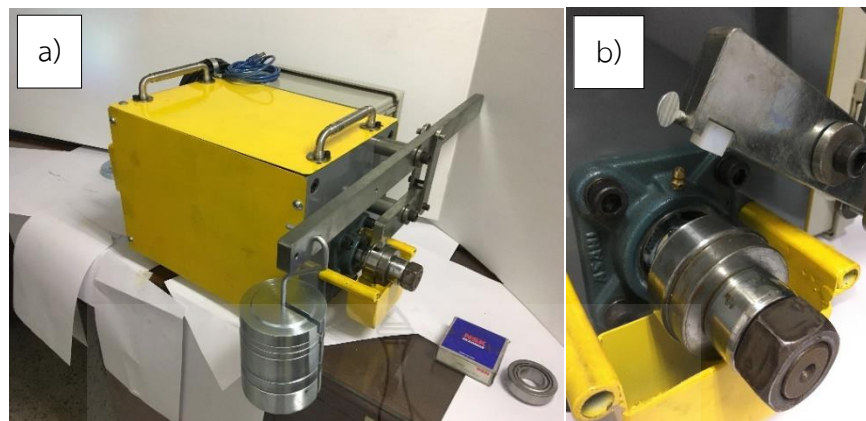
เนื่องจากแต่ละมาตรฐานการทดสอบจะใช้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดและลักษณะรอยบากที่ต่างกัน ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการทดสอบก็ต่างกัน ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการเลือกใช้มาตรฐานต่างๆในการทดสอบ

2.1.5.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ [1]

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบวิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบดังลักษณะไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.19a โดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.19b วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน $0.2 \mu\text{m}$ ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการโทรโบลอยอุตสาหกรรมการผลิตศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยสถานะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่น กำหนดความเร็วของการเสียดทาน 0.3 m/sec แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N และทำการทดสอบด้วยระยะเวลา 180 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg และนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดขึ้นทดสอบและระยะทางของการทดสอบ ($\text{Wear rate} = V_{\text{loss}} / N.d$)



รูปที่ 2.19 a) ไดอะแกรมเครื่องทดสอบการสึกหรอ b) ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ



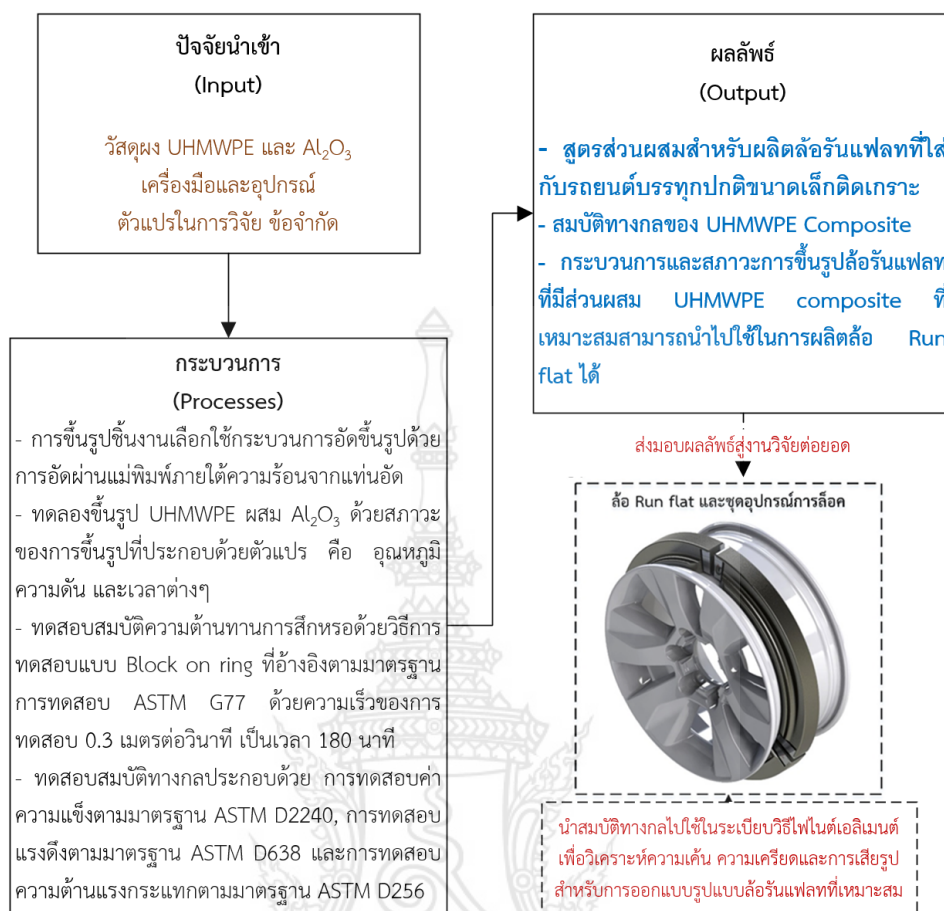
รูปที่ 2.20 a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ



รูปที่ 2.21 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) จะเป็นการวางแนวความคิดของกระบวนการการทำการวิจัยที่จะต้องกล่าวถึงตัวแปรต้นและตัวแปรตามต่างๆ ที่ใช้ในแต่ละกรอบ ซึ่งจะต้องมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันที่จะต้องสอดคล้องกับระเบียบวิธีวิจัยบนพื้นฐานของทฤษฎีต่างๆ มุ่งเน้นไปที่การทดสอบสมบัติทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ โดยกระบวนการเริ่มต้นจากการทำการเตรียมผง UHMWPE ที่ผสมผง Al_2O_3 ตามขั้นตอนเสร็จแล้วนำมาทำการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปหลังจากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงานทดสอบตามลักษณะมาตรฐานการทดสอบความแข็ง, การทดสอบความต้านแรงดึง, การทดสอบแรงกระแทก, การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ จากนั้นนำไปทำการทดสอบและวิเคราะห์ผลซึ่งจะมีแนวคิดดังรูปที่ 2.22

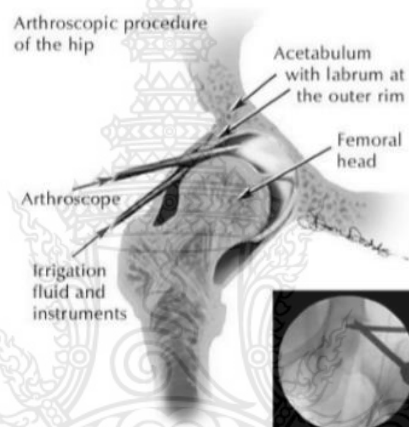


รูปที่ 2.22 กรอบการวิจัย

2.3 การทบทวนวรรณกรรม

ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม และคณะ [50] ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิ, แรงกดอัด และเวลาในการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค, สมบัติทางกล และพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี hot compression process เพื่อหาสภาวะของการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสมซึ่งกำหนดอุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 170, 190, 210 °C ความดันกดอัด 5, 12.5, 20 MPa เวลาของการคงอุณหภูมิและความดันกดอัด 30, 60, 90 นาที ผลจากการศึกษาพบว่า ทั้ง 3 ปัจจัยหลักของการทดลองอัดขึ้นรูปไม่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบมากนักสำหรับพฤติกรรมการสึกหรอพบว่า การสึกหรอของชิ้นทดสอบเกิดจากกลไกการถ่ายโอนชั้นฟิล์มพอลิเมอร์โดยปัจจัยด้านอุณหภูมิและระยะเวลาของการคงอุณหภูมิในการขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบและจากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆพบว่า สภาวะของการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 202 °C ความดันกดอัด 10 MPa และระยะเวลาของการคงอุณหภูมิและความดัน กดอัด 78 นาที เป็นสภาวะการอัดขึ้นรูปที่เหมาะสม

นพนัช พวงมาลีและคณะ [51] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแรงกระทำความเร็วผิวสัมผัสและความหยาบผิวคู่สัมผัสที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงภายใต้การลื่นไถลแบบแห้ง โดยขึ้นทดสอบถูกอัดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี hot compression process ภายใต้ อุณหภูมิ 202 °C ความดันกดอัด 10 MPa และเวลาการคงอุณหภูมิและความดันกดอัด 77 นาที และดำเนินการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Block-on-ring ตามมาตรฐาน ASTM G77 โดยทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำที่กดลงบนขึ้นทดสอบ 50, 100, 150 N ความเร็วผิวสัมผัส 0.1, 0.3, 0.5 m/s และความหยาบผิวของวงแหวนคู่สัมผัส 0.12, 0.19, 0.27 μm ผลจากการศึกษาพบว่า แรงกระทำที่กดลงบนขึ้นทดสอบและความเร็วผิวสัมผัสไม่มีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของขึ้นทดสอบแต่ค่าความหยาบผิวของวงแหวนคู่สัมผัสมีอิทธิพลต่ออัตราการสึกหรอของขึ้นทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%



รูปที่ 2.23 ส่วนประกอบสะโพก [52]



รูปที่ 2.24 สะโพกเทียมแบบโททอล [52]

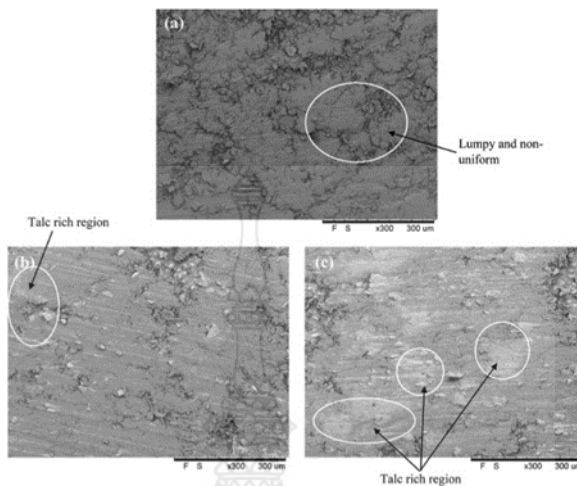
ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ และ ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี [52] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพของผิววัสดุทางการแพทย์เพื่อลดการสึกหรอเนื่องจากผู้ป่วยจากการผ่าตัดเปลี่ยนสะโพกเทียมส่วนใหญ่ต้องประสบปัญหาการผ่าตัดซ้ำเนื่องจากเกิดการหลุดหลวมบริเวณหัวสะโพกเทียมซึ่งมีสาเหตุหลักจาก

การสึกหรอของคู่สัมผัสโลหะที่สามารถใช้ในร่างกายมนุษย์ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสึกหรอในหัว สะโพกเทียมคือการสึกหรอเนื่องจากการตัดเฉือนกันของวัสดุ (Abrasive wear) และการสึกหรอเนื่องจากการยึดติดกันของวัสดุ (Adhesive wear) จากการศึกษาพบว่า การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะมีจุดที่เหมาะสม (Optimum point) ทำให้เกิดการสึกหรอของพลาสติก UHMWPE น้อยที่สุด เมื่อทำการทดสอบโดยใช้คู่สัมผัสคือสแตนเลสสตีลและพลาสติก UHMWPE พบว่าจุดที่เหมาะสมนี้เกิดเมื่อสแตนเลสสตีลมีค่าความหยาบผิว (Roughness) ประมาณ $0.13 \mu\text{m}$ เมื่อใช้พลาสติก UHMWPE ที่ค่าความหยาบผิว $1.3 \mu\text{m}$ เมื่อลดค่าความหยาบผิวของสแตนเลสสตีลให้มีค่าน้อยกว่า $0.13 \mu\text{m}$ จะเกิดการสึกหรอมากขึ้นเนื่องจากเกิดการสึกหรอแบบยึดติด ในขณะที่เพิ่มค่าความหยาบผิวของสแตนเลสสตีลให้มีค่ามากกว่า $0.13 \mu\text{m}$ จะเกิดการสึกหรอมากขึ้นเช่นกันเนื่องจากเกิดการสึกหรอแบบตัดเฉือน นอกจากนี้เมื่อทดสอบโดยกำหนดค่าความหยาบผิวของพลาสติก UHMWPE ให้มากขึ้นและน้อยลง ในช่วงที่เกิดการสึกหรอแบบยึดติดพบว่าค่าความหยาบผิวที่มากขึ้นส่งผลต่อการสึกหรอของคู่สัมผัส โดยเกิดการสึกหรอน้อยกว่า Optimum point ซึ่งเป็นผลดีในการลดการสึกหรอที่เกิดกับหัวสะโพกเทียมได้มากขึ้นไปอีกอันเป็นการลดโอกาสในการหลุดหลวมและลดปัญหาการผ่าตัดซ้ำ

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

การศึกษาเกี่ยวกับโลหะและเซรามิกส์ [54] ซึ่งเป็นวัสดุอ่อนและวัสดุแข็งเพื่อที่จะหาว่าดีทีสำหรับพื้นผิว ซึ่งการทดสอบแรงเสียดทานระหว่างเหล็ก และ UHMWPE ดำเนินการเพื่อประเมินผลของรูปแบบร่องรอยการสึกหรอที่เงื่อนไขความเร็วโหลดที่แตกต่างกัน ซึ่งที่น้ำหนักเบาเพียง 100 N พื้นผิวของเหล็กหรือ UHMWPE สามารถลดแรงเสียดทานได้ความหนาแน่นของพื้นที่ที่เหมาะสมแตกต่างกันอย่างไรก็ตามที่น้ำหนัก 700 N เฉพาะลวดลายพื้นผิว UHMWPE สามารถลดแรงเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีความหนาแน่นของพื้นที่ตั้งแต่ 16% ถึง 30% สามารถลดความสึกการสึกหรอเฉลี่ยได้อย่างมีประสิทธิภาพอัตราการลดสูงสุดของความสึกการสึกหรอเฉลี่ยคือ 36% ของ Tribo-pair ซึ่งได้มาจากรูปแบบที่มีความหนาแน่นของพื้นที่ 30% ในขณะเดียวกันก็มีลวดลายพื้นผิวบนพื้นผิวของเหล็กสามารถลดการสึกหรอเฉลี่ยความสึกเฉพาะเมื่อความหนาแน่นของพื้นที่

40% สูงสุดอัตราการลดลงของความถี่การสึกหรอเฉลี่ยคือ 20% ผลการทดสอบจะถูกวิเคราะห์เพิ่มเติมในแง่ของความเครียดต่อไป

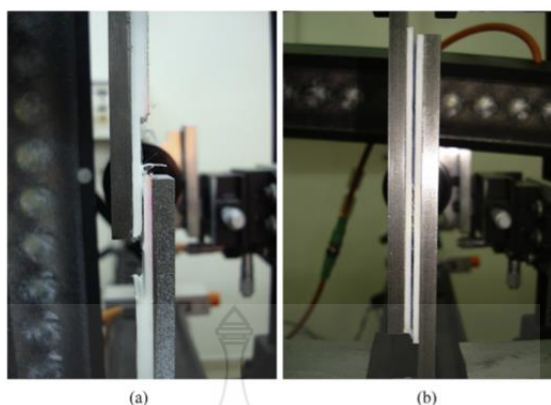


รูปที่ 2.25 ไมโครกราฟ SEM ของฟิล์มถ่ายไอออนที่เกิดขึ้นที่โหลด 30 N และความเร็วการเลื่อนที่ 0.2094 m/s (a) UHMWPE, (b) 10 wt% talc / UHMWPE, (c) 20 wt% talc/UHMWPE [55]

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



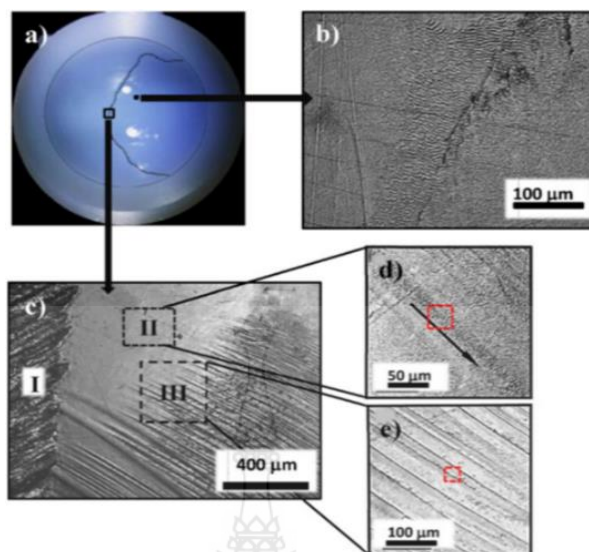
รูปที่ 2.26 การแยกตัวระหว่างการทดสอบความเป็นไปได้ของชิ้นงานดัดแปลง DCB ที่มีความกว้าง 20 mm ของโหลดในอัตราการเคลื่อนที่ 0.5 mm/min [56]



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างหลังจากการทดสอบ interlaminar shear ของ (a) SLJ และ (b) DENS [56]

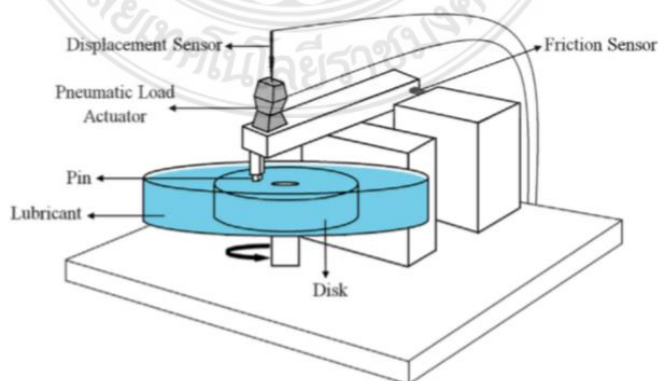
Ido Meshi และคณะ [56] ได้ทำการทดลองสองแบบเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของการของ UHMWPE คอมโพลีเมอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านชีวเวชศาสตร์เนื่องจากมีความต้านทานแรงดึงสูงและความหนาแน่นต่ำ โดยมีการทดสอบแบบคานคู่ (DCB) และการทดสอบแบบ interlaminar shear (ILS) ซึ่งในการทดลองนั้นจะต้องคำนึงถึงรูปทรงเรขาคณิตและเลเยอร์ซ้อนที่เป็นสิ่งสำคัญจากมาตรฐาน ASTM เพื่อดูขนาดของรอยร้าวที่เหมาะสมและพื้นผิวที่ร้าวแสดงให้เห็นถึงความต้านทานการแตกสูงกว่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เพื่อศึกษากลไกการขยายของผิว UHMWPE ผลการทดสอบเชิงพาณิชย์ HB26 (DH) การมองเห็นวัตถุและพฤติกรรมการแตกร้าว ซึ่งการทดสอบ ILS ที่เสนอนั้นเป็นวิธีที่ไม่ซ้ำใครในการกำหนดให้ใกล้เคียงความเค้นเฉือนระหว่างโมเลกุลที่สม่ำเสมอและเด่นชัดหลังจากทำการทดลอง พบว่าการทดลองทั้งสองแบบมีความแตกต่างเล็กน้อยในด้านค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงและการแตกหักสูง

R.M. Trommer และคณะ [57] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสึกหรอซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการปลูกถ่ายข้อต่อสะโพกซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นพิเศษ (UHMWPE) ส่วนประกอบที่ประดิษฐ์ ความรู้และความเข้าใจที่มากขึ้นเกี่ยวกับคุณสมบัติและความสามารถของ UHMWPE ที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอในระดับมหภาคถึงระดับนาโนเป็นสิ่งสำคัญในบริบทของการออกแบบทางวิศวกรรมโดยมีเป้าหมายการปรับปรุงพฤติกรรมของรากฟันเทียม เทคนิคการจำแนกลักษณะหลายขนาด (gravimetry, การวิเคราะห์เชิงเรขาคณิตโดยใช้เครื่องวัดพิคัด, profilometry, กล้องจุลทรรศน์ออปติคัล, อิเล็กตรอนสแกนกล้องจุลทรรศน์สเปคโตรสโกปีพลังงานกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมและสเปคโตรรามัน) รวมกันสำหรับการประเมินการสึกหรอของรากฟันเทียม UHMWPE/โลหะ (สแตนเลสและโคบอลต์-โครเมียม) การทดสอบในข้อต่อสะโพกจำลองอัตราการสึกหรอของ UHMWPE อยู่ที่ประมาณ 48 mg/106 rev ซึ่งเท่ากับอัตราการสึกหรอเชิงเส้นที่ 0.16 mm/year เป็นอิสระจากวัสดุหุ้มกระดูกต้นขา การวิเคราะห์อย่างลึกซึ้งโดย AFM และรามันสเปคโตรสโกปีพบว่าโครงสร้างของวัสดุเปลี่ยนแปลงหลังจากการสึกหรอแต่ในโหมดที่แตกต่าง พื้นผิวที่รอยขีดข่วนกลายเป็นผลึกมากขึ้นในขณะที่พื้นที่เรียบยังคงอยู่โดยไม่มีโครงสร้างการปรับเปลี่ยน



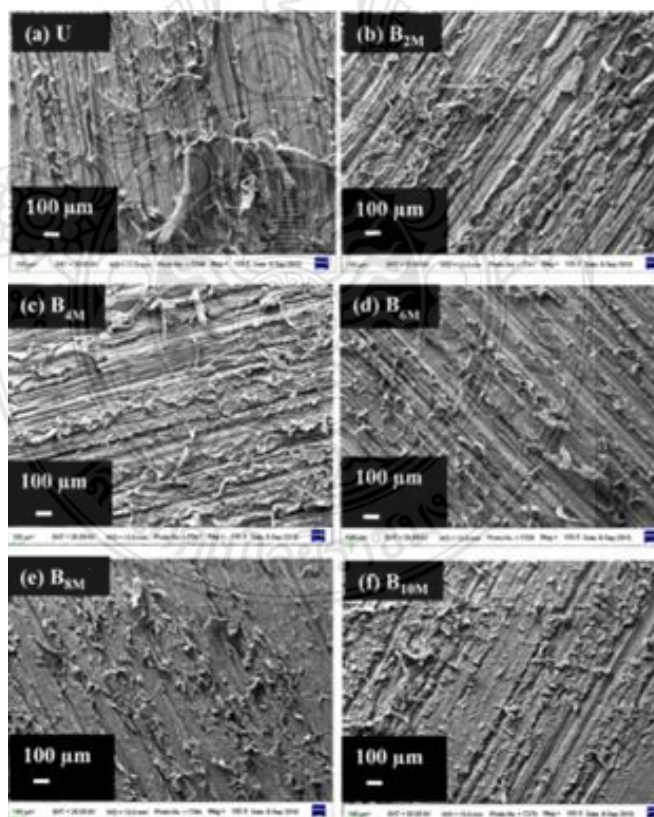
รูปที่ 2.28 ร่องรอยขีดข่วนของผิว UHMWPE ที่เกิดขึ้นในแต่ชั้นส่วนข้อต่อสะโพก [57]

Alaleh Safari และคณะ [58] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตรวจสอบผลกระทบของการโหลดแบบไดนามิกในการเปรียบเทียบที่มีการโหลดแบบคงที่ในพฤติกรรมทางโทรโบโลยีของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงพิเศษ (UHMWPE) โมลิบดีนัม (COCFMO) พื้นผิวเคาน์เตอร์ด้วยสารหล่อลื่นที่แตกต่างกันซึ่งผลกระทบของกรดไฮยาลูโรนิก (HA) และปริมาณโปรตีนในสารหล่อลื่นถูกตรวจสอบ ซึ่งจากการวัดในหลอดทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมของการปลูกถ่ายของวัสดุฝังข้อต่อพารามิเตอร์การวัดจะต้องจำลองในสภาพร่างกายถึงแม้ว่าลักษณะของข้อต่อของมนุษย์นั้นเป็นแบบไดนามิก ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าถึงแม้การขนถ่ายแบบไดนามิกจะไม่ส่งผลกระทบต่อวิวัฒนาการของแรงเสียดทานสำหรับสารหล่อลื่นใด ๆ ก็ตามค่าความเสียดทานลดลงสำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีส่วนผสมของ HA ผลการวิจัยพบว่าปริมาณโปรตีนในน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นให้การป้องกันสูงสุดกับการสึกหรอสำหรับพื้นผิวเลื่อนโคบอลต์โครเมียมได้



รูปที่ 2.29 แบบการตั้งค่าการทดลอง [58]

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



รูปที่ 2.30 Micrographs SEM ของคอมโพสิตขนาดเล็กที่ขัดกับกระดาษ SiC เกรด 120 ตามลำดับความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นที่โหลด 100 N ระยะทาง 1.2 m [60]

Sanjeev Sharma และคณะ [60] ได้ทำการพัฒนาชุดคอมโพสิต UHMWPE สองชุดโดยใช้อนุภาคโบรอนคาร์ไบด์ (B4C) ที่แตกต่างกันทั้งจำนวนและขนาดอนุภาคไมโครบรรจุอนุภาค B4C ขนาดเล็ก (2-5 μm) ใน wt% ต่างๆ (0, 2, 4, 6, 8 และ 10) ในขณะที่ชุดนาโนมีอนุภาคนาโน (NPs) ขนาด 70-90 nm ใน 0, 2 และ 3% การสึกหรอขัดถูการศึกษาเปรียบเทียบกับกระดาศซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ในสภาวะการส่งครั้งเดียวถูกดำเนินการภายใต้แรงกระทำและความเร็วที่แตกต่างกัน การรวมอนุภาค B4C พิสูจน์แล้วว่าเป็นประโยชน์ในการเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอและเหมาะสมปริมาณฟิลเลอร์สำหรับอนุภาคไมโครและอนุภาคนาโนเท่ากับ 6-8% และ 3% ตามลำดับแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงยึดหยุ่นเป็นเส้นตรงที่ค่อนข้างดีพร้อมความต้านทานการสึกหรอ การศึกษา SEM ยืนยันว่าการรวมสารตัวเติมแบบแข็งเป็นส่วนใหญ่ลดความรุนแรงของกลไกการสึกหรอได้



บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

รายละเอียดในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการดำเนินการวิจัยที่ประกอบด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ หลักการวิเคราะห์สมบัติทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมบัติทางกลและทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบสำหรับล้อ Run-flat และหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักสำหรับใช้ผลิตล้อ Run-flat โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอัดขึ้นรูปผง UHMWPE การทดสอบสมบัติทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักและศึกษาเกี่ยวกับผง Al_2O_3 จากวารสารวิชาการและวิจัย หนังสือ อินเทอร์เน็ต และสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรต่างๆ

3.1.1.2 การกำหนดตัวแปร ระเบียบวิธีวิจัย แนวทางวิจัย กรอบการวิจัย และการวางแผน การเตรียมการดำเนินงาน

3.1.1.3 จัดหาซื้อวัสดุผงโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง UHMWPE และสารเพิ่มสมบัติทางกล คือ ผงอลูมิน่า (Al_2O_3) เพื่อสร้างวัสดุเชิงประกอบแบบใหม่ ด้วยอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน

3.1.1.4 วิเคราะห์อนุภาคผงโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงและผงอลูมิน่าด้วยเครื่อง SEM และ XRD เช่น องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ ขนาดอนุภาคผง

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 ทำการทดสอบสมบัติทางกลและทดสอบความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE ผสมผง Al_2O_3

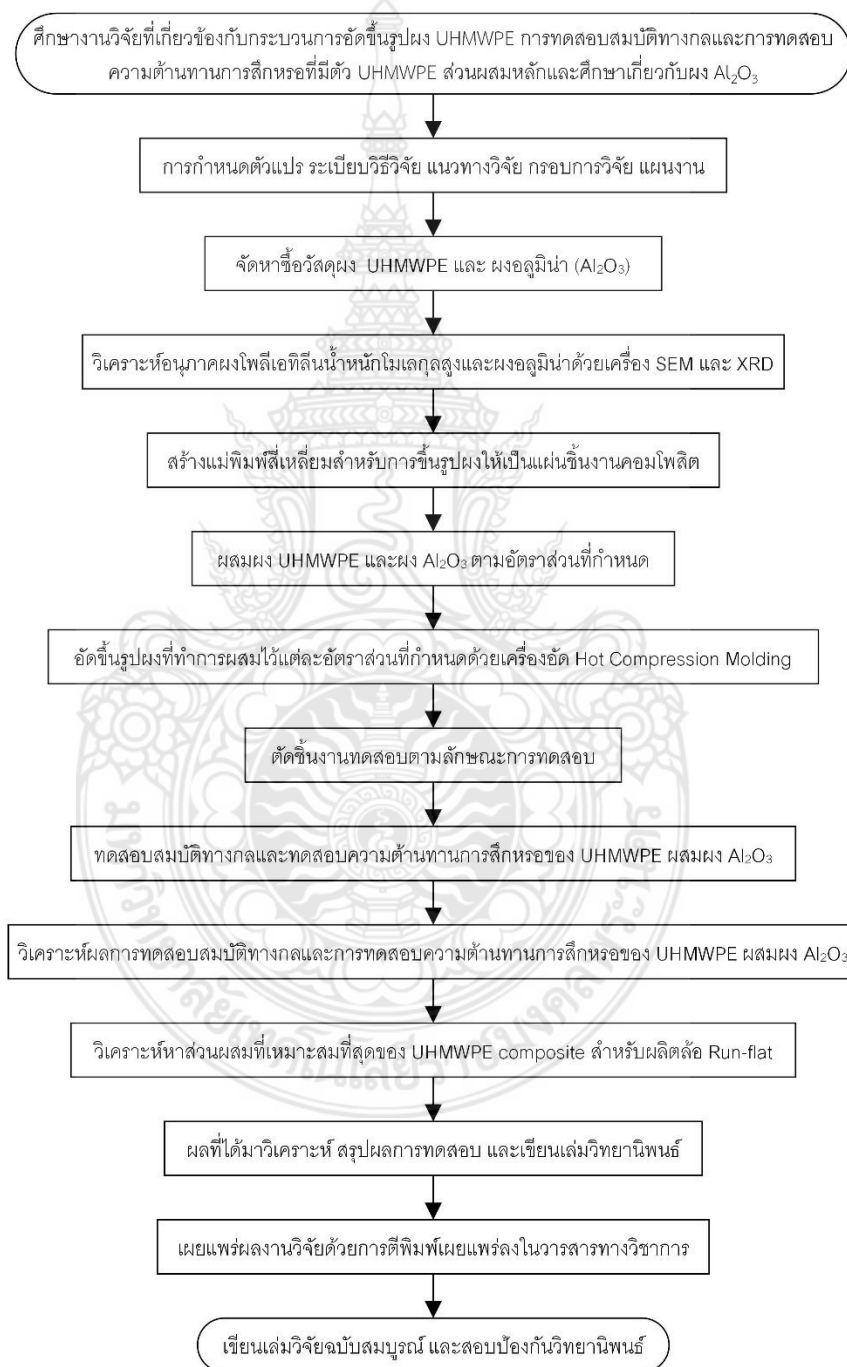
3.1.1.10 วิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกลและการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE ผสมผง Al_2O_3

3.1.1.11 วิเคราะห์หาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของ UHMWPE composite สำหรับผลิต ล้อ Run-flat

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 เป็นโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นพิเศษ 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 $[\eta]$	mL/g	2300
Average molecular weight (cal.)	g/mol	5.5×10^6
Average particle size, X50	μm	150
Tensile strength at yield	MPa	22
Tensile strength at break	MPa	35
Ultimate elongation	%	≥ 300
Izod impact strength	J/m	NB
Hardness	Shore D	63
Melting temperature (10°C/min)	°C	130 – 135
Vicat softening point (1Kg)	°C	125 – 128

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

3.1.2.2 Al_2O_3 ขนาดอนุภาคต่างๆ ประกอบด้วย

- 0.05 μm (50 nm) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท BUEHLER จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 0.3 μm (300 nm) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท BUEHLER จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2-5 μm เป็น Al_2O_3 99.5%, HTM30 grade, Alpha phase ผ่านการ Calcined ผลิตโดยบริษัท Indian Aluminium Co., Ltd. มีคุณสมบัติประกอบด้วย 1) Specific gravity 3.96, 2) Melting point 2045 °C, 3) Sintering Temp. 1750 °C
- 5 μm เป็น Al_2O_3 99.4%, Calcined B-grade ผลิตโดยบริษัท Indian Aluminium Co., Ltd. มีคุณสมบัติประกอบด้วย 1) Specific gravity 3.90, 2) Melting point 2045 °C, 3) Sintering Temp. 1750 °C

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองวิจัยมีดังนี้

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

3.1.3.2 เครื่อง Ultrasonic disperser ทำให้เกิดการกระจายตัวของผง Al_2O_3 ในเมทิลแอลกอฮอล์

3.1.3.3 เครื่อง High speed homogenizer ใช้ในการปั่นผสมกันระหว่างผง UHMWPE และผงฟิลเลอร์ที่ได้ใช้เครื่อง Ultrasonic disperser ทำให้กระจายตัวแล้วผสมกัน

3.1.3.4 อุปกรณ์ในการเตรียมผงเพื่อผสมผง UHMWPE และผงฟิลเลอร์เข้าด้วยกัน

3.1.3.5 เตาอบลมร้อน (ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L)

3.1.3.6 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ประกอบด้วยแม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูป และ เครื่อง Compression press

3.1.3.7 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมขึ้นทดสอบซึ่งประกอบด้วยเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับตัดแต่งขึ้นทดสอบได้ขนาดตามที่ต้องการได้แก่ เลื่อยสายพาน เครื่องกัด และ กระดาษทรายสำหรับขัดเตรียมขึ้นทดสอบ

3.1.3.8 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วย เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง เครื่องทดสอบแรงกระแทก และเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Shore D

3.1.3.9 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

ขึ้นทดสอบ	อัตราส่วนผสม (wt%)		ปริมาณการผสมรวม (กรัม)		น้ำหนักรวม (กรัม)
	ผง Al_2O_3	ผง UHMWPE	ผง Al_2O_3	ผง UHMWPE	
1	5 %	95 %	5 %	95 %	100
2	8 %	92 %	8 %	92 %	100
3	10 %	90 %	10 %	90 %	100

ขั้นตอนการเตรียมผง UHMWPE สำหรับการอัดขึ้นรูปขั้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักผง UHMWPE ด้วยปริมาณต่างๆ ตามอัตราส่วนการผสมที่กำหนดในตารางด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมผงและการชั่งน้ำหนักผง UHMWPE ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg

2. ชั่งน้ำหนักผงอนุภาค Al_2O_3 ด้วยปริมาณตามอัตราส่วนที่กำหนด 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

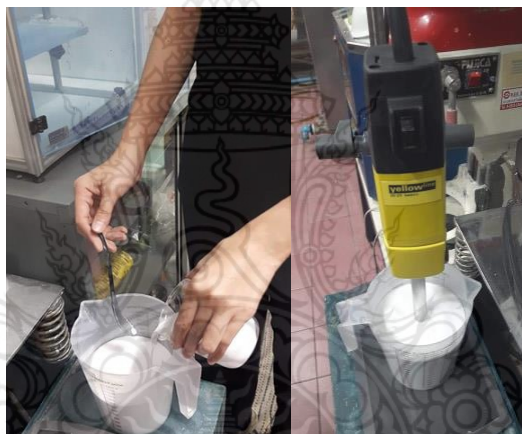
4. เเทงอนุภาค Al_2O_3 ที่ละลายในเมทิลแอลกอฮอล์ผสมกับผง UHMWPE ตามอัตราส่วนที่กำหนด เติมเมทิลแอลกอฮอล์ 500 ml แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง High speed homogenizer ด้วยความเร็วรอบ 32,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 การชั่งตวงน้ำหนักผงอนุภาค Al_2O_3



รูปที่ 3.4 การละลายผงอนุภาค Al_2O_3 ในเมทิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser



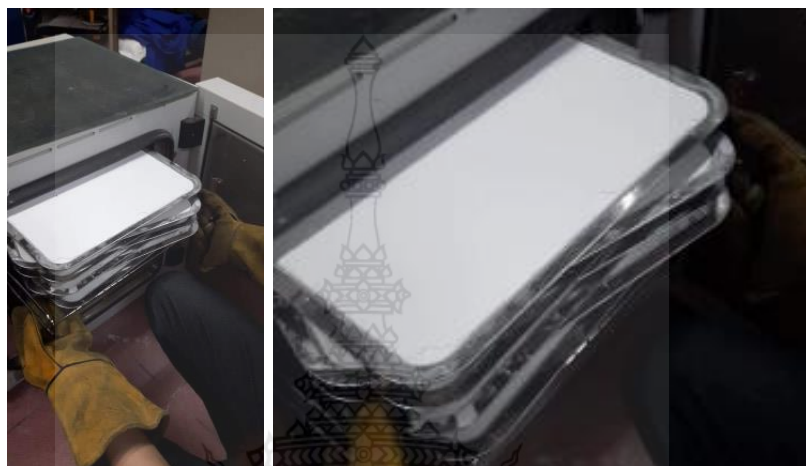
รูปที่ 3.5 การผสมผงอนุภาค Al_2O_3 + UHMWPE แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง High speed homogenizer



รูปที่ 3.6 เทผง UHMWPE ที่ปั่นผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ใส่ในถาดและนำไปเข้าตู้อบลมร้อน

5. เทพง UHMWPE ที่ปั่นผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ใส่ในภาตที่เตรียมไว้แล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ใช้เวลาประมาณ 3 ชม ดังแสดงในรูปที่ 3.6

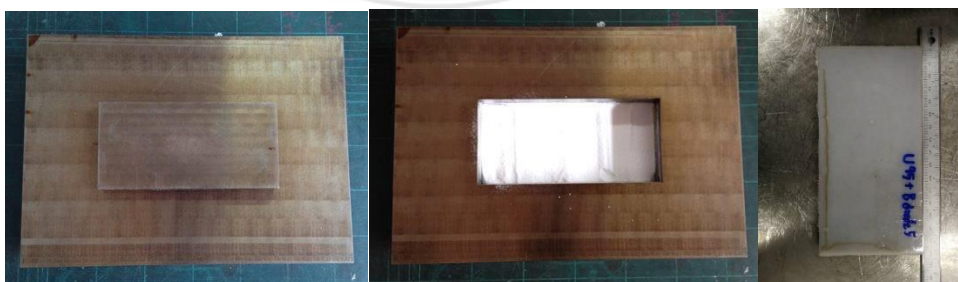
6. หลังจากที่ทำกรอบแห้งแล้วจะได้สารประกอบผง UHMWPE ที่มีส่วนผสมของ Al_2O_3 ผสมอยู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผง UHMWPE ที่มีส่วนผสมของ Al_2O_3 ผสมอยู่ภายในหลังจากที่ทำกรอบแห้งแล้ว

3.3 การอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสมอนุภาค Al_2O_3 ขนาดต่างๆ

UHMWPE ผสม Al_2O_3 หลังจากผ่านการอบแห้งแล้วจะนำไปทำการอัดขึ้นรูปทันทีเพื่อป้องกันไม่เกิดการรวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศที่ทำให้ผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 เกิดความชื้น ทำการอัดด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 160x80x50 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ด้วยเครื่อง Compression press ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.9 ของห้องปฏิบัติการวัสดุโพลีเมอร์คอมโพสิตหน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมีความหนาประมาณ 10 mm ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 160x80x50 mm



รูปที่ 3.9 เครื่องอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ [1] และลักษณะของขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสมกับผงอนุภาค Al_2O_3 ที่ได้จากการขึ้นรูป

3.4 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล

3.4.1 การทดสอบความแข็ง

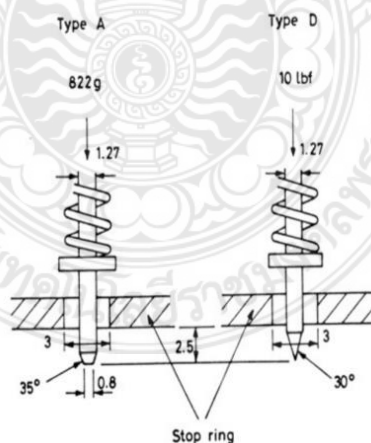
ความแข็ง (Hardness) ในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) ของวัสดุ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (relative term) การทดสอบความแข็งสำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมทำการทดสอบโดยทั่วไปสามารถทำการทดสอบได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ (ตารางที่ 3.2) กล่าวคือ การทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพอลิเมอร์หรือพลาสติกที่มีลักษณะแข็งหรือมีความแข็งสูง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆ 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 โดยขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงที่ใช้กดตั้งรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 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 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด โดยทั่วไปแล้ว Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่าในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย [1]



รูปที่ 3.10 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้ ผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยแรงกดหรือน้ำหนักที่กดลงบน

ชั้นทดสอบเท่ากับ 4550 กรัม การทดสอบทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ สถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D และลักษณะการทดสอบความแข็ง

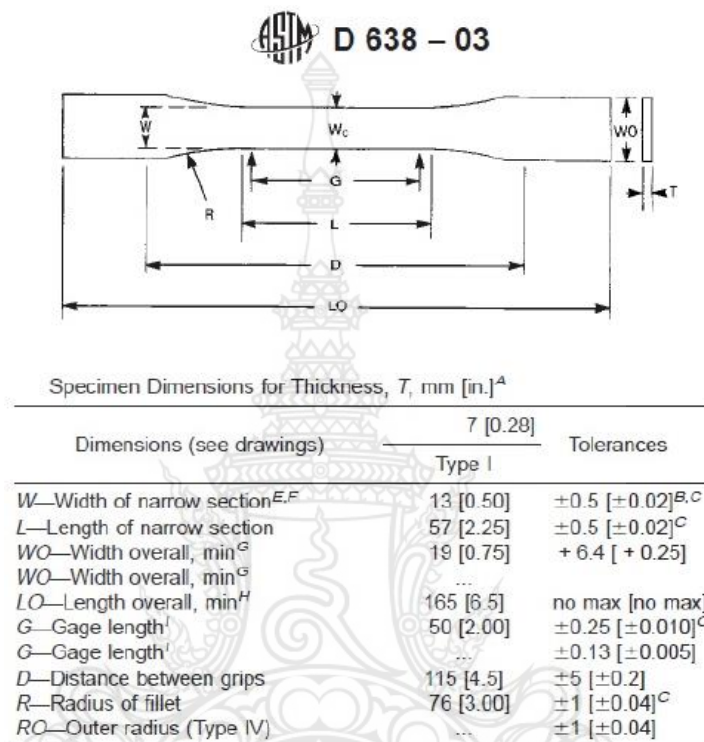
3.4.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วย เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ LLOYD INSTRUMENTS รุ่น LR 10K plus ที่มีขนาดแรงดึงสูงสุด 10 kN ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบแรงดึงและลักษณะการจับยึดชิ้นงาน

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



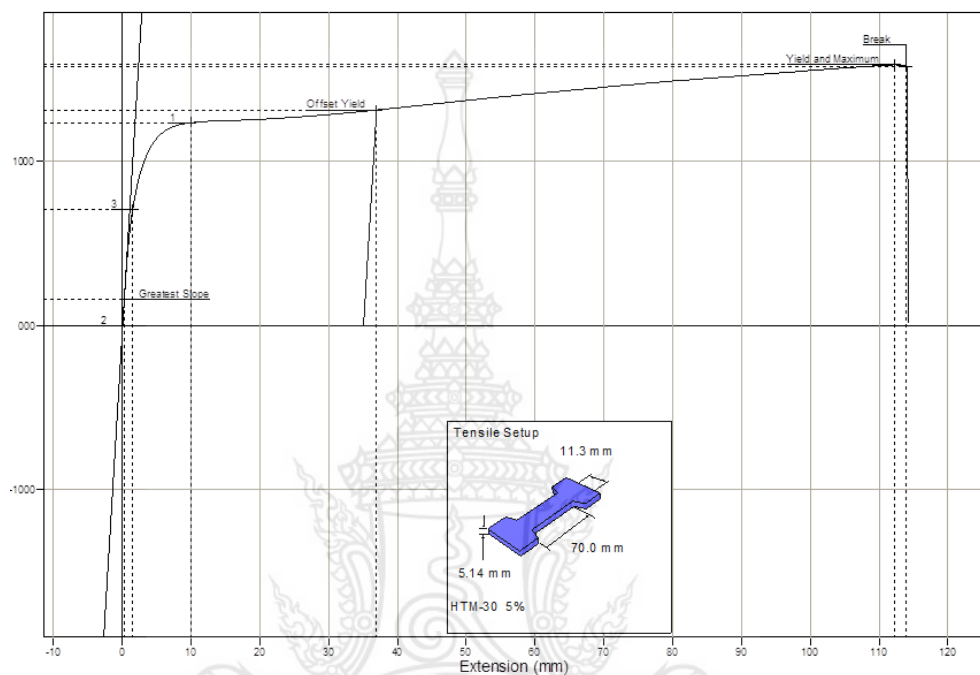
รูปที่ 3.13 ค่าพิกัดของส่วนต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 3.14 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง

หลังจากนั้นจึงทำการดึงชิ้นทดสอบให้แยกออกจากกันด้วยความเร็วของการดึงคงที่เท่ากับ 50 mm/min การทดสอบแรงดึงจะต้องเฝ้าติดตามและบันทึกแรงดึง (F) อัตราการยืดตัวของวัสดุ (ΔL)

แล้วทำการแปลงกลับเป็นค่า Engineering stress และ strain ดังตัวอย่างกราฟผลการทดสอบแรงดึงที่แสดงในรูปที่ 3.19 ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามารถนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่าความเค้นคราก (Yield strength, σ_y) ความเค้นแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength, σ_u) ความเค้น ณ จุดแตกหัก (breaking strength, σ_b) และความยืด ณ จุดแตกหัก (elongation at break, % ϵ)



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

3.4.3 การทดสอบแรงกระแทก

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้เป็นการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.16 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

3.4.4 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block on Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบ ดังลักษณะเครื่องที่แสดงในรูปที่ 2.20 ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอของห้องปฏิบัติการโทรโบลอยอุตสาหกรรมการผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิต ในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยกำหนดขนาดขนาดความกว้างxความยาวxความหนา เท่ากับ 10x10x10 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีลักษณะแสดงในรูปที่ 2.20 และ 3.19 ซึ่งพื้นผิวของชิ้นทดสอบ ถูกเตรียมขึ้นด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 พื้นผิววงแหวนมีความหยาบเท่ากับ 0.2 ไมครอน ทำจากเหล็กกล้าแข็ง (AISI 52100) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 มิลลิเมตร ที่ผ่านการชุบแข็งที่ค่าความแข็ง 60 HRC แรงที่ใช้กดลงบนชิ้นทดสอบเท่ากับ 150 นิวตัน เวลาที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 180 นาที ความเร็วของการหมุนวงแหวนเท่ากับ 300 มิลลิเมตรต่อวินาที ด้วยระยะทางของการหมุนทดสอบ 5,000 เมตร โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะของการทดสอบแบบแห้ง สำหรับในส่วนของการวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบนั้น วิเคราะห์จากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดด้วยทศนิยม 4 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 3.21 คำนวณอัตราการสึกหรอด้วยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบเพื่อหาปริมาตรที่สูญเสีย และนำไปหารกับผลคูณระหว่างแรงที่ใช้ในการกดบน Block กับระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ [5]

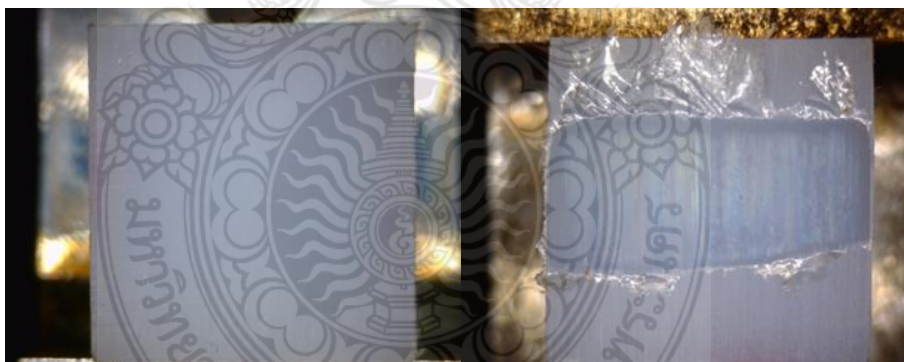


รูปที่ 3.17 เครื่องชั่งน้ำหนัก Shimadzu digital รุ่น ATX224 ความละเอียด 0.1 mg (0.0001 g) สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ

หลังจากขึ้นทดสอบผ่านการหมุนทดสอบจนได้ระยะทาง 5,000 เมตร ตามที่กำหนดแล้ว นำขึ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบและฟิกเจอร์จับยึดขึ้นทดสอบไปทำการบันทึกภาพหลักฐานรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการสึกหรอ ดังตัวอย่างการถ่ายภาพรอยสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งลักษณะรอยสึกหรอของขึ้นทดสอบหลังจากการทดสอบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.18 ชุดอุปกรณ์บันทึกภาพรอยสึกหรอของขึ้นทดสอบ



รูปที่ 3.19 ลักษณะการสึกหรอของขึ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ

3.4.4.1 ขั้นตอนการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการทดสอบการสึกหรอ

ขั้นตอนการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการทดสอบการสึกหรอ

ประกอบด้วย

1. เตรียมขึ้นทดสอบทดสอบการสึกหรอให้ได้ขนาด 10×10×10 มิลลิเมตร
2. นำขึ้นทดสอบทดสอบการสึกหรอมาชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ยี่ห้อ Shimadzu digital รุ่น ATX224

3. จับยึดชิ้นทดสอบด้วยฟิกเจอร์จับยึดชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบการสึกหรอ
4. นำฟิกเจอร์ที่ได้จับยึดชิ้นทดสอบมาจับยึดเข้าเครื่องทดสอบการสึกหรอ ภายใต้แรงกดชิ้นทดสอบ 150 นิวตัน
5. เปิดเครื่องทดสอบให้ทำการหมุนเสียดสีชิ้นทดสอบด้วยความเร็วของการเสียดทาน 0.3 เมตรต่อวินาที เป็นระยะทาง 5000 เมตร
6. นำฟิกเจอร์จับยึดชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ และบันทึกภาพรอยสึกหรอ
7. นำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียบนชิ้นทดสอบ

3.4.4.2 การคำนวณและวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ

อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบหลังจากชิ้นทดสอบผ่านการทดสอบการสึกหรอสามารถหาได้จากการคำนวณหาอัตราการสูญเสียบริมาตรของชิ้นทดสอบเทียบกับแรงกดชิ้นทดสอบ คุณระยะทางของการทดสอบ ซึ่งสามารถหาคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

$$W = \frac{V_{loss}}{N \cdot d} \quad (3.1)$$

โดย

W = อัตราการสึกหรอ ในหน่วย mm^3/Nm

V_{loss} = ปริมาตรที่สูญเสียบริมาตร หน่วย mm^3

N = แรงกดชิ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการสึกหรอ หน่วย N

d = ระยะทางที่ทำการทดสอบ หน่วย m

ซึ่ง V_{loss} ได้จากสมการ

$$V_{loss} = V_o - V_f \quad (3.2)$$

โดย

V_o = ปริมาตรชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ

V_f = ปริมาตรชิ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากปริมาตร (V) ของชิ้นทดสอบได้จากสมการ

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.3)$$

ดังนั้น สมการอัตราการศึกษาหรือของขึ้นทดสอบคือ

$$W = \frac{m_o - m_f}{\rho \cdot N \cdot d} \quad (3.4)$$

โดย

m_o = มวลของขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบการศึกษาหรือ หน่วย g

m_f = มวลของขึ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการศึกษาหรือ หน่วย g

ρ = ค่าความถ่วงจำเพาะของขึ้นทดสอบ หน่วย g/cm³

N = แรงกดขึ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการศึกษาหรือ หน่วย N

d = ระยะทางที่ทำการทดสอบ หน่วย mm



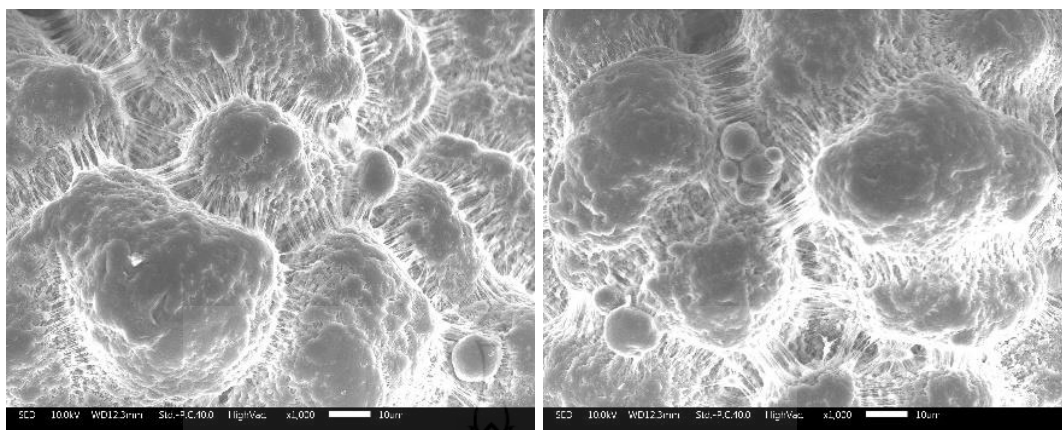
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

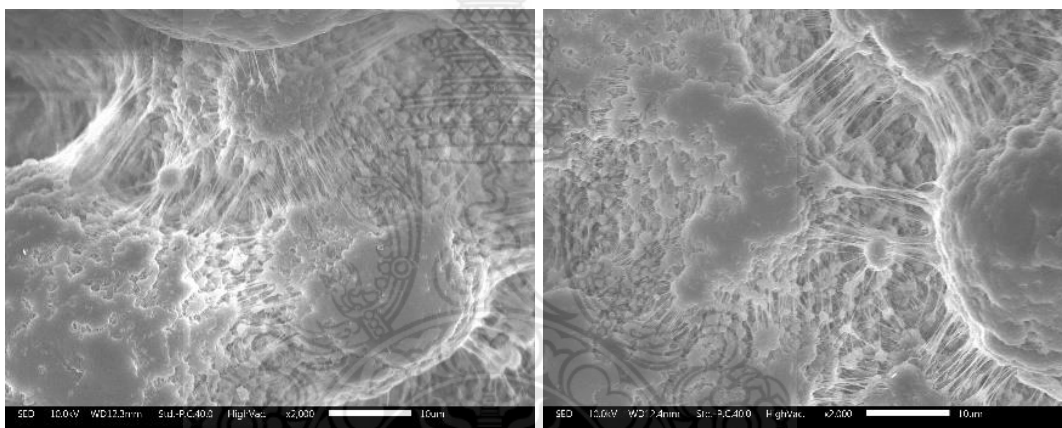
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยทั้งหมดที่ได้ทำการดำเนินการด้วยกระบวนการที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 ประกอบด้วยการวิเคราะห์ผลของการทดสอบสมบัติทางกลและผลของการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของผง UHMWPE โดยพิจารณาจากสมบัติทางกลที่ดีที่สุดและความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุด ผสมฟิลเลอร์ที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่อัตราการผสมร้อยละ 5, 8 และ 10 และที่ขนาดอนุภาคต่างๆ ประกอบด้วย Calcined Al_2O_3 B-grade 5 μm , Al_2O_3 HTM 2-5 μm , Al_2O_3 0.3 μm (300 nm), 0.05 μm (50 nm) เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบหาปริมาณฟิลเลอร์อลูมิเนียมออกไซด์แต่ละขนาดอนุภาคที่มีผลต่อสมบัติทางกลและอัตราการสึกหรอ ซึ่งผลที่ได้จะนำไปสู่การต่อยอดงานวิจัยอื่นได้ต่อไป โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

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

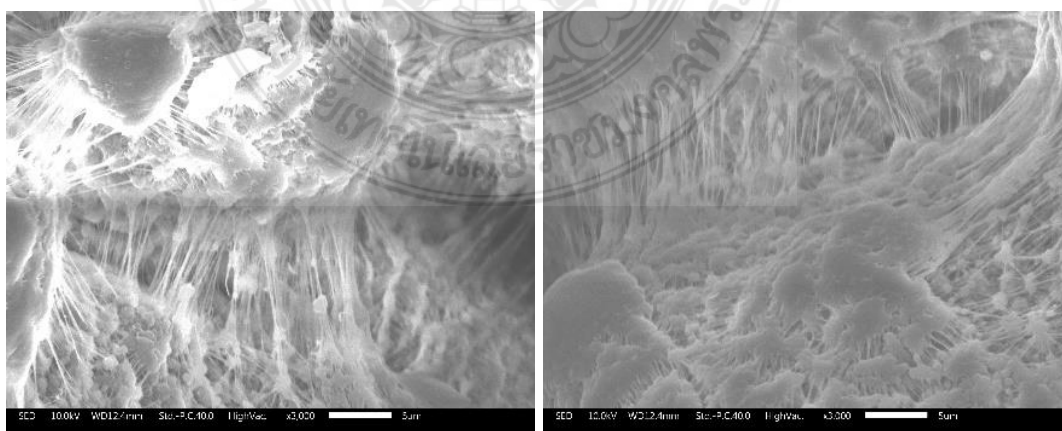
วัสดุฟิลเลอร์ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ ก่อนทำการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของผงวัสดุที่ทดสอบ จะต้องทำการเคลือบผิวทองคำขาวลงบนผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Sputter Coaters ยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES ซึ่งใช้สำหรับการเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสุดท้ายการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าในสภาวะความเป็นสุญญากาศสูง (HV) ซึ่งจะใช้โลหะฉาบลงบนตัวอย่างภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้า จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเล็กมาก ๆ ของตัวอย่างทางชีวภาพ และยังสามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณของผงวัสดุทดสอบด้วย ชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX (IE-350) จากนั้นนำชิ้นงานทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) : ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Miniflex ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถบอกได้ว่าโครงสร้างผลึกของสารนั้นมีโครงสร้างแบบใด หรือเป็นวัสดุอะไร โดยเครื่องวิเคราะห์ทั้งหมดที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคชิ้นวัสดุทดสอบของ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง โดยลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 และ 3 มิติ ดังรูปที่ 4.1-4.6 ผลลัพธ์ที่ได้คือการยืนยันว่าวัสดุที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็น UHMWPE และ Al_2O_3 อย่างแท้จริง



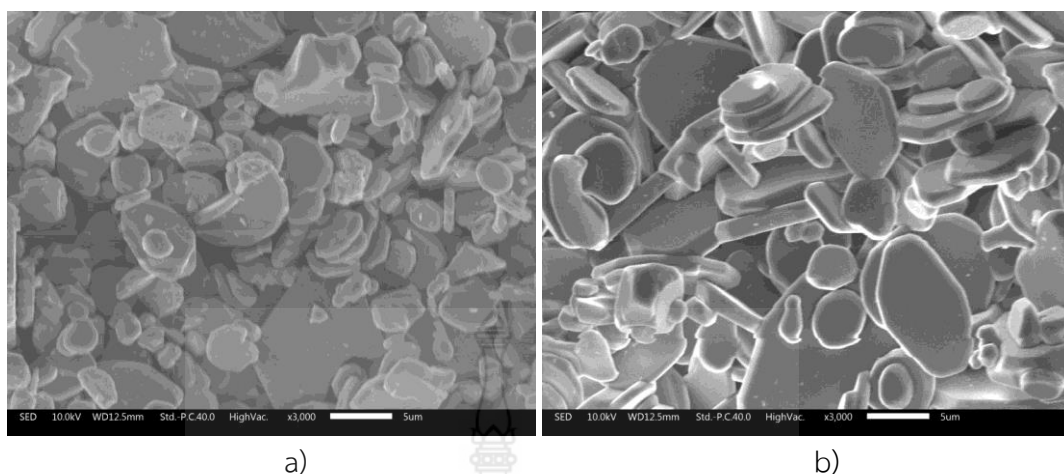
รูปที่ 4.1 รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



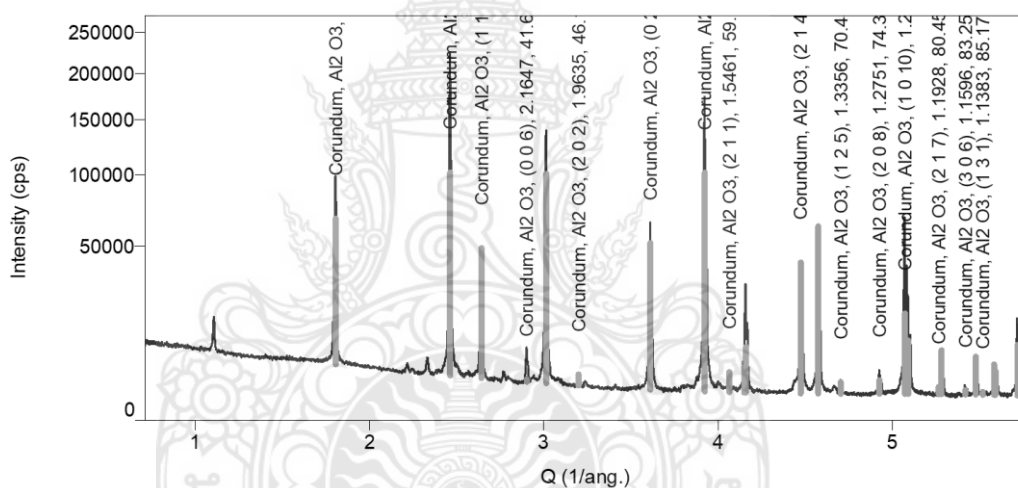
รูปที่ 4.2 รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



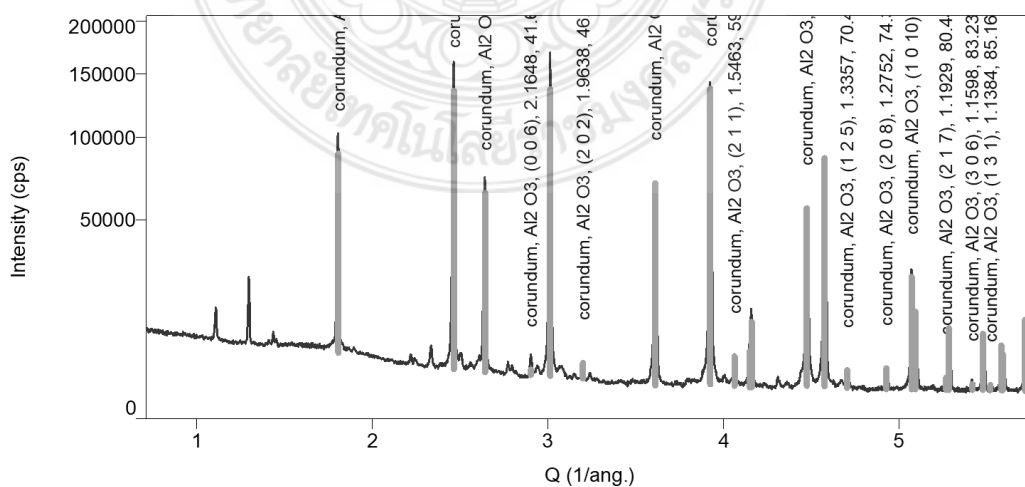
รูปที่ 4.3 รูปลักษณะพื้นฐานของ UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



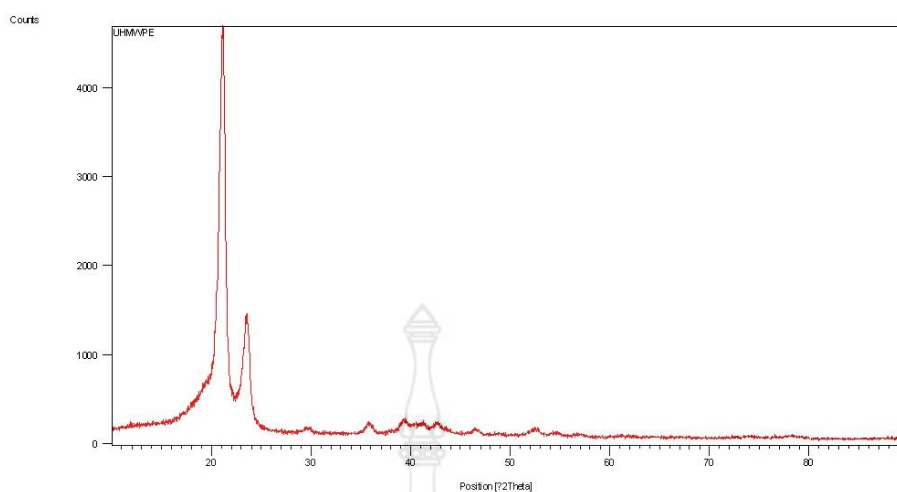
รูปที่ 4.4 รูปลักษณะสัณฐานของ Al_2O_3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, a) Al_2O_3 HTM 30 grade ที่กำลังขยาย $\times 3000$ และ b) Al_2O_3 Calcined B grade ที่กำลังขยาย $\times 3000$



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al_2O_3 HTM 30



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ Calcined Al_2O_3 B grade



รูปที่ 4.7 XRD Pattern ของ UHMWPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

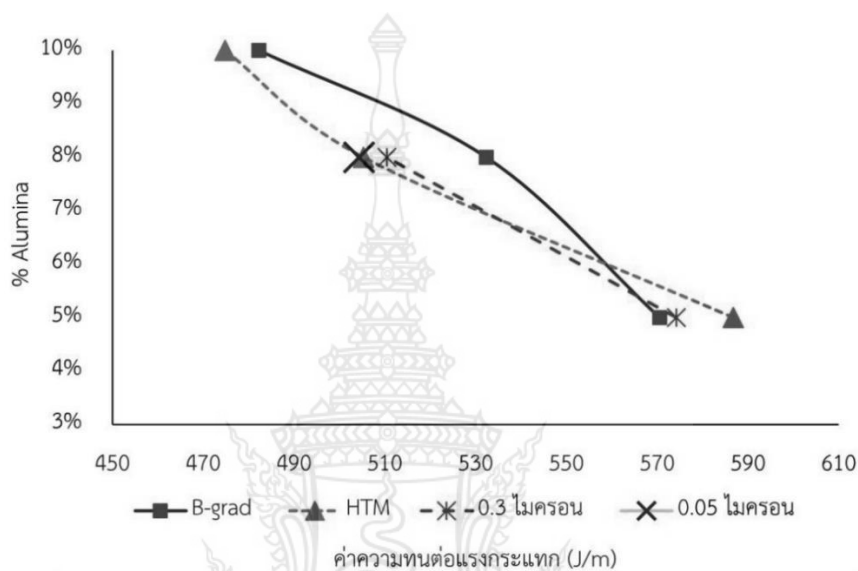
จากรูปที่ 4.4 พบว่า Alumina Al_2O_3 B-Grade มีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 5 ไมครอน และขนาดผงจะใกล้เคียงกัน แต่สำหรับ Alumina Al_2O_3 HTM 30 มีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 2-5 ไมครอน ขนาดไม่สม่ำเสมอ จากรูปที่ 4.5-4.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer : (XRD) ได้บ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างด้วย XRD Pattern ของ อลูมิเนียมออกไซด์และ UHMWPE ได้อย่างชัดเจน เป็น Corundum Al_2O_3 มีรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล รูปหกเหลี่ยม

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

4.2.1 การทดสอบการกระแทก

ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก มีขนาดชิ้นงานทดสอบ ความกว้างxความหนา โดยประมาณ เท่ากับ 12.7×10 มิลลิเมตร มีความลึกของรอยบาก 2.54 มิลลิเมตร ที่มีการผสมระหว่าง UHMWPE ที่เป็นวัสดุหลัก และผสมฟิลเลอร์ที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ขนาดอนุภาค 0.3 μm (300 nm), 0.05 μm (50 nm), Calcined Al_2O_3 B-grade 5 μm และ Al_2O_3 HTM 2-5 μm ที่อัตราส่วนผสม อลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5, 8 และ 10 แต่ละอัตราส่วนผสมผ่านการทดสอบแรงกระแทกด้วยชิ้นงาน ทดสอบชุดละ 6 ชิ้นทดสอบ ทำให้ได้ผลการทดสอบคือค่า Impact Energy (J) และค่าความทนต่อ แรงกระแทก (J/m) จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกต่ำลง แม้ว่าการเพิ่มร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ลงไป ใน UHMWPE ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าของความแข็งสูงขึ้นก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสม อลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5 พบว่า Al_2O_3 HTM 2-5 μm จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่า อลูมิเนียมออกไซด์เกรดอื่นๆ ด้วยค่าที่สูงถึง 586.8 J/m ในด้านขนาดอนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ ตั้งแต่ 0.05 μm , 0.3 μm และ 5 μm แม้ว่าเกรดของอลูมิเนียมออกไซด์จะต่างกัน แต่ก็ได้ส่งผลให้

ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกแตกต่างกันมีนัยสำคัญ และขนาดอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากจะยิ่งต้นทุนราคาที่สูงตามไปด้วย ซึ่งต้องมองในด้านของต้นทุนที่จะเป็นบทสรุปนำไปใช้ต่อยอดสู่การใช้งานจริงอย่างเป็นรูปธรรม สำหรับการพิจารณาในด้านค่าความทนต่อแรงกระแทกเบื้องต้นนี้ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 5 และ 8 เป็นส่วนผสมที่ควรนำไปพิจารณาประกอบกับค่าการทดสอบด้านอื่นๆ ต่อไป (ทั้งนี้อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 ดีกว่าที่ร้อยละ 8)



รูปที่ 4.8 ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ร้อยละของ Alumina บนเกรดต่างๆ

Alumina	B-grade	HTM30	0.3 μm	0.05 μm
5%	570.54	586.79	574.27	-
8%	532.36	505.31	510.47	504.35
10%	482.26	474.81	-	-

4.2.2 การทดสอบความแข็ง

การวัดความแข็งที่ถูกต้องจะต้องเลือกการทดสอบให้ถูกต้อง เช่น ในการทดสอบนี้จะเลือกเครื่องวัดความแข็ง Durometer ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 210 °C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 90 นาที ใช้การทดสอบแบบ Shore D ที่หัวเข็มมีลักษณะแหลม (หัวเข็มเป็นส่วนสำคัญมากที่จะต้องเลือกให้ถูกต้อง) การวัดความแข็งในหน่วย Shore D นั้นจะวัดความแข็งออกมาด้วยการพิจารณาจาก

ระยะของหัวเข็มที่จมลงไปใ้เนื้อวัสดุแล้วแปลงค่าออกมาเป็นค่าความแข็งในหน่วย Shore ผลการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 (JIS K 7215 D, ISO R 868 D) ผลของค่าที่เพิ่มขึ้นจะหมายถึงวัสดุนั้นมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดอนุภาคผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่า จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น สำหรับชนิดของ Calcined Al₂O₃ B-grade 5 µm และ Al₂O₃ HTM 2-5 µm เมื่อผสมลงไปใ้ UHMWPE แล้วจะไม่เห็นความแตกต่างของค่าความแข็ง ทั้งนี้ความแตกต่างของอนุภาคที่เล็กลง คือ 0.3 µm หรือ 0.05 µm จะไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 และ 8 ของ Calcined Al₂O₃ B-grade 5 µm และ Al₂O₃ HTM 2-5 µm เป็นสิ่งที่ควรนำไปประกอบการพิจารณาเลือกใช้ ผลที่ได้พบว่า มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 56-62 shore D ซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุดคือ 62 shore D

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งที่ร้อยละของ Alumina บนเกรดต่างๆ

Specimens	Durometer Hardness (Shore D)										Average	SD
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
B-grade 5%	56	56	56	56	56	56	56	58	58	58	56.6	0.92
B-grade 8%	58	58	58	58	59	60	60	59	57	57	58.4	1.02
B-grade 10%	59	59	59	59	60	60	60	60	58	58	59.2	0.75
HTM-30 5%	59	59	59	60	60	60	60	60	55	56	58.8	1.72
HTM-30 8%	56	60	60	60	60	60	60	60	60	56	59.2	1.60
HTM-30 10%	59	59	59	59	60	60	60	60	59	59	59.4	0.49
Alumina 0.3 µm 5%	59	61	62	62	62	62	62	62	58	58	60.8	1.66
Alumina 0.3 µm II 8%	59	59	59	59	60	61	61	61	59	59	59.7	0.90
Alumina 0.05 µm 8%	63	63	63	64	64	64	63	60	58	57	61.9	2.47

4.2.3 การทดสอบแรงดึง

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง ณ ห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พบว่า ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ 210°C แรงดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 90 นาที จะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Breaking Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of elasticity (MPa) ด้วยการเตรียมชิ้นงานทดสอบชุดละ 5 ชิ้นงานและนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละค่า จากการทดสอบพบว่าที่ส่วนผสมระหว่าง UHMWPE และ อลูมิเนียมออกไซด์ที่เหมาะสม คือ UHMWPE+HTM-30 5% ค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจาก UHMWPE ผสมกับอนุภาคนิโม่ขนาด 0.3 μm , 0.05 μm , Calcined Al_2O_3 B-grade 5 μm และ Al_2O_3 HTM 2-5 μm

Specimens	Elongation at Break (%)					Modulus of elasticity (MPa)															
	1	2	3	4	5	Average	SD	1	2	3	4	5	Average	SD							
(140°C, 10 MPa, 45min)																					
UHMWPE + B-grad 5%	253	255	258	253	252	254.24	1.95	795	794	797	795	802	796.62	3.13							
UHMWPE+B-grad 8%	256	255	255	257	259	256.42	1.54	845	855	844	848	847	847.66	3.77							
UHMWPE+B-grad 10%	239	238	243	239	239	239.52	1.6	909	902	907	913	909	907.99	3.35							
UHMWPE+HTM-30 5%	265	260	268	266	270	265.8	3.2	781	784	781	790	786	784.46	3.28							
UHMWPE+HTM-30 8%	228	225	227	226	230	227.33	3.79	832	838	837	834	839	836.05	2.5							
UHMWPE+HTM-30 10%	248	250	257	252	248	251.22	2.46	869	861	866	867	864	865.54	2.79							
UHMWPE+Al2O3 0.3 5%	262	258	260	260	263	260.34	1.81	853	854	857	858	852	854.75	2.23							
UHMWPE+Al2O3 0.3 8%	256	258	258	265	253	258.09	3.77	886	889	886	883	881	885.04	2.94							
UHMWPE+Al2O3 0.05 8%	252	253	255	255	252	253.42	1.41	884	889	887	908	888	889.09	4.84							
Specimens	Yield Strength (MPa)					Ultimate Tensile Strength (MPa)					Breaking Strength (MPa)										
(140°C, 10 MPa, 45min)	1	2	3	4	5	Average	SD	1	2	3	4	5	Average	SD	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE + B-grad 5%	12.2	12.2	12.2	12.7	12.7	12.41	0.25	29	28.4	29.5	30.2	29	29.2	0.6	25.5	25.8	26.3	26	26.6	26.01	0.39
UHMWPE+B-grad 8%	12.3	12.2	12.2	12.2	12.3	12.21	0.05	28.8	29.1	28.7	29.8	29.5	29.16	0.42	27.7	28.9	28.4	29	28.7	28.52	0.46
UHMWPE+B-grad 10%	11.3	10.9	10.6	10.6	11	10.88	0.27	30.9	28.9	28.3	29.1	30.6	29.57	1	28.7	28.4	29.5	28.8	29.4	28.95	0.44
UHMWPE+HTM-30 5%	20.6	21.3	20.2	20.2	20.3	20.52	0.43	29	29.4	30.5	30.9	30	29.96	0.71	23.1	23.1	22.8	22.8	22.4	22.83	0.25
UHMWPE+HTM-30 8%	10.6	11.2	11.5	10.8	10.9	11.01	0.33	29.7	29	28.5	28.2	27.8	28.63	0.87	26.9	26.6	27.8	27.8	27.6	27.31	0.49
UHMWPE+HTM-30 10%	11.8	11.5	10.7	11.9	11	11.36	0.46	29.2	28.6	28.8	30.5	28.9	29.19	0.69	29.4	29.2	30.1	28.8	29.8	29.45	0.46
UHMWPE+Al2O3 0.3 5%	13	12.2	12.4	12.2	12.7	12.5	0.33	29.8	28.8	29.7	30.3	31	29.91	0.71	26.9	26.9	27.2	27.6	26.8	27.06	0.3
UHMWPE+Al2O3 0.3 8%	21.9	22.2	21.7	21.9	21.5	21.86	0.22	28.2	30.7	28.7	29.2	29	29.15	0.82	29.6	30.7	29.8	29.2	29	29.65	0.57
UHMWPE+Al2O3 0.05 8%	11.1	10.9	12.1	11.5	10.7	11.26	0.48	30.5	28.8	29.6	31	29.5	29.85	0.78	28.4	29	28.7	29.4	29.7	29.02	0.47

4.2.4 การทดสอบการสึกหรอ

ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นของ UHMWPE+Al₂O₃ แสดงดังตารางที่ 4.4 เป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นของ UHMWPE+Al₂O₃ จากการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของอลูมิเนียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น 5, 8 และ 10 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นไม่มากนักหรืออาจจะไม่มีระยะที่สำคัญมากพอ โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 1.2446958 g/cm³ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการสึกหรอ และจากตารางพบว่าที่ส่วนผสม UHMWPE+HTM-30 5% จะมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 8.66E-11 mm³/N.m ผลการทดสอบอัตราการสึกหรอในตารางที่ 4.5 ของ UHMWPE+B grade ที่ร้อยละ 5, 8 และ 10 จะมีค่าอัตราการสึกหรอเท่ากับ 7.66E-11, 8E-11 และ 5.33E-11 ซึ่งอัตราการสึกหรอลดลงตามร้อยละที่เพิ่มขึ้นของ Al₂O₃ และจากภาพรวมพบว่า ขนาดอนุภาคของ Al₂O₃ หากมีขนาดเล็กลงมากเท่าไร โดยที่ปริมาณร้อยละของ Al₂O₃ เท่ากัน จะส่งผลให้อัตราการสึกหรอลดลงด้วย เช่น ถ้า UHMWPE+B-grade 8%, UHMWPE+HTM-30 8%, UHMWPE+Al₂O₃ 0.3 II 8% และ UHMWPE+Al₂O₃ 0.05 8% จะส่งผลให้มีค่าอัตราการสึกหรอลดลงเท่ากับ 8E-11, 5.33E-11, 4.33E-11 และ 4.33E-11 ตามลำดับ ในด้านของตัวแปรที่เป็นอัตราการสึกหรออาจเลือกใช้อัตราส่วนผสมของ Al₂O₃ ที่ร้อยละ 5 คือ UHMWPE+HTM-30 5% แม้ว่าอัตราการสึกหรอจะไม่ใช้ค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาในภาพรวมจากผลการทดสอบทั้งหมดที่กล่าวมาพร้อมกับต้นทุนของ Al₂O₃ HTM-30 พบว่าโครงการวิจัยนี้จะเลือกใช้ Al₂O₃ HTM-30 เป็นฟิลเลอร์ผสมลงใน UHMWPE เพื่อพัฒนาต่อยอดสู่การใช้งานจริงและนำไปใช้ในการผลิตล้อรถ

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหนาแน่นของ UHMWPE+Al₂O₃

Specimens (140°C, 10 MPa, 45min)	Coefficient of friction, μ		Wear rate (mm ³ /N.m)		Density (g/cm ³)	
	Average	SD	Average	SD	Average	SD
UHMWPE+B-grade 5%	0.12	0.01	7.66E-11	4.1E-11	1.24643	0.02
UHMWPE+B-grade 8%	0.10	0.01	8.00E-11	1.4E-11	1.24781	0.03
UHMWPE+B-grade 10%	0.10	0.01	5.33E-11	3.3E-11	1.24779	0.02
UHMWPE+HTM-30 5%	0.12	0.01	8.66E-11	5.4E-11	1.24646	0.04
UHMWPE+HTM-30 8%	0.10	0.01	5.33E-11	3.3E-11	1.24752	0.02
UHMWPE+HTM-30 10%	0.10	0.01	7.63E-11	2.9E-11	1.24767	0.02
UHMWPE+Al ₂ O ₃ 0.3 5%	0.10	0.01	7.66E-11	4.1E-11	1.24547	0.02
UHMWPE+Al ₂ O ₃ 0.3 II 8%	0.10	0.01	4.33E-11	1.9E-11	1.24628	0.03
UHMWPE+Al ₂ O ₃ 0.05 8%	0.10	0.01	4.33E-11	1.9E-11	1.24719	0.03

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการสึกหรอของ UHMWPE ผสมกับอนุภาค Al₂O₃ ที่ 0.3 µm, 0.05 µm, Calcined Al₂O₃ B-grade 5 µm และ Al₂O₃ HTM 2-5 µm

Specimens	Specimen			Weight before testing (g)										Weight after testing (g)			Weight loss (g)			Density			Wear rate (mm ³ /N.m)			
	No.	1	2	3	4	5	Average	SD	1	2	3	4	5	Average	SD	m ₀ m _r	Average	SD	Value	Average	SD	Value	Average	SD		
UHMWPE+B-grade 5%	1	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.9372	8E-05	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	9E-05	8E-05	0.00005	3E-05	1.3E-10	7.66E-11	4E-11	1.3E-10	7.66E-11	4E-11	
	2	0.973	0.973	0.973	0.973	0.973	0.9727	9E-05	0.973	0.973	0.973	0.973	0.973	0.973	0.973	8E-05	2E-05		1.2464	3E-11						
	3	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.9596	0.0001	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	6E-05	4E-05			7E-11						
UHMWPE+B-grade 8%	1	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	0.9242	8E-05	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	0.0001	4E-05	0.00005	1E-05	1.2478	7E-11	8E-11	1E-11	7E-11	8E-11	1E-11
	2	0.903	0.903	0.903	0.903	0.903	0.9033	9E-05	0.903	0.903	0.903	0.903	0.903	0.903	0.903	8E-05	4E-05			7E-11						
	3	0.954	0.955	0.954	0.954	0.955	0.9543	0.0001	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	0.954	8E-05	6E-05			1E-10						
UHMWPE+B-grade 10%	1	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.9951	0.0001	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	8E-05	6E-05	0.00003	2E-05	1.2478	1E-10	5.33E-11	3E-11	1E-10	5.33E-11	3E-11
	2	0.962	0.962	0.962	0.962	0.962	0.962	9E-05	0.962	0.962	0.962	0.962	0.962	0.962	0.962	0.0001	2E-05			3E-11						
	3	0.968	0.968	0.968	0.968	0.968	0.9681	6E-05	0.968	0.968	0.968	0.968	0.968	0.968	0.968	8E-05	2E-05			3E-11						
UHMWPE+HTM-30 5%	1	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.0172	4E-05	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	1.017	8E-05	2E-05	0.00005	3E-05	1.2465	3E-11	8.66E-11	5E-11	3E-11	8.66E-11	5E-11
	2	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.9782	8E-05	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.978	0.0001	4E-05			7E-11						
	3	0.958	0.959	0.958	0.958	0.958	0.9583	0.0001	0.958	0.958	0.958	0.958	0.958	0.958	0.958	6E-05	0.0001			1.6E-10						
UHMWPE+HTM-30 8%	1	0.949	0.949	0.949	0.949	0.949	0.9489	9E-05	0.949	0.949	0.949	0.949	0.949	0.949	0.949	0.0001	2E-05	0.00003	2E-05	1.2475	3E-11	5.33E-11	3E-11	3E-11	5.33E-11	3E-11
	2	0.944	0.944	0.944	0.944	0.944	0.9437	8E-05	0.944	0.944	0.944	0.944	0.944	0.944	0.944	6E-05	6E-05			1E-10						
	3	0.927	0.926	0.927	0.926	0.926	0.9264	6E-05	0.927	0.927	0.927	0.926	0.926	0.926	0.926	8E-05	2E-05			3E-11						
UHMWPE+HTM-30 10%	1	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.0001	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	0.984	6E-05	8E-05	0.0001	2E-05	1.2477	1.3E-11	7.63E-11	3E-11	1.3E-11	7.63E-11	3E-11
	2	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.9451	0.0001	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	8E-05	0.0001			2E-10						
	3	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.9451	0.0001	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.0001	0.0001			1.6E-11						
UHMWPE+AL2O3 0.3 5%	1	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	0.9236	9E-05	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	0.924	8E-05	2E-05	0.00005	3E-05	1.2455	3E-11	7.66E-11	4E-11	3E-11	7.66E-11	4E-11
	2	0.936	0.936	0.936	0.936	0.936	0.9362	0.0001	0.936	0.936	0.936	0.936	0.936	0.936	0.936	9E-05	8E-05			1.3E-10						
	3	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.9604	6E-05	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	8E-05	4E-05			7E-11						
UHMWPE+AL2O3 0.3 II 8%	1	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.0801	0.0001	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	6E-05	4E-05	0.00003	1E-05	1.2463	7E-11	4.33E-11	2E-11	7E-11	4.33E-11	2E-11
	2	1.036	1.036	1.036	1.036	1.036	1.036	6E-05	1.036	1.036	1.036	1.036	1.036	1.036	1.036	0.0001	2E-05			3E-11						
	3	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.1373	9E-05	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	1.137	0.0001	2E-05			3E-11						
UHMWPE+AL2O3 0.05 8%	1	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	0.9407	6E-05	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	0.941	6E-05	4E-05	0.00003	1E-05	1.2472	7E-11	4.33E-11	2E-11	7E-11	4.33E-11	2E-11
	2	0.925	0.926	0.926	0.926	0.926	0.9255	6E-05	0.926	0.926	0.926	0.926	0.926	0.926	0.926	0.0001	2E-05			1.2472	3E-11					
	3	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.9246	0.0001	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	0.925	8E-05	2E-05			3E-11						

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ของโครงการที่ต้องการศึกษาหาอัตราการผสมที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE จากผง UHMWPE ด้วยกรรมวิธี Hot compression molding process ที่ให้ค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield strength) และอัตราการสึกหรอที่เป็นไปได้ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ผลิตล้อรันแฟลท หรือนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมวัสดุ ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หรืออื่นๆ และผลจากการดำเนินงานศึกษาวิจัยทั้งหมดที่ได้มีการทดลองวิเคราะห์ทดสอบและอภิปรายผลการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยผลการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล คือ การทดสอบความแข็ง, การทดสอบความต้านทานแรงดึง, การทดสอบแรงกระแทกและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite ที่ผสมฟิลเลอร์เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ขนาดอนุภาค Calcined Al_2O_3 B-grade 5 μm , Al_2O_3 HTM 2-5 μm , Al_2O_3 0.3 μm (300 nm), 0.05 μm (50 nm) ภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210°C และเวลาดังอุณหภูมิที่ 90 นาที สามารถสรุปผลการดำเนินการศึกษาวิจัยออกเป็นกลุ่มการทดลองและตอบวัตถุประสงค์ของงานวิจัยประกอบด้วย

1. ได้ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกลและทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของโพลีเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบเพื่อให้สามารถนำไปผลิตล้อ Run-flat และสามารถนำข้อมูลไปใช้ในกระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อออกแบบรูปแบบของล้อรันแฟลทได้ต่อไป

2. ทราบส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุเชิงประกอบที่มี UHMWPE เป็นส่วนผสมหลักสำหรับใช้ผลิตล้อรันแฟลทและทราบสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปล้อรันแฟลท

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยได้เลือกใช้เกรดของ Al_2O_3 เป็น Al_2O_3 HTM-30 มีขนาดอนุภาคผงไม่สม่ำเสมอเคละเคล้ากันไปอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 μm และปริมาณการผสม Al_2O_3 ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite คือ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM-30 ที่อัตราส่วนร้อยละ 95:5 โดยพิจารณาทั้งในด้านสมบัติของวัสดุและต้นทุน ขึ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะความดัน 5 MPa อุณหภูมิ 210 °C และ เวลาดังอุณหภูมิ 90 นาที สามารถสรุปสมบัติทางกลต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ในการทดสอบการกระแทกที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน พบว่า Al_2O_3 HTM-30 ขนาด 2-5 μm จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าลูมิเนียมออกไซด์เกรดอื่นๆ ด้วยค่าที่สูงถึง 586.8 J/m ที่อัตราส่วนผสมลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5
2. ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 56-62 shore D ซึ่งมีค่าความแข็งสูงสุดคือ 62 shore D ที่ส่วนผสม UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 2-5 μm
3. การทดสอบแรงดึงจะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa) = 20.52 MPa, Ultimate Tensile Strength (MPa) = 29.96 MPa, Breaking Strength (MPa) = 22.83 MPa, Elongation at Break (%) = 265.8% และ Modulus of elasticity (MPa) = 784.46 MPa
4. อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน พบว่า ที่ส่วนผสม UHMWPE ผสม HTM-30 ที่ 5% มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ค่าอัตราการสึกหรอ และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.12, $8.66E-11$ mm³/N.m, และ 1.2446958 g/cm³ ตามลำดับ

จากการทบทวนข้อมูลเชิงวิชาการและข้อมูลจากภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตล้อรันแฟลทชนิด Self-Supporting Tire พบว่า บริษัท RunFlat International [61] ในประเทศอังกฤษ ซึ่งเป็นบริษัทในเครือของบริษัท Westley Plastics ได้ใช้เทคโนโลยีโพลีเมอร์ระดับแนวหน้าสร้างยางรันแฟลทขึ้นมา ได้กำหนดคุณสมบัติหลักของล้อรันแฟลทชนิด Self-Supporting Tire ประกอบด้วย โครงสร้างล้อรันแฟลทใช้งานได้ที่อุณหภูมิการทำงานตั้งแต่ -40 °C ถึงมากกว่า 150 °C มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานยต่ำเพื่อลดความร้อนภายในยางในโหมดไม่มีลม (ยางแบน) มีความหนาแน่นที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ไม่มีโพรง) เพื่อดูดซับแรงกระแทกของกระสุนได้ มีโครงสร้างของที่ซับซ้อน (ไม่ใช่สายโซ่เดี่ยว) ทำให้ทั้งเบาและทนทานมาก ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมานี้เป็นความลับทางการค้า หมายถึงการวิจัยและผลิตวัสดุสำหรับล้อรันแฟลทจะเป็นการใช้งานตามข้อกำหนดของผู้ผลิตนั้น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ ด้วย สำหรับงานวิจัยนี้แม้ว่าจะได้สูตรส่วนผสมดังกล่าวมา แต่ยังคงต้องดำเนินการสร้างแม่พิมพ์และผลิตล้อรันแฟลทขึ้นมาจริง จากนั้นนำมาทดสอบการใช้งาน และตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานต่อไป จึงจะสรุปได้ว่าด้วยวัสดุที่วิจัยผ่านมานี้สามารถนำไปสร้างเป็นล้อรันแฟลทที่สามารถใช้งานได้ในระดับใด

5.2 ข้อเสนอแนะ

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

ร่อน มีความเป็นไปได้ในการทำการทดสอบและทดลองเพื่อพิสูจน์สมบัติทางกลที่อาจส่งผลในทางบวก ก็เป็นไปได้

ในการทดลองขึ้นรูป UHMWPE ผสม Al_2O_3 ด้วยสถานะของการขึ้นรูปที่ประกอบด้วยตัวแปร คือ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาต่างๆ นั้น เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล แต่อาจยังมีตัวแปรอื่นๆ อีกที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน เช่น ชนิดของสารเพิ่มคุณภาพหรือฟิลเลอร์อื่นๆ เช่น คาร์บอน นาโนไฟเบอร์ หรือเส้นใยเสริมแรง (Reinforcement fiber) ชนิดอื่นๆ อีกทั้งในกระบวนการเย็นตัวของวัสดุหลังการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีรูปแบบการเย็นตัวอย่างเร็วหรือการเย็นตัวอย่างช้า ก็ยังส่งผลต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน

เนื่องด้วยอลูมิเนียมออกไซด์มีมากมายหลายชนิดและหลายขนาด ดังนั้นการเลือกใช้ฟิลเลอร์ที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ก็มีผลอย่างมากต่อสมบัติทางกลด้วยเช่นกัน



เอกสารอ้างอิง

- [1] ประกอบ ชาติภักดิ์ และคณะ, “พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบเพื่อความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม,” *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร*, กรุงเทพฯ, 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 ชาติภักดิ์, พลรัชต์ บุญมี, อีระวัฒน์ แม้นดั่ง และราม ชาติภักดิ์, “ล้อ Run-flat สำหรับรถยนต์บรรทุกทุกประเภทขนาดเล็กถึงรถบรรทุก,” 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 compression moulded 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 Takadoun. "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. Dobyichin and V. S. Komalov, "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 Polytetrafluoroethylene," *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," *การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม*, หน้า 651-656, กรกฎาคม 2561.
- [51] นพณ์ช พวงมาลีและคณะ, "อิทธิพลของแรงกระทำความเร็วผิวสัมผัสและความหยาบผิวคู่สัมผัสที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงภายใต้การสั่นไถลแบบแห้ง," *การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม*, หน้า 657-662, กรกฎาคม 2561.
- [52] ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ, ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี, "การปรับปรุงคุณภาพผิววัสดุทางการแพทย์เพื่อลดการสึกหรอ," *การประชุมวิชาการเครื่องช่วยวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย*, ครั้งที่ 25, ตุลาคม 2554.

- [53] วิโรจน์ ฉัตรเกษ, “อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, 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/>

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นางสาวงามพรรณ ชะโล
 วัน เดือน ปีเกิด 17 เมษายน 2536
 ภูมิลำเนา 191 ม.6 ต.แพรक्षा อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10280

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนมัธยมวัดศรีจันทร์ประดิษฐ์	2553
ระดับปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2558

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

-

