

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทาน  
การสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

THE INFLUENCES OF FABRICATION VARIABLES ON WEAR  
RESISTANCE PROPERTIES OF UHMWPE FROM FABRICATION  
WITH RAM EXTRUSION PROCESS

สุรศักดิ์ มะณีโตปะน้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทาน  
การสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

สุรศักดิ์ มะณีโตปะนำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด
ชื่อ - นามสกุล	ศุภศักดิ์ มะธิโคปะนะนำ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2556

### บทคัดย่อ

การขึ้นรูปวัสดุก้อนพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูง(UHMWPE) ต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่เหมาะสม เนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดสูง และไม่มีจุดไหลตัว เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่น ส่งผลให้ UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีทั่วๆไปได้ แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยโมล และกรรมวิธีการอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัดเปรียบเทียบกับวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

งานวิจัยนี้ได้กำหนดสภาวะของตัวแปรการขึ้นรูป ประกอบด้วยอุณหภูมิขึ้นรูปที่ 140-160 °C ความดัน 3-10 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ขึ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปถูกนำมาทดสอบหาความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีแบบ Block on ring ตามมาตรฐาน ASTM G77 ทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกล

ผลการศึกษาวิจัย พบว่า ขึ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa และเวลา คงอุณหภูมิ 30 นาที มีอัตราการสึกหรอต่ำสุด โดยมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าขึ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศถึง 4.75 เท่า เนื่องจากการเกิดครอสลิงค์ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึก ค่าความเค้นแรงดึง ค่าความแข็งที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งจากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของขึ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบพิกัดสัญญาณการสั่นของหมู่ คาร์บอนิลที่บ่งบอกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ มีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและมีผลต่อการลดลงของความต้านทานการสึกหรอ

**คำสำคัญ:** พอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูง ความต้านทานการสึกหรอ กรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

<b>Thesis Title</b>	The Influences of Fabrication Variable on Wear Resistance Properties of UHMWPE form Fabrication with Ram Extrusion Process
<b>Name - Surname</b>	Mr. Surasak Matitopanum
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sirichai Torsakul, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2013

## ABSTRACT

Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) chunks had to produce under proper temperature, pressure and time because UHMWPE had high viscosity and had no pour point when temperature was higher than melting point as same as other type of polyethylene. Therefore, UHMWPE could not be fabricated by using general process. However, compression molding and ram extrusion process are suitable for UHMWPE production. Hence, this research is propose an idea to study and analyze the influence of variables on temperature, pressure and time of stable temperature affecting wear resistance properties of UHMWPE using Ram Extrusion Process. The products of this research will be compared with the imported UHMWPE chunks

Forming process factor in this research were consisted of fabricating temperatures at 140-160°C, the pressure of 3-10 MPa and 30 minutes a constant temperature. Testing specimens after fabrication were tested to find tribological properties by using Block on Ring Method according to ASTM G77 Standard Test Method. Testing of physical, chemical and mechanical properties were conducted in this experiment.

The results revealed that testing specimen after fabrication under the condition of temperatures of 150°C pressure at 5 MPa and 30 minutes of stable temperature, present the lowest wear ratio with 4.75 times of wear resistance higher than imported specimens due to the occurrence of cross-linking within polymer chain. There was higher level of crystallinity, tensile stress and hardness when compared to imported specimens. The analysis on chemical properties of imported specimens found that the peak of vibration signal of carbonyl group (C=O) indicated oxidation reaction at the end of polymer chain, resulting that polymer had its decreased hardness and wear resistance.

**Keywords:** UHMWPE, wear resistance, ram extrusion

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทรมณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่สนับสนุนทางด้านเทคนิคในการเตรียมชิ้นทดสอบ และขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ช่วยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผล จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดามารดาและคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนจนประสบความสำเร็จในหน้าที่การงานและการศึกษา ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Mtec) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

สุรศักดิ์ มะณี โต้ปะนำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญเรื่อง.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์.....	13
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	13
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	14
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 วัสดุ UHMWPE.....	16
2.2 ความเข้าใจพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์.....	17
2.3 กระบวนการขึ้นรูป UHMWPE.....	27
2.4 การสีกรหของวัสดุพอลิเมอร์.....	31
2.5 การทดสอบการสีกรห.....	41
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.1 แผนภาพขั้นตอนการวิจัย.....	50
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.3 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	51
3.4 การเตรียมวัสดุผง UHMWPE สำหรับการขึ้นรูป.....	52

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี.....	55
3.7 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ.....	56
3.8 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล.....	58
3.9 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยี.....	64
บทที่ 4 ผลการทดลองและผลวิเคราะห์.....	69
4.1 ผลการทดลองอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ UHMWPE เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	69
4.2 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties).....	76
4.3 สมบัติทางกล (Mechanical Properties).....	80
4.4 สมบัติทางด้านไทรโบโลยี (Tribological Properties).....	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทดสอบสมบัติต่างๆ ของขึ้นทดสอบ UHMWPE.....	99
ภาคผนวก ข ผลการศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ.....	105
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	140

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ.....	59
ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมูฟิงก์ชั้นต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ.....	73
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	81
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางด้านไทรโบโลยีของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ	89





## สารบัญรูป

หน้า	
รูปที่ 2.1	แผนผังโครงสร้างของพอลิเมออร์..... 17
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและพอลิเอทิลีน..... 18
รูปที่ 2.3	คุณลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE..... 20
รูปที่ 2.4	TEM ไมโครกราฟของ UHMWPE แสดงอาณาบริเวณที่เป็นอสัณฐานและผลึก..... 20
รูปที่ 2.5	DSC trace สำหรับ UHMWPE..... 22
รูปที่ 2.6	พบพีค ที่ $1700\text{ cm}^{-1}$ ในมาตรฐาน ASTM F2102 เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่..... 24
รูปที่ 2.7	ลักษณะการเกิดพีคที่ $910\text{ cm}^{-1}$ และ $965\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Terminal Vinyl (CH=CH <sub>2</sub> ) และ Transvinylene เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมออร์..... 24
รูปที่ 2.8	พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดในแกนภายใต้แรงดึง (ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วของการดึง 30 mm/min) ของชิ้นทดสอบ UHMWPE สองชนิดที่มีมวลโมเลกุลแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับ HDPE..... 26
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างข้อมูลผลการทดสอบ Small punch test data ที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราเร็วของการทดสอบ 0.5 mm/min..... 26
รูปที่ 2.10	ขั้นตอนต่างๆ ของการขึ้นรูปชิ้นงาน UHMWPE..... 27
รูปที่ 2.11	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE เกรด GUR 1020 ความหนา $100\ \mu\text{m}$ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง..... 29
รูปที่ 2.12	เครื่องอัด Compression molding press..... 30
รูปที่ 2.13	แผนภาพของเครื่องอัดรีด Ram extruder..... 31
รูปที่ 2.14	รูปแบบของการสึกหรอของวัสดุ..... 32
รูปที่ 2.15	อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวหลังจากผ่านการสั่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัส โลหะด้วยระยะทางต่างๆ..... 35
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น..... 36
รูปที่ 2.17	โครงสร้างผลึกของ PTFE และ โครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE..... 38
รูปที่ 2.18	การสึกหรอและกลไกการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมออร์ที่ถ่ายเนื่อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE..... 39

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.19 กลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy Transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ โดยส่วนใหญ่.....	40
รูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบการสึกหรอ Ball on disk tribometer.....	43
รูปที่ 2.21 ลักษณะรูปร่างของการสัมผัสของการทดสอบไทรโบมิเตอร์.....	44
รูปที่ 2.22 การทดสอบการสึกหรอของวัสดุด้วยวิธีการแบบ Block on ring.....	45
รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	50
รูปที่ 3.2 ผง UHMWPE ที่ใช้ในการทดลอง.....	51
รูปที่ 3.3 ตู้อบลมร้อนและการอบผง UHMWPE ที่ใช้ในการทดลอง.....	52
รูปที่ 3.4 เครื่อง Ram Extruder และการอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE.....	53
รูปที่ 3.5 กระบอกลูก (Barrel).....	54
รูปที่ 3.6 หัวดาย (Profile die head).....	54
รูปที่ 3.7 การป้อนเติมผง UHMWPE.....	54
รูปที่ 3.8 การอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	55
รูปที่ 3.9 ขนาดของชิ้นทดสอบที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Ram Extruder.....	55
รูปที่ 3.10 DSC กราฟของวัสดุ UHMWPE- GUR 1050 powder (first heat).....	57
รูปที่ 3.11 หลักการของวิธีการทดสอบความแข็ง Rockwell.....	59
รูปที่ 3.12 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore A และ Shore D.....	60
รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D.....	60
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงดึง การจับยึดชิ้นทดสอบและการดึงชิ้นทดสอบ.....	61
รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง.....	62
รูปที่ 3.16 ค่าพิคคของส่วนต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638.....	63
รูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง.....	64
รูปที่ 3.18 การทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีแบบ Ball-on-Disk Tribometer.....	65
รูปที่ 3.19 หลักการการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีแบบ Block on Ring และชิ้นงานทดสอบ.....	66
รูปที่ 3.20 เครื่องและการจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ.....	66
รูปที่ 3.21 เครื่องชั่งน้ำหนัก AND รุ่น HR-200 ความละเอียด 0.1 mg.....	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 IR Spectrum ของวัสดุ UHMWPE.....	71
รูปที่ 4.2 IR Spectrumของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นที่นำเข้าจากต่างประเทศ และวัสดุก้อนUHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 °C.....	72
รูปที่ 4.3 IR Spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจาก ต่างประเทศและที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C.....	72
รูปที่ 4.4 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจาก ต่างประเทศและที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C.....	72
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ของชิ้นทดสอบ UHMWPEเปรียบเทียบกับวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	76
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูป เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	77
รูปที่ 4.7 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการ อัดรีดขึ้นรูป เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	82
รูปที่ 4.8 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูป เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	83
รูปที่ 4.9 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการ อัดรีดขึ้นรูป หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ.....	84
รูปที่ 4.10 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน ที่ UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	89

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพอลิเมอร์ได้เข้ามามีบทบาทในงานวิศวกรรมเพิ่มขึ้น โดยการนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลต่างๆ เนื่องจากสามารถผลิตหรือขึ้นรูปได้ง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำแต่สิ่งที่เป็นข้อเด่นในการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมคือ สมบัติทางด้านโพรโพลี[1]ซึ่งถ้ากล่าวถึงโพรโพลีของพอลิเมอร์ก็จะพิจารณาจากปรากฏการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับความเสียดทานและการสึกหรอพอลิเอทิลีนโมเลกุลสูง(Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก Polyethylene (PE) ชนิดหนึ่งที่มีมวลโมเลกุลสูงตั้งแต่  $3.5 \times 10^6$  g/mol ขึ้นไปและสูงกว่า PE ชนิดอื่นๆ[1]มีสมบัติเด่นหลายด้าน ซึ่งสมบัติต่างๆ ที่กล่าวถึงนี้ประกอบไปด้วยความลื่นตัวสูงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความต้านทานการสึกหรอสูง ทนต่อการขีดสีได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ ทนต่อการฉีกขาดภายใต้ความเค้นสูงและที่สำคัญที่สุด คือ มีความลื่นตัวสูง สามารถหล่อลื่นได้ในตัว ทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรไม่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นในการหล่อลื่น UHMWPE จึงถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในงานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล ผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ แทนที่โลหะ เช่น เฟืองเกียร์ ปลอดภัยมีเม็ดลูกปืน ร่องวิ่งของเม็ดลูกปืนอุปกรณ์ และชิ้นส่วนของชุดรางลำเลียงวัสดุตลอดจนมีการนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับเคลือบท่อลำเลียงผงวัสดุต่างๆ ที่ไม่ต้องการให้ผงวัสดุติดค้างที่ท่อลำเลียง เช่น ท่อลำเลียงปูน แป้งมันสำปะหลัง

สมบัติของวัสดุ UHMWPE มีความเหนียวและหลอมละลายสูง ทำให้ UHMWPE ที่หลอมละลายไม่มีการไหลตัวเหมือนกับ PE ชนิดอื่นๆ แม้ว่าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลาย ส่งผลให้กระบวนการขึ้นรูปที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูปด้วยโมล การอัดรีดขึ้นรูปด้วยสกรู หรือการเป่าขึ้นรูป ไม่สามารถนำมาใช้ได้ทางปฏิบัติ แต่จะสามารถขึ้นรูปได้ด้วยแต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยโมล(Compression Molding) และกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด(Ram Extrusion)เท่านั้น[1]ซึ่งการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยโมลและกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัดจะต้องกระทำภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสม จึงจะได้วัสดุหรือชิ้นส่วนที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานแต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำวัสดุหรือชิ้นส่วนมาใช้งานนั้น จะต้องคำนึงถึงสมบัติของวัสดุนั้นการทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทราบสมบัติทางด้านโพรโพลีของพอลิเมอร์ได้งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะเน้นการศึกษาสมบัติทางด้านโพรโพลีของพอลิเมอร์โดยมีงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาสมบัติ

ทางด้านโพลีโบลีโดยการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีการทดสอบแบบ Block-on-ring เช่นการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของPTFEผสมZnO โดยวิธีการทดสอบแบบ Block-on-ring โดยแรงกระทำ 200 N ความเร็ว 0.431 m/s[2]การศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ Epoxy ผสม $Al_2O_3$  โดยวิธีการทดสอบแบบ Block-on-ring โดยแรงกระทำ 1 MPa ความเร็วของการเสียดสี 1 m/s[3] การศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของPEEK ผสม  $Al_2O_3$  โดยวิธีการทดสอบแบบBlock-on-ring โดยแรงกระทำ 196 N ความเร็วของการเสียดสี 0.42 m/s[4]และการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ PSผสมMWCNT โดยวิธีการทดสอบแบบBlock-on-ring โดยแรงกระทำ 50 N ความเร็วของการเสียดสี 0.431 m/s[5] เป็นต้น

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาวิจัยอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวกับ ความดัน อุณหภูมิและเวลาสำหรับการขึ้นรูป UHMWPE ด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัดที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPEเพื่อเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของแท่งUHMWPEที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และผลิตทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศได้ นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยต่อยอดทางด้านกระบวนการผลิต การพัฒนาสมบัติต่างๆ ของ UHMWPE สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมต่อไปในอนาคต

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปร ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

1.2.2 ศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในการขึ้นรูปของวัสดุ UHMWPEด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัดเพื่อผลิตทดแทน การนำเข้าจากต่างประเทศ

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติการสึกหรอของแท่งวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

1.2.4 เพื่อนำความรู้เกี่ยวกับความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE ที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด ไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 ทราบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

1.3.2 ตัวแปรการขึ้นรูปมีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPEจากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

1.3.3 สมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ แตกต่างจากวัสดุก่อน UHMWPE ที่ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ผง UHMWPE เกรด SLL-6-6020 ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Corporation Limited ประเทศจีน ซึ่งมีมวลโมเลกุล (Molecular Weight) เท่ากับ  $6.5 \times 10^6$  g/mol ขนาดอนุภาคเท่ากับ 80-100  $\mu\text{m}$

1.4.2 ขนาดของปาก Die กว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร

1.4.3 ขึ้นรูป UHMWPE บริสุทธิ์ด้วยสภาวะอุณหภูมิและความดันในแต่ละช่วง โดยการคงอุณหภูมิของการขึ้นรูป ประกอบด้วย

- 1) อุณหภูมิ 140, 150, และ 160 องศาเซลเซียส
- 2) ความดัน 3, 5, 8, และ 10 Mpa
- 3) เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที
- 4) อุณหภูมิหล่อเย็น 5 องศาเซลเซียส

1.4.4 ศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีการทดสอบแบบ Block-on-ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G77 โดยปราศจากสารหล่อลื่น น้ำหนักที่กดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N ความเร็วของการเสียดสี (v) 0.3 m/s และวัสดุสัมผัส Baring Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm

1.4.5 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย Scanning Electron Microscopy, Density (ASTM D1505) Differential Scanning Calorimeter (ASTM F2625)

1.4.5 ศึกษาสมบัติทางกล ประกอบด้วย Hardness (ASTM D2240) Tensile (ASTM D638)

1.4.6 ศึกษาสมบัติทางเคมี ประกอบด้วย FTIR (ASTM F2102) ซึ่งจะต้องทำการทดสอบผง UHMWPE และวัสดุก่อน UHMWPE หลังจากผ่านการขึ้นรูป

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ทราบข้อมูลสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

1.5.2 ได้ทราบข้อมูลอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ สำหรับการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

1.5.3 ได้ทราบข้อมูลที่เปรียบเทียบคุณสมบัติการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ และจากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด

1.5.4 ได้ความรู้เกี่ยวกับสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัดเพื่อนำไปประยุกต์ขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตเพื่อขึ้นรูปและศึกษาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของวัสดุก้อน UHMWPE เนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุที่ยังไม่มีการผลิตในประเทศและต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งในแต่ละปีมีปริมาณการนำเข้าค่อนข้างสูงสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งผู้วิจัยจะเน้นศึกษาสมบัติทางด้านความต้านทานการสึกหรอ เพราะเป็นสมบัติที่เด่นที่สุดของวัสดุชนิดนี้ ดังนั้น จะนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับเทคนิคพื้นฐาน สำหรับการขึ้นรูปเพื่อผลิตวัสดุก้อนสำเร็จรูปและวัสดุขึ้นงานสำเร็จรูป UHMWPE สมบัติต่างๆ ของวัสดุ UHMWPE การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอของพอลิเมอร์ ดังต่อไปนี้

#### 2.1 วัสดุ UHMWPE [1]

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ที่มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ มีความลื่นตัวสูง มีความคงทนต่อแรงกระแทก และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่างๆ การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ UHMWPE ในช่วงที่ผ่านมา เน้นไปที่การศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจาก UHMWPE ส่วนใหญ่ ถูกนำไปใช้เป็นตัวรองรับ (Bearing Materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดทานรองรับการเสียดสี สำหรับการใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลและทางการแพทย์

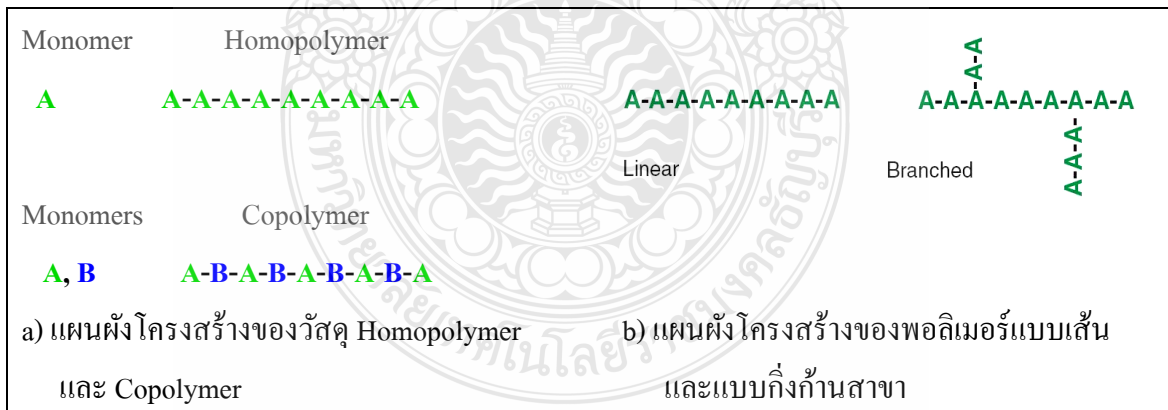
การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เฟือง เกียร์ แบบริง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร ใช้เป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียง ถ่านหินหรือพื้นกระบะรถบรรทุก เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ



## 2.2 ความเข้าใจพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์ [1]

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยของไฮโดรเจนและคาร์บอนหลายๆ โมเลกุล (Poly) ที่เรียกว่า “เมอร์ (Mer)” เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแต่ละเมอร์หรือที่เรียกว่า “โมโนเมอร์ (Monomer)” ของพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบที่เหมือนกันเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจะเรียกว่า Homopolymer แต่ถ้าแต่ละส่วนหรือแต่ละโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันมีความแตกต่างกันจะเรียกว่า Copolymer ดังลักษณะแผนภาพการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.1a) โดยที่สัญลักษณ์ A, B คือ โมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน

โมโนเมอร์ของพอลิเมอร์สามารถที่จะจัดเรียงตัวกันเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) ดังแสดงในรูปที่ 2.1b) ซึ่งแนวโน้มของการเกิดการจัดเรียงตัวแบบกิ่งก้านสาขานี้ขึ้นอยู่กับความควบคุมสภาวะของขบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นสิ่งที่ควรจำและทำความเข้าใจก็คือรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1a) และ 2.1b) ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างง่าย ๆ ของโครงสร้างพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Copolymer มีความเป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างหน่วยย่อยหรือโมโนเมอร์ย่อยต่างชนิดกันตามชนิดธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไป แต่ในทางปฏิบัติในอุตสาหกรรม พอลิเอทิลีนรวมทั้ง UHMWPE จะเป็น Copolymer ที่เกิดร่วมกับโมโนเมอร์อื่นๆ ตัวอย่างเช่น โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์



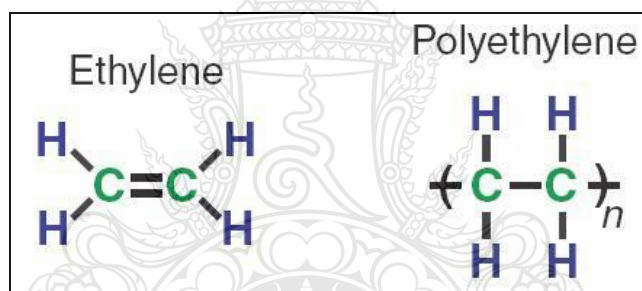
รูปที่ 2.1 แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์ [1]

สมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัดของพอลิเมอร์ที่แตกต่างจากวัสดุอื่นๆ (เช่น โลหะชนิดต่างๆ และเซรามิก) คือขนาดโมเลกุล (Molecular Size) ในกรณีที่เป็นโลหะผสมและเซรามิก องค์ประกอบย่อยที่เป็นส่วนประกอบคืออะตอมของธาตุโลหะชนิดต่างๆ (ตัวอย่างเช่น Co, Cr, Mo

และอื่นๆ) หรืออาจจะเป็นพันธะโมเลกุลเล็กๆ เช่น Metal Carbides หรือ Oxides แต่สำหรับขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์อาจประกอบด้วยโมโนเมอร์หลายๆ ชนิดรวมกันมากกว่า 100,000 หน่วยโมโนเมอร์ ซึ่งทำให้มวลโมเลกุล (Molecular Weights) สามารถปรับขนาดเพิ่มขึ้นเป็นล้านกรัมต่อโมล ( $10^6$  g/mol) และนอกจากนี้รูปแบบการก่ตัวของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ย่อยๆ เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทำให้พอลิเมอร์มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [6,7]

### 2.2.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พอลิเมอร์ที่ก่อตัวหรือสังเคราะห์จากเอทิลีนแก๊ส ( $C_2H_4$ ) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28 g/mol ซึ่งรูปแบบโครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีน คือ  $-(C_2H_4)_n-$  โดยที่ n คือ ปริมาณการเกิดโพลิเมอร์ (Degree of Polymerization) ซึ่งแผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและพอลิเอทิลีนมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและพอลิเอทิลีน [1]

สำหรับ UHMWPE สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยเอทิลีนโมโนเมอร์ประมาณ 200,000 หน่วยเรียงต่อกันซ้ำๆ หรือในอีกหนึ่งความหมาย สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE จะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนมากถึง 400,000 อะตอม และนอกจากนี้ โพลีเอทิลีนยังสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด (LDPE, LLDPE, HDPE, UHMWPE) ตามขบวนการสังเคราะห์ ซึ่งพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาด้วยขนาดของมวลโมเลกุลและรูปแบบการจัดเรียงตัวของเอทิลีนโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน สำหรับในส่วนของ LDPE and LLDPE จะหมายถึง Low-Density Polyethylene และ Linear Low Density Polyethylene ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวของเอทิลีนโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลของโพลีเอทิลีนเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นแบบกิ่งก้านสาขาและเป็นเส้นตรงตามลำดับ และมวลโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดจะต่ำกว่า 50,000 g/mol

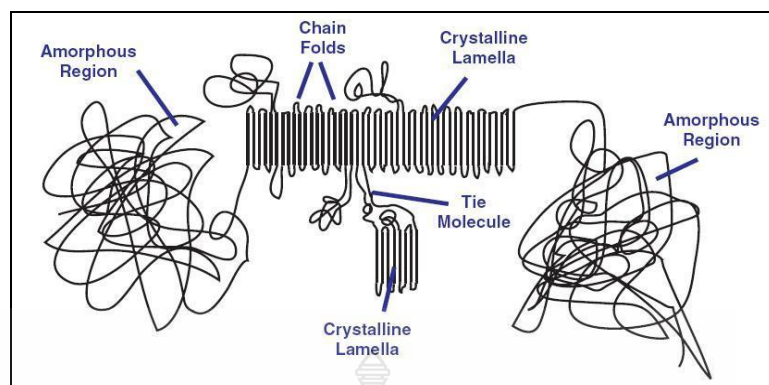
HDPE สายโซ่โมเลกุลจะเป็นเส้นตรง มีมวลโมเลกุลสูงถึง 200,000 g/mol สำหรับในส่วนของ UHMWPE เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ พบว่า UHMWPE มีมวลโมเลกุลสูงประมาณ  $6 \times 10^6$  g/mol แต่ในความเป็นจริงมวลโมเลกุลที่สูงมากๆ เช่นนี้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดาต่างๆ ไป แต่จะทำการวัดเปรียบเทียบอนุมานแทนด้วยค่า Intrinsic Viscosity (IV).

### 2.2.3 สภาพความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (Crystallinity of Polymer) [8]

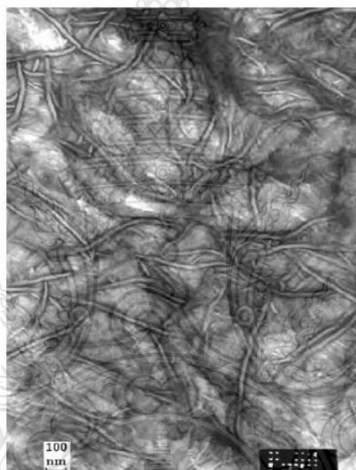
วิธีการหนึ่งที่สามารถจินตนาการเห็นสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นเชือกหรือสายสร้อยที่พันกันยุ่งเหยิงคล้ายสปาเกตตี ซึ่งมีความยาวมากกว่าหนึ่งกิโลเมตร เนื่องจากสายโซ่จะไม่อยู่นิ่ง มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา และมีการดูดซับพลังงานความร้อนภายในตลอดเวลา ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting Point) สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE มีแนวโน้มที่จะมีการสับเปลี่ยนพันธะของ C—C และทำให้เกิดการพับของสายโซ่ (Chain Fold) การพับสายโซ่กลับไปกลับมาเช่นนี้ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Ordered) เฉพาะช่วง, บริเวณที่มีการพับสายโซ่เป็นแผ่นนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและเรียกว่า “ผลึกแผ่น (Crystalline Lamella)” ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างที่บาง ซึ่งผลึกแผ่นเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ในบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) และสามารถที่จะเชื่อมต่อกับผลึกแผ่นข้างเคียงได้ด้วยพันธะโมเลกุล (Tie Molecule) ซึ่ง UHMWPE มีลักษณะรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลละความเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ขนาดและตำแหน่งของบริเวณที่เป็นผลึกแผ่นภายใน UHMWPE ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของตัวแปรต่างๆ ซึ่งรวมถึงมวลโมเลกุล, เงื่อนไขของขบวนการผลิตและเงื่อนไขของสภาวะแวดล้อมของการเก็บรักษาหรือการใช้งาน ซึ่งจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

โดยทั่วไปแล้ว ผลึกแผ่นมีขนาดเล็กและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และนอกจากนี้ผลึกแผ่นทำให้เกิดการหักเหแสงส่งผลให้ UHMWPE มีลักษณะเป็นสีขาว ขุ่นมัวที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูงเหนือจุดหลอมละลายของผลึกแผ่น ที่อุณหภูมิประมาณ 137°C แสงสามารถส่องผ่านผลึกแผ่นของ UHMWPE ได้บ้างเล็กน้อย สำหรับผลึกแผ่นที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะมีขนาดความหนาอยู่ในช่วงประมาณ 10-50 nm และความยาวประมาณ 10-50  $\mu\text{m}$  [8] ระยะห่างระหว่างแผ่นผลึก ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเฉลี่ยประมาณ 50 nm [9]



รูปที่ 2.3 คุณลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE [1]



รูปที่ 2.4 TEM ไมโครกราฟของ UHMWPE แสดงอาณาบริเวณที่เป็นอสัณฐานและผลึก [1]

รูปร่างผลึกของ UHMWPE สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (TEM.) ด้วยกำลังขยายสำหรับพอลิเมอร์ตั้งแต่ 16,000 เท่าขึ้นไป โดยการเตรียมชิ้นทดสอบ ซึ่ง UHMWPE จะถูกตัดเป็นแผ่นชิ้นบางๆ ที่เรียกว่า “Ultramicrotomed Slice” หลังจากนั้น แผ่น Ultramicrotomed Slice ของ UHMWPE จะถูกนำไปย้อมสีด้วย Uranyl Acetate เพื่อปรับปรุงให้เห็นความแตกต่างในการทำ TEM ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งขบวนการย้อมสีทำให้บริเวณที่เป็นอสัณฐานกลายเป็นสีเทาในแผนภาพโครงสร้างจุลภาค สำหรับผลึกแผ่น ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากการย้อมสีที่ทำให้เห็นความแตกต่างนั้น จะปรากฏเป็นเส้นสีขาวกับเส้นขอบสีดำ จากภาพ TEM Micrograph ที่

แสดงในรูปที่ 2.4 เป็นตัวอย่างองค์ประกอบตามธรรมชาติของ UHMWPE ที่เป็นการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายของบริเวณที่เป็นอสัณฐานและผลึกแผ่น

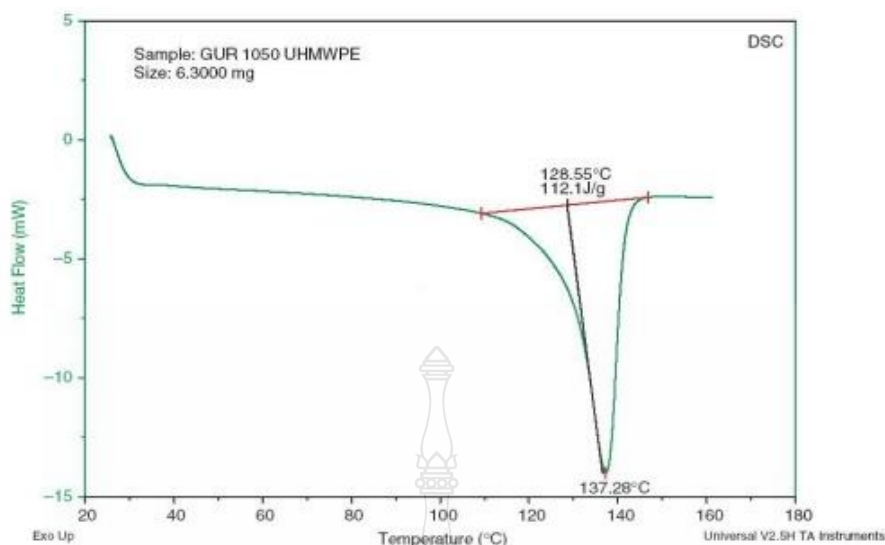
#### 2.2.4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal transitions) [10,11]

วิธีการที่ใช้ในการจำแนกหรือทำให้เห็นความแตกต่างของคุณลักษณะจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งในที่นี้จะขอย้อนกล่าวไปถึงรูปแบบของสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นเส้นสปาเก็ตตี้ที่ยาวและพันกันยุ่งเหยิงที่ทำให้สามารถจินตนาการได้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกลับไปกลับมา และการเกิดการบิดงอเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน หรืออาจกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะต้องเผชิญกับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน 3 อุณหภูมิหลักๆ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว (Glass Transition Temperature;  $T_g$ ) อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting Point Temperature;  $T_m$ ) และ อุณหภูมิไหลตัว (Flow Temperature;  $T_f$ ).

อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพเป็นแก้ว (Glass transition Temperature;  $T_g$ ) คือ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีพฤติกรรมประค้ำยแก้ว ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนไม่เพียงพอที่จะเลื่อนผ่านสายโซ่อื่นได้และมีวิธีเดียวที่วัสดุจะตอบสนองต่อความเค้นทางกลคือการยืดออกหรือแตกออกจากพันธะที่ประกอบกันเป็นสายโซ่โมเลกุล ในกรณีของ UHMWPE อุณหภูมิ  $T_g$  จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $-120^\circ\text{C}$

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิ  $T_g$  อาณาบริเวณพื้นที่ที่เป็นอสัณฐานภายในพอลิเมอร์จะเคลื่อนตัวได้มากขึ้น และเมื่อใดที่อุณหภูมิของ UHMWPE เพิ่มสูงขึ้นกว่า  $60-90^\circ\text{C}$  ผลึกที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่เล็กกว่าผลึกในพอลิเมอร์จะเริ่มหลอมละลาย ซึ่งพฤติกรรมการหลอมละลายของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline Polymer) ของ UHMWPE นี้จะถูกวัดด้วย Differential Scanning Colorimeter (DSC) ซึ่ง DSC จะวัดปริมาณความร้อนจำเพาะที่จำเป็นต้องใช้ต่อการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างพอลิเมอร์ตัวอย่างของ DSC data สำหรับ UHMWPE มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5

ภาพร่าง DSC Traces สำหรับ UHMWPE ประกอบด้วย 2 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งของเส้นโค้งเป็นจุดสูงสุดของอุณหภูมิหลอมละลาย ( $T_m$ ) ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $137^\circ\text{C}$  และสอดคล้องกับจุดที่เป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline Regions) ที่มีการหลอมละลาย ซึ่งอุณหภูมิหลอมละลายของ UHMWPE สะท้อนให้เห็นถึงความหนาของผลึก หรือความสมบูรณ์ของผลึก และความหนาแน่นผลึก ถ้าความสมบูรณ์ของผลึก UHMWPE ยิ่งมากมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิหลอมละลายสูงกว่าผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า



รูปที่ 2.5 DSC trace สำหรับ UHMWPE [1]

นอกจากนี้ บริเวณพื้นที่ด้านล่างภายใต้จุดหลอมละลายสูงสุด คือ สัดส่วนของความเป็นผลึกหรือปริมาณผลึกที่เรียกว่า “สภาพความเป็นผลึก (Crystallinity)” นอกจากนี้ DSC ยังสามารถวัดปริมาณพลังงานความร้อนสุทธิต่อหน่วยมวล (ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (Enthalpy;  $\Delta H$ ) ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการหลอมละลายบริเวณที่เป็นผลึกภายในขั้นตอนทดสอบโดยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง enthalpy ของขั้นตอนทดสอบต่อความสมบูรณ์ของผลึก 100% และคำนวณออกมาเป็นปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) สำหรับวัสดุก้อน UHMWPE ส่วนใหญ่จะมีปริมาณความเป็นผลึกประมาณ 50-55%

ขณะที่อุณหภูมิของโพลิเมอร์กิ่งผลึกถูกทำให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลาย โพลีเมอร์จะเกิดการไหลตัว (Flow Transition,  $T_f$ ) และกลายเป็นของเหลว สำหรับโพลีเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า 500,000 g/mol จะสามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมไหลได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามสำหรับ โพลีเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า 500,000 g/mol ซึ่งมีปริมาณสายโซ่โมเลกุลที่มากกว่าและมีความซับซ้อนมากกว่าจะเป็นตัวป้องกันการไหล ส่งผลให้ UHMWPE ไม่แสดงพฤติกรรมไหลหรืออาจกล่าวได้ว่า “ไม่มีจุดไหลตัว”

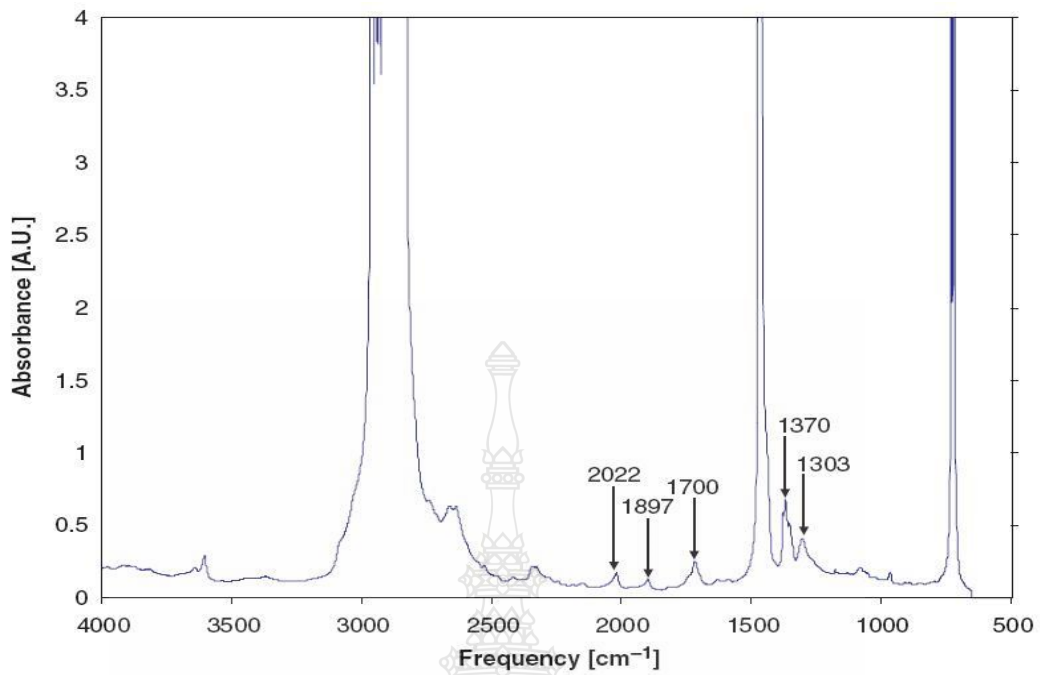
### 2.2.5 การสลายตัวของโพลิเมอร์ (Degradaion of Polymer) [1]

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสลายตัวของโพลิเมอร์ ได้แก่ อุณหภูมิ แสง รังสี และสารเติมแต่งบางชนิด ถ้าโพลิเมอร์ได้รับปัจจัยเหล่านี้เข้าไปแล้ว จะทำให้เกิดการสลายตัวของโพลิเมอร์ขึ้นจากการวิเคราะห์ FTIR ของโพลิเมอร์พบว่าจะทำให้เกิดพีคดังต่อไปนี้ แสดงค่าการดูดกลืนพลังงาน

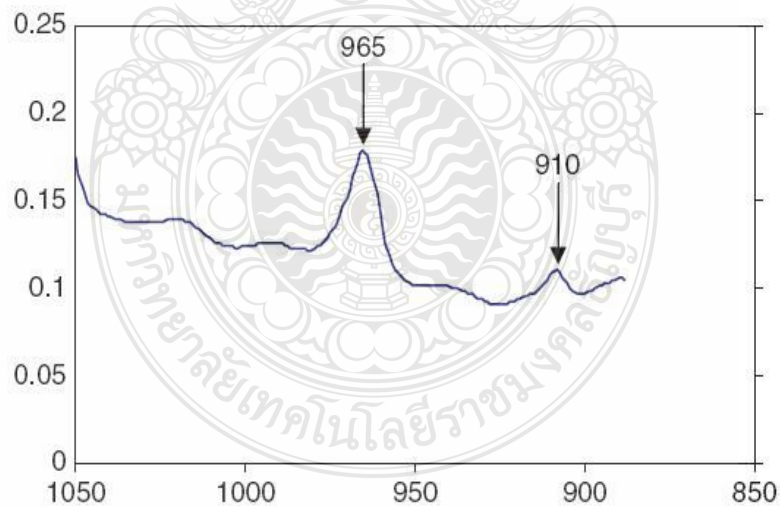
ที่  $2000-2600\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ ( $-\text{CH}_2-$ ) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ ที่  $1850-1700\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล ( $\text{C}=\text{O}$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่, เกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์จะแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่  $1640\text{ cm}^{-1}$  และ  $966\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Vinyl ( $\text{C}=\text{C}$ ) และ Trans ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ตามลำดับ และที่  $910\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Terminal Vinyl ( $-\text{CH}=\text{CH}_2$ ) เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์

การวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติทางเคมีของผง UHMWPE เป็นวิธีการหนึ่งที่ต้องทำการตรวจสอบในระหว่างการผลิตเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่บางครั้งนักวิจัยก็มีความจำเป็นต้องทำการทดสอบความบริสุทธิ์และส่วนผสมของผง UHMWPE เป็นช่วงๆ เพื่อให้เกิดความมั่นใจสำหรับการนำไปใช้งาน สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของผง UHMWPE ด้วยวิธีการวิเคราะห์ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) หลังจากทีผง UHMWPE ถูกขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็งหรือเก็บไว้ในรูปของแข็งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอาจเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย ในที่นี้การเสื่อมสภาพหรือการขาดออกจากกันของสายโซ่โมเลกุลที่มีสาเหตุมาจากความร้อนหรือการแปรรูปทางกลอาจเกิดขึ้นบ้างในบางเวลา ซึ่ง FTIR สามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่อยู่ในรูปของก้อนของแข็งได้เช่นกัน

การเตรียมชิ้นทดสอบที่เป็นก้อนของแข็งสำหรับ FTIR ชิ้นทดสอบจะต้องถูกเตรียมให้มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ หรือที่เรียกว่า Thin Film แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยอินฟราเรดในโหมด Transmission สำหรับในส่วนของการเตรียม Thin Film นั้นสามารถทำการเตรียมได้ด้วยการใช้ Microtoming ซึ่ง UHMWPE จะถูกตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ด้วยใบตัดหรือใบเลื่อยให้มีขนาดเล็กและพอดีกับอุปกรณ์จับชิ้นงานของเครื่อง Microtome ในการตัดชิ้นงานนี้สามารถตัดให้มีความหนาขนาดต่างๆ ได้ตามต้องการตามความหนาของใบตัดและสามารถตัดชิ้นงานได้บางถึง  $100-200\text{ }\mu\text{m}$  จากนั้นจึงนำแผ่นตัดของชิ้นทดสอบไปวางบนแท่น Micro-FTIR System ในการวิเคราะห์ทดสอบจะต้องทำการสแกนอย่างน้อย 24 ครั้ง และผลการทดสอบที่ได้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเกิดพีค ที่ 1700 cm<sup>-1</sup> ในมาตรฐาน ASTM F2102 เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่ [1]



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดพีคที่ 910 cm<sup>-1</sup> และ ที่ 965 cm<sup>-1</sup> เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Terminal Vinyl(CH=CH<sub>2</sub>) และ Transvinylene เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ [1]



## 2.2.6 มวลโมเลกุล (Molecular Weight) [10,11]

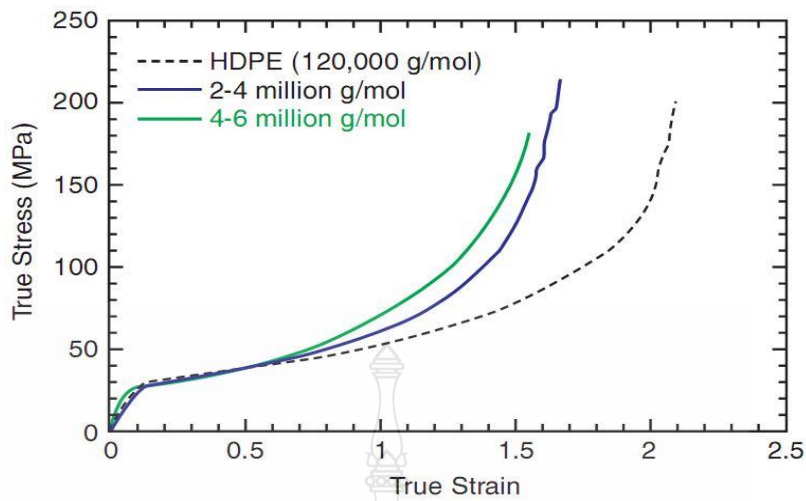
พฤติกรรมทางกลหรือสมบัติทางกลของ UHMWPE จะสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล ซึ่งปกติจะอนุมานจากการวัด Intrinsic Viscosity, IV โดยมีวิธีการวัดที่ใช้กันทั่วไป 2 วิธีสำหรับการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของมวลโมเลกุล ( $M_v$ ) ของ UHMWPE โดยยึดหลักการพื้นฐานของค่า IV มาใช้ในการคำนวณตามสมการของ Mark-Houwink ดังต่อไปนี้

$$\text{ASTM D4020-05: } M_v = 53,700 IV^{1.37} \quad (2.1)$$

$$\text{Margolies Equation, used Outside North America: } M_v = 53,700 IV^{1.49} \quad (2.2)$$

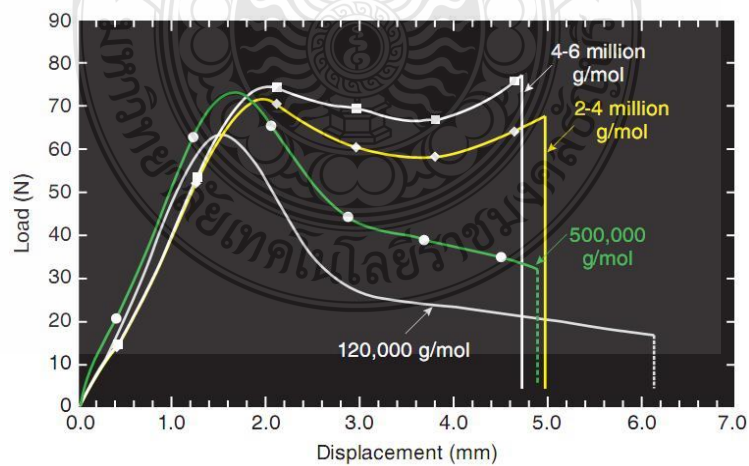
จากสมการที่กล่าวข้างต้น  $M_v$  มีหน่วยเป็น g/mol และ IV มีหน่วยเป็น dL/g ซึ่งขั้นตอนของวิธีทดสอบสำหรับการหาค่ามวลโมเลกุลของ UHMWPE ประกอบด้วยการแยกสารและ Gel Permeation Chromatography (GPC) ด้วยวิธีการแยกขนาดของ Chromatography [12]

ค่า IV ของ UHMWPE สัมพันธ์กับการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทก (Bulk Impact Strength) และความต้านทานต่อการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear Resistance) ของ UHMWPE หลังจากผ่านการขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็ง ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ที่ได้จะไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear) และนอกจากนี้มวลโมเลกุลยังมีอิทธิพลตอบสนองต่อการแตกหักสถิตย์ (Static Fracture) พอกๆ กับพฤติกรรมทางกลของ UHMWPE ที่มีค่าความเครียด (Strain) สูงๆ [13] ตัวอย่างเช่น บริเวณเหนือจุดคราก (Yield point) ของโพลิเมอร์ ความแข็งแรงต่ออัตราการขึ้นรูปเย็นตามแนวแรงดึงขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุล จากรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็น True-Stress Curve ในแนวแรงดึง (ที่อุณหภูมิห้อง, อัตราการดึง 30 mm/min) ของชิ้นทดสอบ UHMWPE สองชนิดที่มีมวลโมเลกุลต่างกันเปรียบเทียบกับ High Density Polyethylene (HDPE)



รูปที่ 2.8 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดในแกนภายใต้แรงดึง (ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วของการดึง 30 mm/min) ของชิ้นทดสอบ UHMWPE สองชนิดที่มีมวล โมเลกุลแตกต่างกันเปรียบเทียบกับ HDPE [1]

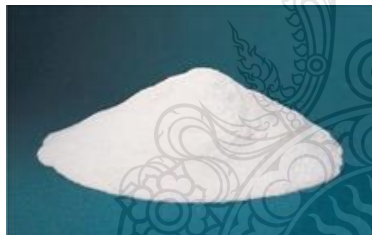
ภายใต้การทดสอบแรงดึงในสภาวะสองแกน ของวิธีการทดสอบแบบ Small Punch Test พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทางกลของโพลีเอทิลีน แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของโพลีเอทิลีน ขึ้นอยู่กับมวล โมเลกุลด้วยเช่นกัน ตัวอย่างผลการทดสอบ Small Punch Test Data ที่แสดงดังรูปที่ 2.9 เป็นผลการทดสอบ ซึ่งถูกทดสอบที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราเร็วของการทดสอบ 0.5 mm/min



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างข้อมูลผลการทดสอบ Small Punch Test ซึ่งทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราเร็วของการทดสอบ 0.5 mm/min [1]

### 2.3 กระบวนการขึ้นรูป UHMWPE [1]

จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ที่ประกอบไปด้วย C และ H ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นเพียงแค่ว่าความรู้พื้นฐานขององค์ประกอบทางเคมีเท่านั้น แต่ถ้าต้องการอธิบายให้ลึกซึ้งจนสามารถจินตนาการออกมาก่อนวัสดุ UHMWPE ที่สามารถจับต้องและนำไปใช้งานได้จะต้องอธิบายให้เห็นภาพขั้นตอนต่างๆ ของกรรมวิธีการผลิต UHMWPE โดยขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตนั้นมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญ ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยน ethylene gas ให้เป็นผง UHMWPE ด้วยกระบวนการ Polymerization ดังแสดงในรูปที่ 2.10A) ขั้นตอนที่สองคือ ผง UHMWPE ถูกทำให้อยู่ในรูปของแข็งเป็นแผ่น แท่ง ก้อนหรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จ (Semi Finished Product) ดังแสดงในรูปที่ 2.10B) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จด้วยวิธีการตัดเฉือน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.10C) และรูปที่ 2.10D) ชิ้นงานสำเร็จรูป UHMWPE ที่ได้จากการกลึงขึ้นรูป สำหรับในกรณีของชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กอาจจะทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีการตัดเฉือน ซึ่งกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปนี้เรียกว่า “Direct Compression Molding (DCM)”



a) ผง UHMWPE บริสุทธิ์



b) แท่งวัสดุกึ่งสำเร็จรูป UHMWPE



c) การตัดเฉือนแปดผิวชิ้นงาน



d) ชิ้นงานสำเร็จรูป UHMWPE

รูปที่ 2.10 ขั้นตอนต่างๆ ของการขึ้นรูปชิ้นงาน UHMWPE [1]

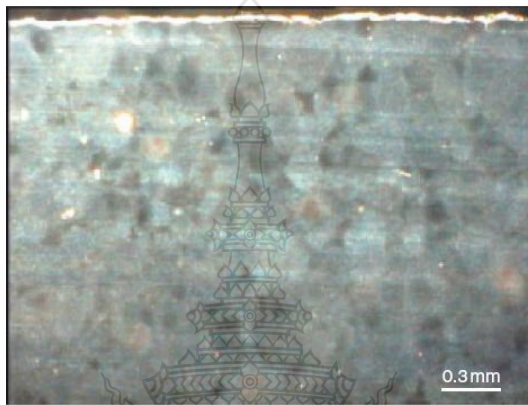
แต่ละขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิต พื้นฐานทั้ง 3 ขั้นตอนจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของ UHMWPE ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการตัดเฉือนขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปร่างภายนอกและปรากฏที่ผิวเท่านั้น แต่การเปลี่ยนแปลงของขบวนการ Polymerization จะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของ UHMWPE และผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

การขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัสดุก่อน UHMWPE จะต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูงเนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดสูงดังที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 2.2.3 ซึ่ง UHMWPE จะไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จากเหตุผลนี้ทำให้ UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีต่างๆ ไปที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติก อาทิเช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดด้วยสกรู หรือการเป่าขึ้นรูป แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธี Compression Molding และ Ram Extrusion

การขึ้นรูปก่อตัวเป็นของแข็งวัสดุก่อน UHMWPE ด้วยกรรมวิธี Compression Molding และ Ram Extrusion จะเกิดการภายใต้สภาวะของการรวมกันของอุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสม โดยความเที่ยงตรงของการรวมกันของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรที่เป็นค่าเฉพาะของ UHMWPE ถูกนำมาใช้ในการผลิตวัสดุก่อน UHMWPE เชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปตามหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ [10,11,14] ว่า กลไกที่ควบคุมก่อตัวเป็นของแข็ง คือ การแพร่ของอะตอมที่เป็นเนื้อหลัก (Self-Diffusion) ในขณะที่สายโซ่โมเลกุล UHMWPE (หรือบางส่วนของสายโซ่) ของอนุภาคเกิดการแทรกตัวเข้าหากันในระดับโมเลกุล ซึ่งจลศาสตร์ของการแพร่บริเวณขอบเกรน เกิดจากการเชื่อมต่อของขอบเกรนบริเวณที่อยู่ติดกัน (ที่ความดันสูง) และความร้อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (ที่อุณหภูมิสูง) ดังนั้นจึงส่งผลให้เป็นที่เข้าใจว่า ขบวนการแพร่มีข้อจำกัด ซึ่งการก่อตัวเป็นของแข็ง UHMWPE จะเกิดขึ้นด้วยเวลาที่พอเหมาะ ที่อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมเพื่อให้โซ่โมเลกุลเกิดการแพร่โยกย้ายข้ามขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE

หลังจากการก่อตัวขึ้นรูปเป็นของแข็ง ผง UHMWPE จะยังคงรักษาสภาพการเป็นเม็ดอนุภาคภายในโครงสร้างเม็ดเกรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการผสม Calcium-Stearate ในผง UHMWPE [10,14,15] จะสังเกตเห็นโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนที่มีลักษณะจำเพาะพิเศษของ UHMWPE ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง โดยขั้นตอนทดสอบจะต้องผ่านการเตรียมด้วยวิธีการเฉพาะที่แตกต่างกัน วิธีการมาตรฐานที่ใช้สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบได้มีการอธิบายไว้อย่างละเอียดในมาตรฐาน ASTM F648 โดยขั้นตอนทดสอบจะต้องเตรียมให้เป็นชั้นบางๆ คล้ายแผ่นฟิล์มที่มีความบางระดับไมโคร จากนั้นจึง

นำไปทำการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในโหมด Dark Field [15] แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันไม่มีการผสม Calcium-Stearate ในผง UHMWPE ส่งผลให้การวิเคราะห์ตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงทำได้ยากขึ้น ดังลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคจากการก่อตัวเป็นของแข็งของผง UHMWPE เกรด GUR 1020 (ของ Rolf Kaldeweier, Ticona, Inc.) โดยชิ้นงานทดสอบมีความหนา 100  $\mu\text{m}$



รูปที่ 2.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรด GUR ความหนา 100  $\mu\text{m}$  จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [1]

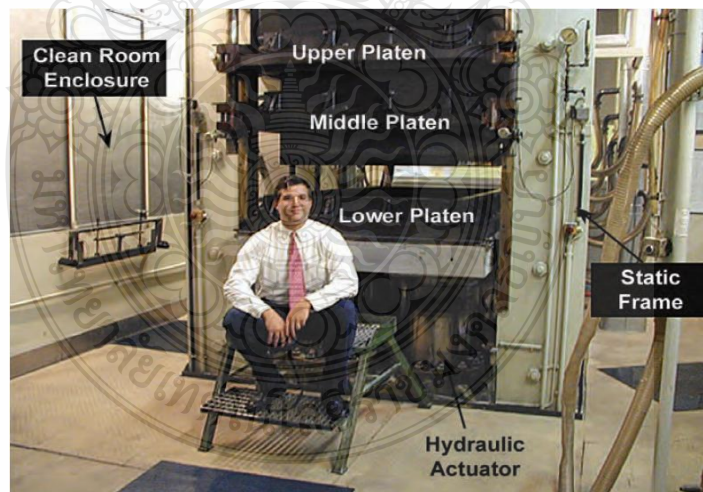
นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคของก้อนวัสดุ UHMWPE สามารถตรวจสอบได้โดยการนำชิ้นทดสอบไปแช่แข็งในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการหักทำลายชิ้นชิ้นทดสอบ [10] หรือตามด้วยการกัดด้วยกรดเพื่อให้สามารถมองเห็นอาณาบริเวณขอบเกรนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น [16] หลังจากนั้นจึงนำชิ้นทดสอบไปทำการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง โดยการตรวจสอบพื้นผิวรอยแตกหักจากการแช่แข็งหรือพื้นผิวจากการกัดกรด

ความแตกต่างของขอบเกรนที่เกิดขึ้นเป็นตัวสะท้อนลักษณะโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนของ UHMWPE โดยความบกพร่องของก้อนวัสดุ UHMWPE จะเพิ่มขึ้น ถ้าสถานะของการก่อตัวขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็งไม่เหมาะสม (อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่ไม่เหมาะสม) [17] ซึ่งโดยส่วนใหญ่ความบกพร่องที่พบ จะอยู่ในรูปของเม็ดอนุภาคเดี่ยวๆ ที่ไม่มีการเกาะยึดเชื่อมประสานติดกับเม็ดอนุภาคอื่นๆ หรือ มีบางอาณาบริเวณของการก่อตัวเป็นของแข็งแยกตัวหรือไม่มีการเชื่อมประสานกับอาณาบริเวณข้างเคียง ซึ่งเทคนิควิธีการมาตรฐาน (ASTM F648) เกี่ยวกับการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสำหรับชิ้นทดสอบที่เตรียมเป็นแผ่นบางๆ ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถ

วิเคราะห์ตรวจสอบความบกพร่องของการหลอมรวมของผง UHMWPE และนอกจากนี้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ซึ่งประกอบด้วย Laser Candling และ Ultrasound ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบในอุตสาหกรรมได้มีการนำมาใช้ตรวจสอบ UHMWPE เกรดทางการแพทย์ แต่เทคนิคการตรวจสอบนี้ไม่ใช่วิธีการมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ

### 2.3.1 การอัดขึ้นรูปด้วยโมล (Compression Molding) [1]

นับตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 เป็นต้นมา การขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE เป็นการขึ้นรูปด้วยวิธีการ Compression Molding ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 วิธีการขึ้นรูปนี้ได้มีการนำมาใช้สำหรับการขึ้นรูปแผ่น UHMWPE ขนาด 1 m x 2 m. ซึ่งเครื่องดังกล่าวนี้ติดตั้งอยู่ที่ Poly Hi Solidur Meditech เมือง Vreden ประเทศเยอรมันและเป็นเครื่องต้นแบบที่ทางบริษัท Ticona ใช้ในการผลิตแผ่น UHMWPE ปัจจุบันเครื่องดังกล่าวยังใช้ในการผลิต UHMWPE เกรดทางการแพทย์ UHMWPE เช่น ผลิตชิ้นงานสำหรับงานศัลยกรรมกระดูก ซึ่งแผ่น UHMWPE จะถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.12 โดยผง UHMWPE จะถูกกดอัดอยู่ภายในระหว่างแผ่นกดบนและกลาง หลังจากนั้นจะถูกนำลงมากดอัดอีกครั้งด้วยแผ่นกดกลางและล่าง ซึ่งแผ่นกดบนและกลางจะถูกให้ความร้อนด้วยน้ำมัน การทำงานกดอัดของเครื่องจะทำการกดอัดด้วยกระบอกไฮดรอลิกส์ที่อยู่ด้านล่าง การให้ความร้อนและแรงกดควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ หลังจากการกดอัดขึ้นรูป แผ่น UHMWPE จะถูกนำไปทำความสะอาดเพื่อขจัดความสกปรกต่างๆ ที่ฝังตัวอยู่ใน

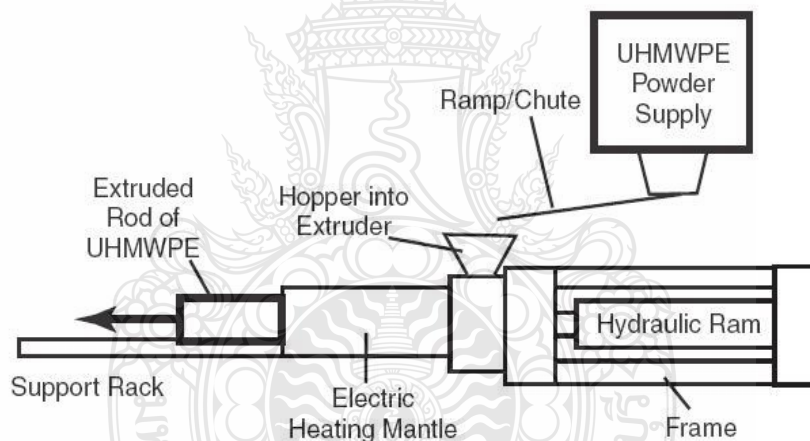


รูปที่ 2.12 เครื่องอัด Compression molding press [1]

### 2.3.2 การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด (Ram Extrusion) [2]

ในทางตรงกันข้ามกับการอัดขึ้นรูปที่มีการผลิตหรือขึ้นรูป UHMWPE มาตั้งแต่ปี

ค.ศ. 1950 การอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด (Ram Extrusion) ได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1970 ซึ่งมีกรรมวิธีการขึ้นรูปคล้ายๆ กับมีลักษณะคล้ายๆ กับกรรมวิธี Compression Molding ดังลักษณะการขึ้นรูปที่แสดงในรูปที่ 2.13 โดยผง UHMWPE ถูกป้อนเข้าไปในกระบอกอัด (Barrel) ของเครื่องอย่างต่อเนื่อง ส่วนประกอบของเครื่องประกอบด้วยถังเก็บผง UHMWPE ซึ่งทำหน้าที่ป้อนผง UHMWPE เข้าไปในกระบอกอัดที่วางในแนวนอนและมีแกนอัดดันผง UHMWPE เข้าไปในกระบอกอัดส่วนที่ได้รับความร้อน ผ่านสายและทางออก การทำงานของเครื่องอัดรีด แกนอัดจะเคลื่อนที่อัดผง UHMWPE กลับไปกลับมตลอดเวลาของการทำงาน โดยภายในกระบอกอัด ผง UHMWPE จะถูกอัดด้วยความดันจากแกนอัดพร้อมๆ กับความดันสะท้อนกลับ (Back Pressure) จากการหลอมละลายของผง UHMWPE ซึ่งความดันสะท้อนกลับเกิดจากแรงเสียดทานของ UHMWPE หลอมละลายที่ต้านกับพื้นผิวผนังสายที่ได้รับความร้อนที่ถูกบังคับให้ดันออกในแนวนอน ในจังหวะที่แท่ง UHMWPE ถูกดันออกจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ด้วยชุดขดลวดไฟฟ้า



รูปที่ 2.13 แผนภาพของเครื่องอัดรีด Ram extruder [1]

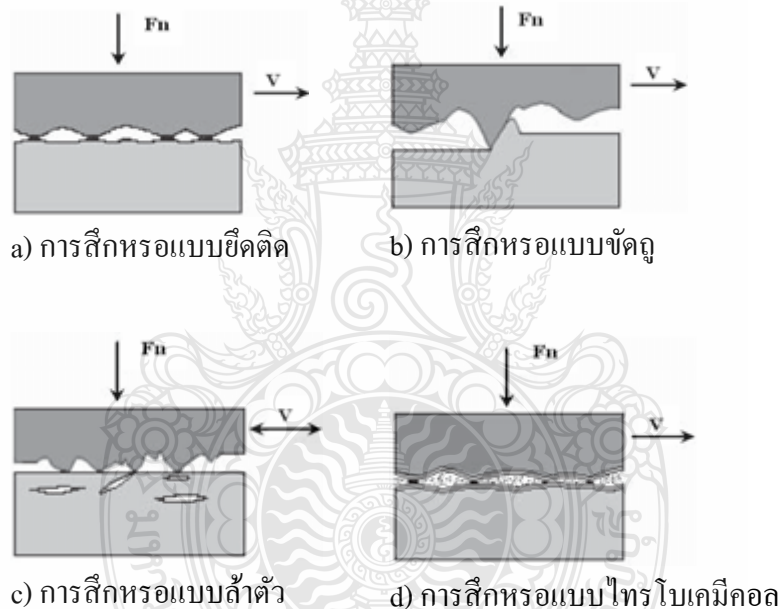
#### 2.4 การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์ [18]

พื้นผิวของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ เมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองเดิน (Bearing Materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสี จะเกิดการสึกหรอจากการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสที่มีค่าความแข็งสูงกว่า ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคู่สัมผัสโลหะแข็งขัดถูเสียดสีกับพื้นผิวพอลิเมอร์นั้นถูกกำหนดจากตามความต้องการของการออกแบบทางกลและรวมถึงข้อเท็จจริงที่ว่าพอลิเมอร์สามารถต้านทานการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะได้ดีกว่าการเดิน ไกลเสียดสีตัวมันเอง โดยรูปแบบพื้นฐาน

การสึกหรอของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เริ่มต้นจากก่อดัวของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ที่ถ่ายเนื้อ (Transfer Film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสโลหะที่มีค่าความแข็งสูงกว่า ซึ่งการก่อดัวของชั้นฟิล์มนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของพอลิเมอร์

#### 2.4.1 รูปแบบการสึกหรอของพอลิเมอร์

ลักษณะรูปแบบของการสึกหรอ โดยทั่วไปแล้วสามารถจัดกลุ่มรูปแบบการสึกหรอได้ 4 ประเภท ซึ่งประกอบด้วย การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear) และการสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล (Tribocchemical Wear)[19] ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบการสึกหรอของวัสดุ [19]

1) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) การสึกหรอแบบยึดติด (ที่แสดงในรูปที่ 2.14a) เป็นลักษณะของการสึกหรอที่ปรากฏเป็นจุดเชื่อมประสาน (Microwelds) ระหว่างพื้นผิวของวัสดุที่นำไปสู่การเสียดทาน เมื่อจุดเชื่อมต่อเหล่านี้อ่อนแอจะทำให้เกิดการเนือนขึ้นที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิววัสดุทั้งสอง แต่ไม่มีการสึกหรอ แต่เมื่อไรก็ตามที่จุดเชื่อมประสานมีความแข็งแรงสูง วัสดุที่อ่อนกว่าจะเป็นวัสดุที่ถูกเนือนและส่งผลให้เกิดการส่งถ่ายเนื้อวัสดุไปยังวัสดุที่แข็งกว่า กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ไกลเสียดทานของพื้นผิวพอลิเมอร์บนพื้นผิววัสดุ



ที่ต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น โลหะ เมื่อความแข็งแรงของการยึดติด (Adhesive Bonds) ที่ก่อตัวขึ้นระหว่างผิววัสดุที่สัมผัสกันมีความแข็งแรงกว่าความแข็งแรงเหนียวแน่น (Cohesive Strength) ของเนื้อพอลิเมอร์ จะส่งผลให้เนื้อวัสดุพอลิเมอร์บางส่วนถ่ายเนื้อติดบนพื้นผิวสัมผัสและเกิดการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ที่ถ่ายเนื้อ (Transfer Film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสโลหะ และนอกจากนี้เนื้อพอลิเมอร์บางส่วนของ การสึกหรออาจเกิดการหลุดร่อนออกไปจากอาณาบริเวณของความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นเศษซากของการสึกหรอ (Wear Debris) [20] ผลของการสึกหรอแบบยึดติดที่เกิดจากการเฉือนขาดของจุดเชื่อมต่อความเสียหาย โดยเฉพาะการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการเสียดสีของจุดเชื่อมต่อที่ยึดติดกันจะค่อยๆ ขยายขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นรอยร้าวที่มีขนาดเพิ่มขึ้น ซึ่ง Belyi และคณะ ได้เสนอแนวคิดไว้ว่า การถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เป็นลักษณะจำเพาะที่สำคัญที่สุดของการสึกหรอแบบยึดติดของวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบฐาน [21] ปรากฏการณ์การถ่ายเทความเสียหายนั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากวัสดุเกือบทุกชนิด โดยผลที่ตามมาของปรากฏการณ์การถ่ายเนื้อวัสดุอาจมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [21-23] ถ้าขนาดของอนุภาคการถ่ายเนื้อวัสดุจากพื้นผิววัสดุหนึ่งไปยังวัสดุอื่นๆ มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร อัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นก็จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีของการสึกหรอที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการควบคุมคงที่ การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะปรากฏเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ของวัสดุที่อ่อนกว่าถ่ายเนื้อไปยังพื้นผิววัสดุที่แข็งแรงกว่า ตัวอย่างเช่น การถ่ายเนื้อพอลิเมอร์บนผิวโลหะ แต่ถ้าการถ่ายเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์จากพื้นผิวโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงอยู่ที่พื้นผิวโลหะ ความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสที่กล่าวถึงนี้อาจมีผลต่อการเกาะยึดของชั้นฟิล์ม ซึ่งการแพร่กระจายของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะจะส่งผลให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดแต่การสึกหรอเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

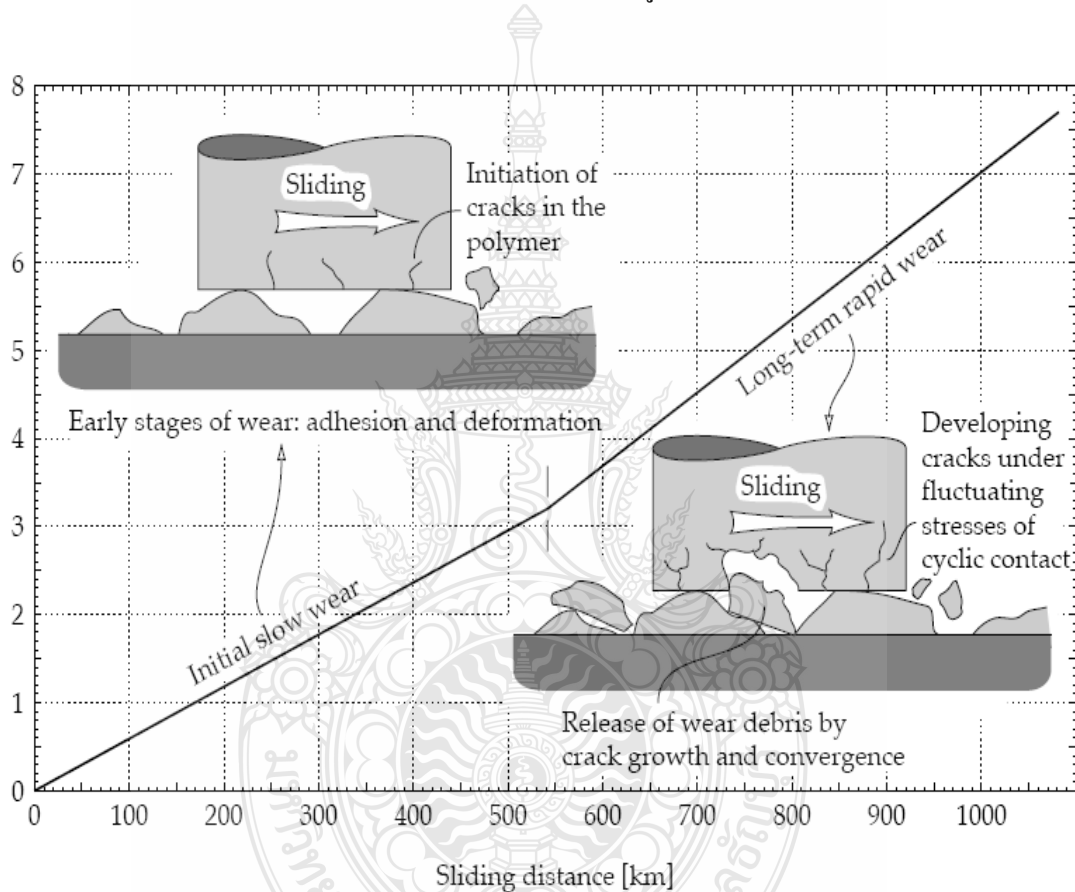
2) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบขัดถู (ที่แสดงในรูปที่ 2.14b) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุแข็งถูกับวัสดุอ่อน การสึกหรอลักษณะนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการครูดหรือขูดออกของเนื้อวัสดุ ทำให้เกิดเป็นร่องของการสึกหรอและนำไปสู่การสูญเสียเนื้อวัสดุกลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบขัดถูนี้มีสาเหตุมาจากจุดปลายความหยาบพื้นผิวที่แข็ง (hard asperities) บนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและหรืออนุภาคแข็งที่เคลื่อนที่บนพื้นผิวของพอลิเมอร์ ซึ่งการสึกหรอแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อความขรุขระเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดในแรงเสียดทาน โดยผลของการขัดถูจะแสดงออกมาในรูปของรอยขีดข่วน รอยแฉะและร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ เศษซากของการสึกหรอที่เกิดจากการขัดถูส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างเป็นเศษที่ถูกตัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ คล้ายๆ กับเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดเนื้อด้วยเครื่องมือตัดในงานตัดเนื้อด้วยเครื่องมือกล แต่จะมีขนาดเล็กกว่า การสึกหรอ

แบบขัดถูนี้ส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างทางเรขาคณิตของจุดปลายความหยาบพื้นผิว (Asperity) ที่ส่งผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยอัตราการสึกหรอขึ้นอยู่กับรูปร่างและมุมปลายของจุดหรือบริเวณที่เกิดการขัดถูบนพื้นผิวของกลุ่มสัมผัส [20] ในขณะที่เกิดการขัดถู เมื่ออนุภาคขัดถูกระทำกับวัสดุพอลิเมอร์จะมีรูปแบบการเสียดสีของวัสดุสองรูปแบบที่สำคัญ คือ รูปแบบที่หนึ่งเกิดการเซาะเป็นร่องบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่บ่อยครั้งมักจะมีการกล่าวอ้างถึงการไถครูดที่เกิดจากการผลัดหรือคั่นอนุภาคและวัสดุไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องเป็นรอยไถครูดทางยาวและคั่นเนื้อวัสดุออกด้านข้างที่ส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นสันโกสๆ กับรอยไถครูดที่ต่อมามีการพัฒนาเกิดเป็นร่องโดยไม่มีเนื้อวัสดุถูกเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิว รูปแบบที่สองถูกเรียกว่าเกิดการตัดเฉือนเนื่องจากมีลักษณะคล้ายๆ กับการตัดเฉือนในระดับไมโครเมตร ซึ่งเนื้อวัสดุถูกแทนที่ด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่ถูกขจัดออกมาเป็นเศษเล็กๆ (Chip)

3) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue Wear) การสึกหรอแบบล้าตัว (ที่แสดงในรูปที่ 2.14c) เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเป็นวัตถุที่ได้รับความเค้นเป็นวงโคจร ส่งผลให้เกิดความเครียด (strain) ภายใต้อันผิวบางๆ ของวัสดุ ที่ก่อให้เกิดเป็นรอยร้าวเล็กๆ ภายในวัสดุขนานกับพื้นผิวของวัสดุ และเมื่อไต่ก็ตามที่รอยร้าวเหล่านี้มีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงขนาดวิกฤติจะทำให้เกิดการหลุดออกมาของแผ่นชิ้นส่วนย่อยหรือเกล็ดที่มีลักษณะเป็นเศษซากของการสึกหรอ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มักถูกกล่าวถึงว่าเป็นการสึกหรอที่เกิดจากการแตกออกของชั้นพื้นผิว (Delamination Wear)

กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการแพร่ขยายของรอยร้าวบริเวณที่มีการแปรรูปซ้ำๆ ของวัสดุที่มีการเสียดทาน โดยเศษซากของการสึกหรอ (Wear Debris) มีสาเหตุมาจากการขยายตัวและการฉีกขาดของรอยร้าวขนาดเล็กบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการล้า ไถการสึกหรอแบบล้าตัวนี้เกิดขึ้นหลังจากวัสดุสัมผัสกับการเสียดทานเป็นเวลานาน ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า เมื่อวัสดุรับภาระซ้ำๆ วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาวะภายในเนื่องจากความเค้นภายในที่เกิดขึ้นซ้ำๆ และสะสมในเนื้อวัสดุ โดยความเค้นที่เกิดขึ้นซ้ำๆ และสะสมอยู่ภายในเนื้อวัสดุนี้ไม่สามารถขจัดออกให้หมดไปได้ แต่ปริมาณความเค้นสะสมที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวเร่งและพัฒนาไปสู่เกิดการแตกร้าวของวัสดุ และปริมาณการแตกร้าวของวัสดุจะขยายอาณาบริเวณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณความเค้นสะสมที่เพิ่มขึ้น ขบวนการที่ขึ้นในลักษณะคล้ายกันนี้สามารถเกิดขึ้นกับวัสดุที่อยู่ภายใต้แรงเสียดทานที่เรียกว่า “ความล้าเสียดทาน (Friction Fatigue)” ซึ่งแตกต่างจากความล้าของวัสดุก่อน เนื่องจากความล้าเสียดทานนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวและภายใต้ผิวของวัสดุเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การแตกร้าวจากความล้าจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณจุดเล็กๆ บนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นแนวสัมผัสความเค้นหรือเกิดการดัดแปรรูปสูงสุด จากทฤษฎี และผลการทดลอง

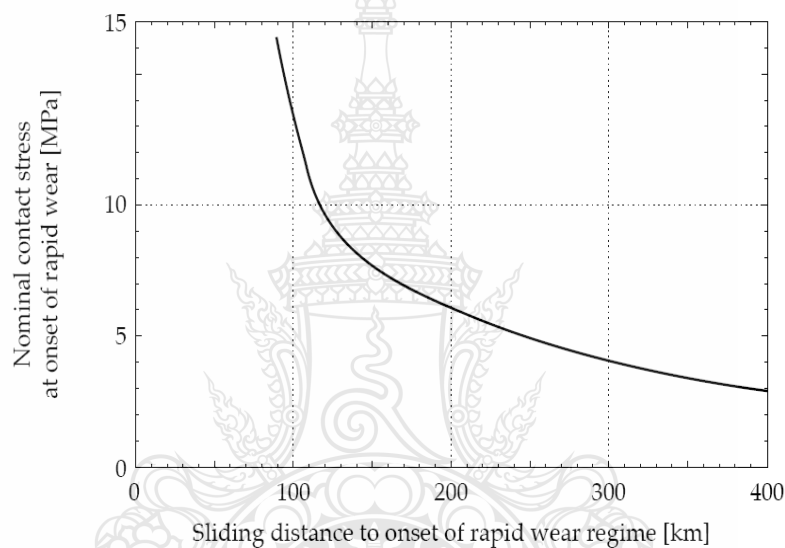
แสดงให้เห็นว่า ภายใต้อาณานิคมที่รับภาระจะเป็นตำแหน่งแนวสัมผัสความเค้นสูงสุดซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์จะทนต่อวัฏจักรความเค้นจากการลื่นไถลกลับไปกลับมาซ้ำๆ จำนวนหลายๆ รอบ และต่อมาส่งผลให้บริเวณผิวสัมผัสเกิดการสึกหรอแบบล้าตัว โดยพฤติกรรมการสึกหรอแบบล้าตัวนี้สามารถสังเกตเห็นได้จากตัวอย่างวัสดุ UHMWPE ที่มีการลื่นไถลต้านกับพื้นผิวสัมผัสโลหะที่มีความเรียบสูง ซึ่งอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการลื่นไถลเสียดสีเป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร [24] ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัว หลังจากผ่านการลื่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ [24]

อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นนี้เพิ่มขึ้นพร้อมๆ กับการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นและการแตกออกเป็นลอนขึ้นเล็กๆ ของพื้นผิวพอลิเมอร์ที่สึกหรอ โดยความเสียหายหรือการสึกหรอของพื้นผิวที่เป็นการสึกหรอแบบล้าตัวจะถูกพบหลังจากพื้นผิวลื่นไถลเป็นระยะทางไกลๆ โดยแสดงให้เห็นการแตกและลอนเศษชิ้นส่วนของการแตกอย่างเด่นชัดบนชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ที่ถ่ายเนื้อ

(Transfer Film) ลงบนผิววัสดุคู่สัมผัสที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของขบวนการสึกหรอแบบยึดติด [24] ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอจากการสึกหรอแบบยึดติดเป็นการสึกหรอแบบล้าตัวนั้นจะถูกควบคุมด้วยความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีความเค้นสัมผัสต่ำกว่า 1 MPa การลื่นไถลเป็นระยะทางอนันต์ (Infinite) นั้นจะเกิดการสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเสมอ โดยการสึกหรอแบบล้าตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับการรับภาระที่สูง ลื่นไถลบนพื้นผิวที่เรียบและไถลด้วยระยะทางไกลๆ ซึ่งจากตัวอย่างการทดลองการล้าตัวของวัสดุ UHMWPE ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวที่ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16



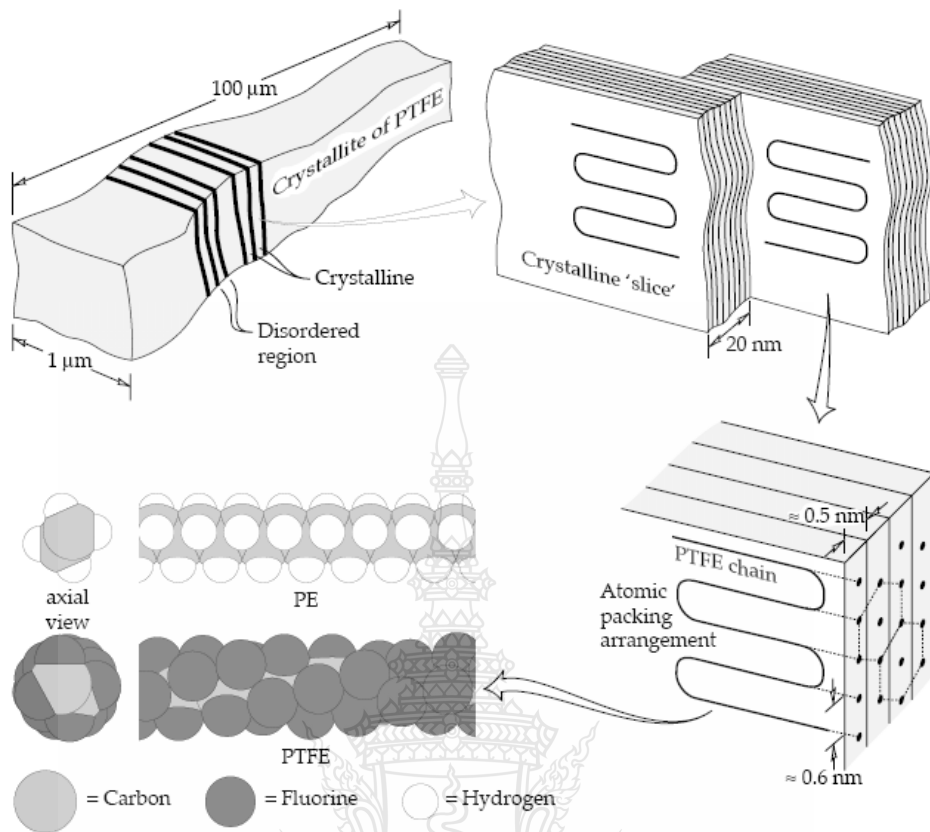
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น [24]

การสึกหรอของวัสดุโดยทั่วไปจะมีความแตกต่างของปรากฏการณ์ของการสึกหรอที่เกิดขึ้น 3 ระยะ [25] คือ การสึกหรอระยะเริ่มต้น (Running-In) การสึกหรอระยะคงตัวหรือสม่ำเสมอคงที่ (Steady State) การสึกหรอระยะรุนแรง (Wear Out) สำหรับในกรณีของการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสระหว่างโลหะ-พอลิเมอร์ในระยะแรกจะหมายถึงการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะ โดยสมบัติทางด้านโทรโพลีของระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะ ซึ่งประกอบด้วยสมบัติพื้นฐานทางกายภาพ ทางเคมี และทางกลของวัสดุ ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อหรือเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวของโลหะ บริเวณหรือส่วนของพื้นที่พื้นผิวโลหะที่ปกคลุมด้วย

ชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ความรุนแรงของปฏิกิริยายึดติดบนผิวโลหะ ซึ่งสมบัติจำเพาะเหล่านี้ถูกยืนยันด้วยผลการทดลองและรายงานผลการศึกษาวิจัยที่น่าเสนอโดยนักวิจัยหลายๆ ท่าน [26-28]

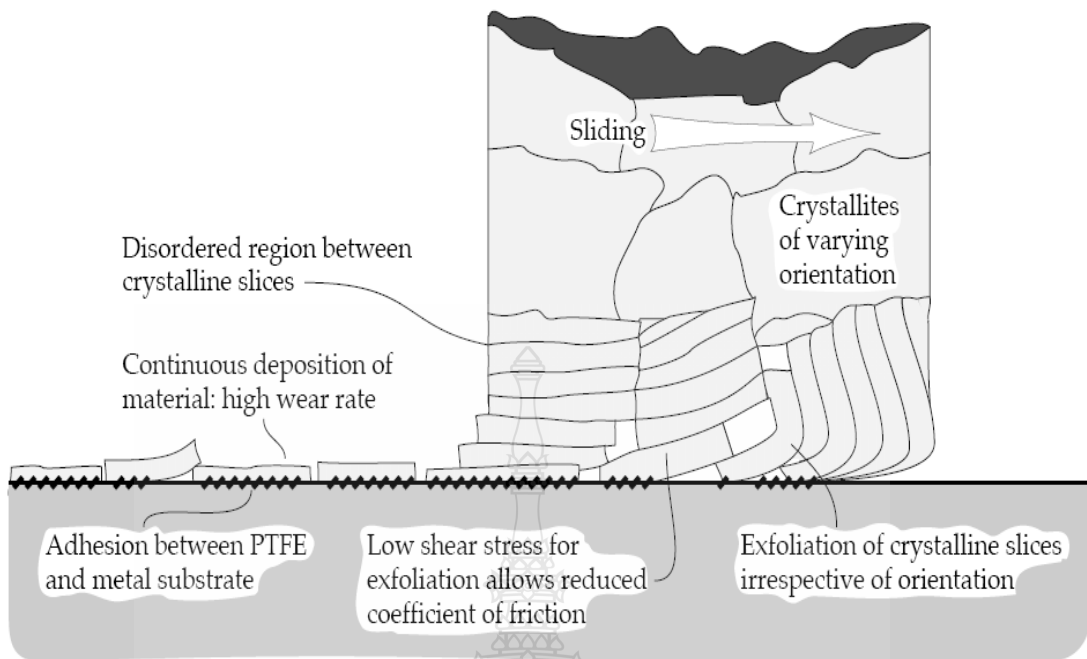
ดังที่ทราบกัน โดยทั่วไปว่า พอลิเมอร์เกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวแข็งของโลหะด้วยวิธีการดูดซับ [29] ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่า ส่วนประกอบที่เกาะยึดติดแน่นอยู่ด้วยพันธะของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับ การดูดซับระดับไมโครโมเลกุล (Micro Molecules) ที่จำกัดการเคลื่อนที่ของหมู่ฟังก์ชัน (Functional Group) โดยการจำกัดการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลจะมีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อพฤติกรรมทางด้านโทรโพลีของพอลิเมอร์

สำหรับการอธิบายการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ที่ถ่ายเนื่อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสในการลื่นไถลแล้วส่งผลให้เกิดการสึกหรอของพอลิเมอร์ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเตตราฟลูออโรเอทีลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื่อบนพื้นผิวโลหะที่แสดงในรูปเป็นตัวอย่างชั้นฟิล์ม PTFE ที่เกิดขึ้นในสถานะสุญญากาศที่มีการยึดเกาะแนบติดกับพื้นผิวโลหะอย่างแข็งแรง [30] ปรัชญาการยึดเกาะแนบติดที่เกิดขึ้นนี้ มีความเข้าใจว่าเป็นปฏิกิริยาทางเคมีของบริเวณจุดที่สัมผัสกันระหว่างฟลูออรีน (Fluorine) และคาร์บอนกับพื้นผิวโลหะที่ลื่นไถลต้านกัน [30,31] ถึงแม้ว่าอาจจะมีความเป็นไปได้ที่ว่า การเกาะยึดแนบติดที่แข็งแรงระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ แต่โครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเฉพาะของ PTFE ทำให้เกิดกลไกของการถ่ายเนื่อฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ที่เป็นลักษณะเฉพาะสำหรับ PTFE



รูปที่ 2.17 โครงสร้างผลึกของ PTFE และ โครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE [32-35]

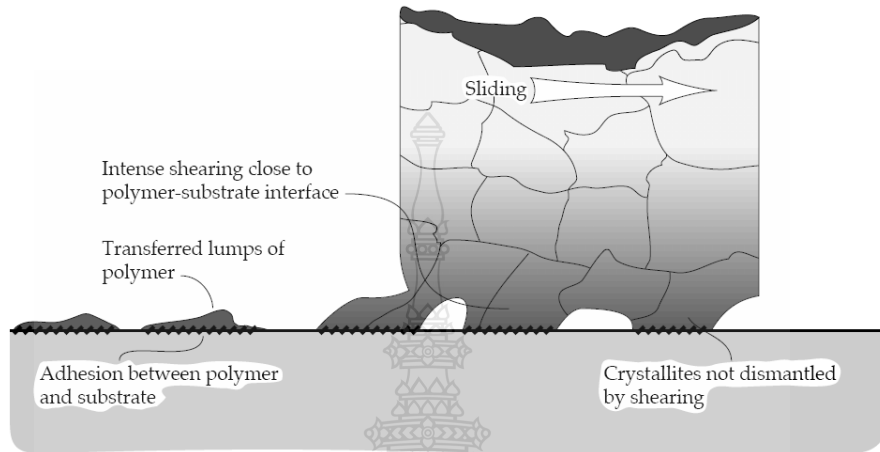
จากการที่มีช่องว่างหรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกทำให้มีความมั่นใจได้ว่าโมเลกุลของ PTFE สามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่อยู่ภายใต้ความเค้น สำหรับในส่วนของโครงผลึกของ PTFE จะประกอบด้วยชั้นของส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) ชั้นอยู่ระหว่างชั้นของเนื้อวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) ซึ่งอ่อนแอและเสียรูปได้ง่าย ส่งผลให้ PTFE เกิดการแปรรูปได้ง่ายในจุดของชั้นแผ่นที่ต่อเนื่องกัน [32] โดยบริเวณของ PTFE ที่ลื่นไถลสัมผัสกับพื้นผิวที่แข็งจะเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุในรูปของชั้นแผ่นเนื้อวัสดุที่ลื่นไถลออกมา ซึ่งส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำและมีอัตราการสึกหรอสูง [34,35] ซึ่งกลไกการสึกหรอของ PTFE มีลักษณะดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การสึกหรอและกลไกการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายโอนบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE [19]

กลไกการถ่ายชั้นฟิล์ม (Film Transfer Mechanism) พอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสที่มีพฤติกรรมคล้ายๆ กับการถ่ายชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ของ PTFE ในปัจจุบันยังไม่มี การสังเกตเห็นในพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ โดยปริมาณเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สะสมบนพื้นผิวโลหะที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นจะกระตุ้นให้เกิดขบวนการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy Transfer) เมื่อมีการลื่นไถลด้านกับพื้นผิวของแข็ง [36] แต่กลไกที่ทำให้เกิดขบวนการถ่ายโอนออกมาเป็นก้อนไม่พบในวัสดุมีข้อยกเว้นเล็กน้อยสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) และ Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) [33] พฤติกรรม การสึกหรอที่เกิดขึ้นที่มีลักษณะกับ PTFE ทำให้เข้าใจได้ว่ามีสาเหตุมาจากลักษณะเฉพาะต่างๆ ไปของ รายละเอียดพื้นฐานของโมเลกุล (Smooth Molecular Profile) หรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ [37] แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการลื่นไถลของ PTFE HDPE และ UHMWPE มีอิทธิพลมาจากสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานสถิต (Static Coefficient of Friction) ซึ่งค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic Coefficient of Friction) ประมาณ 50% [38] เนื่องจากในช่วงแรกของการเริ่มต้นการลื่นไถลมีความจำเป็นต้องใช้แรงที่สูงกว่าเป็นพิเศษสำหรับการเริ่มก่อตัวเพื่อสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ที่ถ่าย

เนือบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส สำหรับในส่วนของกลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy Transfer) จะมีลักษณะของการเกิดพฤติกรรมการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นเป็นก้อนพอลิเมอร์ที่หลุดออกมาจากปลายยอดสูงสุดของความหยาบผิว และเกิดการเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวคู่สัมผัส



รูปที่ 2.19 กลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy Transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่ [19]

ขนาดของก้อนพอลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย  $1\ \mu\text{m}$  [38] เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สัมผัสมีขนาดเล็กมากๆ เมื่อเทียบกับระนาบของฟิล์มของ PTFE ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับภาระของก้อนพอลิเมอร์เป็นการรับภาระของฟิล์ม PTFE ที่มีขนาดเล็ก ลักษณะหรือรูปแบบของการถ่ายเนื้อชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ต่างๆ นี้ไม่ทำให้ลักษณะจำเพาะของการสึกหรอและการเสียดทานของการลื่นไถลสัมผัสดีขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่แสดงพฤติกรรมการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนจะไม่ใช่วัสดุรองลื่น (Bearing Materials) ที่มีประสิทธิภาพมากนัก

เมื่อไต่หรือตามทีวัสดุพอลิเมอร์ลื่นไถลด้านกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ พอลิเมอร์ที่มีการเกาะยึดแนบติดกันอย่างอ่อนแอหรืออ่อนแอกว่า จะเกิดการสึกหรอมากกว่า โดยเกิดการก่อตัวถ่ายเนื้อเป็นชั้นฟิล์มบนพอลิเมอร์ที่มีการความแข็งแรงของการเกาะยึดแนบติดเข้าด้วยกันมากกว่า โดยพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นมีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอที่สังเกตพบในวัสดุที่ไม่ใช่พอลิเมอร์ [39]

4) การสึกหรอแบบไตรโบเคมี (Tribochemical Wear) การสึกหรอแบบไตรโบเคมีคอล (ที่แสดงในรูปที่ 2.14d) เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับการขยายตัวของฟิล์มของผลผลิตจากการทำ



ปฏิกิริยาของปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวต่างๆ ที่มีการสัมผัสซึ่งกันและสภาพแวดล้อมที่ล้อมรอบ หนึ่งในรูปแบบส่วนใหญ่ของการสึกหรอแบบแบบไทรโบเคมีคอลล คือ การสึกหรอในลักษณะไทรโบ-ออกซิเดชัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากการเสียดทานเป็นตัวเร่งให้เกิดการขยายปริมาตรออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งออกไซด์ฟิล์มจะแยกออกจากพื้นผิววัสดุเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจนถึงความหนาวิกฤติเป็นเศษซากของการสึกหรอ

กลไกการสึกหรอแบบไทรโบเคมีเกิดจากการขาดหรือออกของสายโซ่พอลิเมอร์และหมู่เคมีที่อยู่บริเวณด้านข้างของสายโซ่หลัก ซึ่งต่อมาจะเกิดการก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่ การก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นกับโลหะและเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาไทรโบออกซิเดชัน (Tribo-Oxidation) บนพื้นผิวโลหะแล้วถ่ายทอดไปยังพื้นผิวพอลิเมอร์โดยอยู่ในรูปอนุภาคที่เกิดการถ่ายทอดขนาดไมโคร แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาไทรโบเคมีที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวขัดขวางการยึดติดของอนุภาคที่เกิดการถ่ายทอดขนาดไมโครกับพื้นผิวสัมผัสของลูกกลิ้ง

## 2.5 การทดสอบการสึกหรอ [40]

### 2.5.1 วิธีการทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอ มีหน้าที่หลักๆ อยู่ 2 ประการคือ

1) เพื่อจัดลำดับของวัสดุและสารหล่อลื่นตามประสิทธิภาพการใช้งานภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด

2) สามารถนำความเสียหายจากการสึกหรอที่เกิดขณะทำการทดสอบมาศึกษา

ก่อนที่เราจะเริ่มออกแบบการทดสอบการสึกหรอ ผู้ทดสอบจะต้องรับมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกของการสึกหรอที่มีความซับซ้อนอยู่ในตัวของมันเอง ซึ่งทำให้ผู้ทดสอบไม่สามารถอธิบายกลไกหนึ่งๆ ได้อย่างสมบูรณ์

ดังนั้น การทดสอบเพื่อจุดประสงค์ในการหาข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการประเมินคาดการณ์อายุการใช้งานของชิ้นงานหนึ่งๆ จึงทำได้ค่อนข้างยาก การออกแบบขั้นตอนการทดสอบการสึกหรอที่เป็นที่ยอมรับกันในวงการศึกษาด้านไทรโบโลยีว่า เป็นเรื่องที่ยากยิ่งกว่ามาก และการพัฒนาเครื่องทดสอบการสึกหรอที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ครอบคลุมกว้างขวางไม่มีทางเกิดขึ้นได้ง่ายๆ ดังนั้น นักวิจัยในสาขานี้จึงมุ่งเป้าไปที่การทดสอบการสึกหรอแบบเฉพาะทาง เช่น เครื่องมือสำหรับการทดสอบการสึกหรอแบบขูดถูสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ประเภทที่ยอมรับกันทั่วไป ได้แก่ Gouging, High Stress และ Erosion Predominates เป็นต้น ไม่ว่าจะศึกษาการสึกหรอประเภทใด

ก็ตาม ต่างก็มีกฎเกณฑ์พื้นฐานบางประการที่จะต้องระลึกไว้อยู่เสมอในการออกแบบการทดสอบเพื่อให้ผลการทดสอบที่ได้มีความหมายและสามารถนำไปใช้ในการคาดเดาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานทางด้านโทรโบลยีของวัสดุนั้นๆ

ปัจจุบันได้มีบทความและรายงานผลการศึกษาวิจัยออกมามากมายเกี่ยวกับเรื่องของการทดสอบการสึกหรอ โดยมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงและปัญหาที่เกิดขึ้นในการตีความหมายของผลการทดลอง ดังนี้

1) พิสูจน์แล้วว่ามีความเชื่อถือได้ (Reliability) และมีการทำได้ ซึ่งค่าต่างๆ เหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจได้ว่า ผลการทดสอบสามารถเชื่อถือได้มากน้อยแค่ไหน เมื่อต้องการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุต่างชนิด

2) พิสูจน์แล้วว่ามีความสามารถในการจัดลำดับวัสดุประเภทต่างๆ เช่น ในกรณีที่มีวัสดุหลายชนิดที่มีค่าความต้านทานการสึกหรอจากการทดสอบที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าการทดสอบจะมีความสามารถในการทำซ้ำได้ (Reproducibility) ดี แต่ก็อาจไม่สามารถจัดลำดับวัสดุนั้นๆ ได้

3) สามารถนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์กับการทดสอบภาคสนามหรือการใช้งานจริงได้

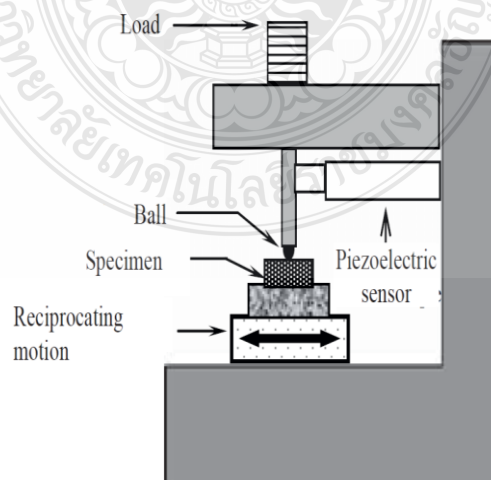
4) เงื่อนไขข้อสุดท้าย เป็นปัญหาที่พบมากที่สุดในการออกแบบการทดสอบหนึ่งๆ เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวจะต้องสามารถจำลองสภาวะการใช้งานจริงได้อย่างเที่ยงตรง หรือถึงแม้ว่าการทดสอบจะถูกดัดแปลงให้ง่ายขึ้น แต่ก็ยังคงต้องสามารถทดสอบกลไกการสึกหรอขึ้นพื้นฐานที่เกิดขึ้นขณะใช้งานได้ และนอกจากนี้ การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับผลจากการใช้งานจริง (ที่ถูกควบคุมสภาวะและปัจจัยต่างๆ ไว้) ก็ยังทำได้ยาก และการใช้งานจริงในแต่ละครั้งมักจะมีสิ่งที่แตกต่างกันเล็กน้อย (โดยเฉพาะปัจจัยที่ควบคุมได้ยาก เช่น อุณหภูมิของระบบและความชื้นในอากาศ เป็นต้น) ทำให้ไม่สามารถหาค่าความเชื่อถือและความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ (Experimental Error) ได้

การประเมินค่าความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุที่หน้างานภายใต้สภาวะการใช้งานจริงมักจะถูกจำกัดด้วยเหตุผลที่ว่า การทดสอบและการเก็บข้อมูลจะต้องกระทำในเวลาที่จะสร้างความกระทบกระเทือนต่อการทำงานของอุตสาหกรรมนั้นๆ น้อยที่สุด ยกตัวอย่างเช่นในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasion) ของชิ้นส่วนต่างๆ ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่หรืออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ ซึ่งการหยุดขบวนการผลิตจะมีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดผลกระทบขึ้นน้อยที่สุด แน่แน่นอนว่าปัญหานี้มาจำกัดประเภทและจำนวนของตัวแปรที่สามารถนำมาทำการศึกษาได้ต่อครั้ง นอกจากนี้ ก็จะต้องมีช่างเทคนิคอยู่ที่หน้างานด้วยเพื่อดูแลขั้นตอนการทดสอบและจัดเก็บข้อมูลที่ต้องการ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ การทดสอบการ

สึกหรอส่วนใหญ่จึงต้องทำในห้องทดลองเพื่อให้สามารถเลือกและควบคุมสภาวะการทดสอบได้ตามที่ต้องการ

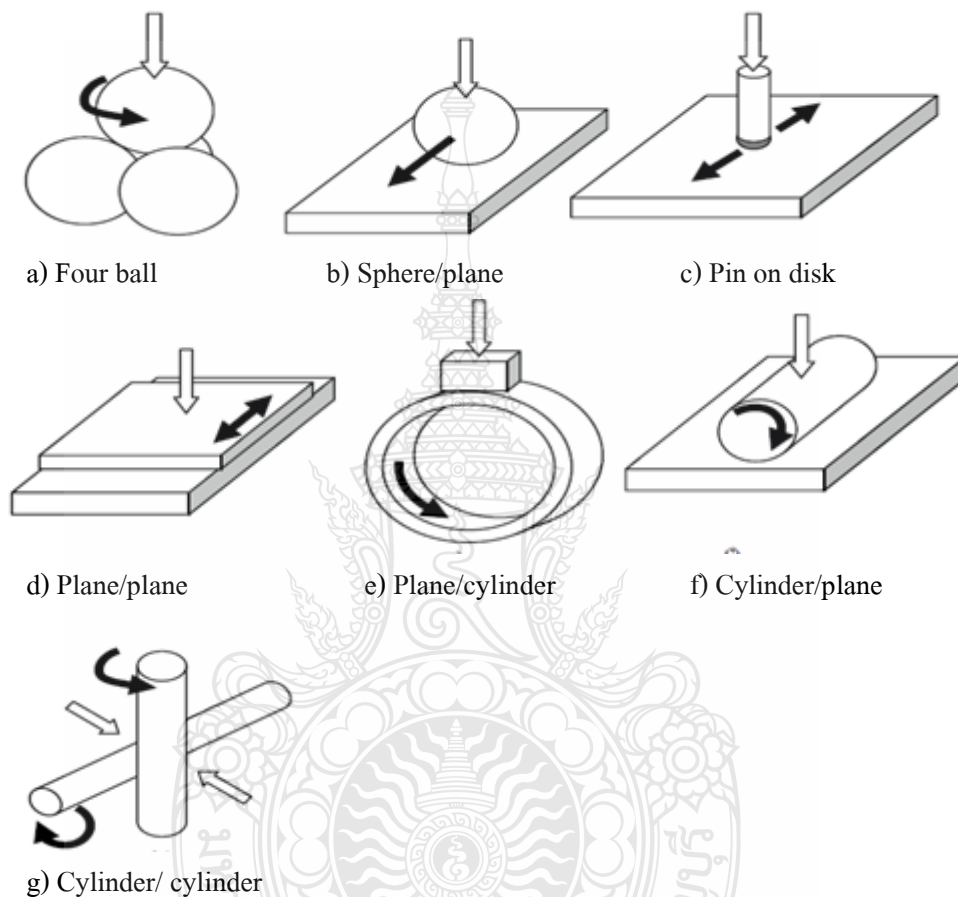
ปัญหาอย่างหนึ่งที่นักวิเคราะห์ทดสอบจะต้องประสบคือระยะเวลาของการทดสอบโดยทั่วไปอุตสาหกรรมต้องการผลการทดสอบการสึกหรอค่อนข้างเร็วเพื่อนำมาวิเคราะห์แก้ไขปัญหาและเลือกใช้วัสดุ แต่เนื่องจากระยะเวลาที่มีสั้นเกินกว่าที่จะทำให้ได้ผลที่ชัดเจนตามต้องการ นักวิเคราะห์จึงต้องใช้วิธีเพิ่มความรุนแรงของการทดสอบ ซึ่งการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการเร่งรัดการทดสอบในลักษณะนี้อาจจะมีผลกระทบต่อกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นจนถึงระดับที่ว่า การทดสอบนั้นไม่สามารถนำมาใช้อ้างอิงถึงสภาวะการใช้งานจริงได้อีกต่อไป เช่น การเพิ่มอุณหภูมิที่บริเวณผิวสัมผัส อาจทำให้ค่าความสามารถในการต้านทานการสึกหรอของวัสดุที่ทดสอบหลายชนิดลดลง แต่ลดลงในอัตราที่ไม่เท่ากัน เป็นต้น

การทดสอบทางด้านไทรโบโลยีเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุด้วยเครื่อง ไทรโบมิเตอร์ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ในสภาวะบรรยากาศปกติหรือควบคุมบรรยากาศ และนอกจากนี้ยังสามารถทำการทดสอบแบบได้ในสภาวะที่มีสารหล่อลื่นและปราศจากสารหล่อลื่น รูปที่ 2.20 แสดงตัวอย่างลักษณะของเครื่อง ไทรโบมิเตอร์ชนิดหนึ่งสำหรับห้องปฏิบัติการที่ทำการทดสอบด้วยหลักการ Ball on Disk ที่มีระบบการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและข้างหลังสลับกัน การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ โดยทั่วไปประกอบด้วย แรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบ ความเร็วของการไถล และสภาวะแวดล้อมของการทดสอบ (ความชื้น และการควบคุมบรรยากาศ กล่าวคือ ธรรมชาติและความดันของก๊าซที่เติมเข้าไปในระบบการทดสอบ) สำหรับการวัดผลการทดสอบ โดยทั่วไปเป็นการวัดแรงเสียดทาน อุณหภูมิของพื้นผิววัสดุ ความต้านทานการสัมผัสและความต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 2.20 เครื่องทดสอบการสึกหรอ Ball on disk Tribometer [19]

การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานวัสดุที่ต้องการนำไปใช้ ซึ่งวิธีการทดสอบมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของการสัมผัสที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะรูปร่างของการสัมผัสของการทดสอบไทรโบมิเตอร์ [19]

การทดสอบการสึกหรอของวัสดุด้วยวิธีการแบบ Block on ring ตามมาตรฐาน ASTM G77 ชิ้นงานทดสอบจะอยู่ในรูปของก้อนสี่เหลี่ยมที่ถูกกดลงบนวงแหวนทดสอบที่หมุนอยู่กับที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งสามารถปรับและควบคุมความเร็วรอบของการทดสอบได้ตามต้องการ สำหรับในส่วนของการวัดเพื่อประเมินอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบนั้นสามารถวัดประเมินได้จากความกว้างของรอยสึกหรอ ซึ่งสามารถผลการทดสอบออกมาเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงพื้นที่รอยสึกหรอต่อหน่วยแรงกดคูณระยะทางที่ทำการทดสอบ ( $\text{mm}^2/\text{Nm}$ ) และนอกจากนี้การประเมินอัตราการสึก

หระของชั้นทดสอบ สามารถประเมินได้จากน้ำหนักของชั้นทดสอบที่สูญเสีย ซึ่งสามารถแปลงผลการทดสอบออกมาเป็นปริมาณที่สูญเสีย (Volume loss) เทียบปริมาณที่สูญเสียของวัสดุวงแหวนคู่สัมผัส ซึ่งวิธีการทดสอบนี้สามารถนำมาทำการทดสอบวัสดุได้หลายประเภท รวมทั้ง โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และผิวเคลือบ โดยวิธีการทดสอบแบบ Block on ring มีลักษณะดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การทดสอบการสึกหรอของวัสดุด้วยวิธีการแบบ Block on ring [40]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษางานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและทดลองให้ เป็นไปได้อย่างถูกต้อง ซึ่งมีดังนี้

2.6.1 การศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันในสายโซ่พอลิเมอร์ในกระบวนการฆ่าเชื้อวัสดุก่อน UHMWPE สำหรับงานศัลยกรรมด้วยการฉายรังสีแกมมาและเอทิลีนออกไซด์ [41]

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาการเกิดออกซิเดชันในสายโซ่โมเลกุลของวัสดุก่อน UHMWPE สำหรับงานศัลยกรรม ด้วยการฉายรังสีแกมมาและเอทิลีนออกไซด์ ซึ่งมาตรฐานของการเสื่อมสภาพของ UHMWPE ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพิกแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานต่างๆต่อไปนี้ พิกที่  $2000-2600\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Methylene ( $-\text{CH}_2-$ ) ที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์, พิกที่  $1850-1700\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl ( $\text{C}=\text{O}$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์, พิกที่  $1640\text{ cm}^{-1}$  และ  $966\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl ( $\text{C}=\text{C}$ ) และ trans-vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์, พิกที่  $910\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Terminal Vinyl ( $-\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$ )

$\text{CH}=\text{CH}_2$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ และการถูกตัดภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ซึ่งการวิเคราะห์ IR spectrum โดยการฉายรังสีแกมมา การฉายรังสีใช้ประมาณ 25 ถึง 30 kGy โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน พบว่าเกิดการออกซิเดชันในสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุก่อน UHMWPE เนื่องจากพบสัญญาณการสั่นของ IR spectrum ที่  $1740\text{ cm}^{-1}$  และ  $1712\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏว่าสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพหรือการสลายตัว ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง

2.6.2 การศึกษาอิทธิพลของการเตรียมวัสดุผง UHMWPE ด้วยวิธีทางกล (Mechanical Activation) ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอ [42]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE โดยทำการเตรียมผง UHMWPE ด้วยวิธีทางกล (Mechanical Activation) ก่อนที่จะทำการอัดขึ้นรูป ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE โดยการเตรียมผง UHMWPE ด้วยวิธีทางกล (Mechanical Activation) ก่อนที่จะทำการอัดขึ้นรูป การเตรียมผงด้วยวิธีทางกล แบ่งออกเป็นการบดด้วยเวลา 0, 10, 20, 30, 40 นาที ตามลำดับ หลังจากนั้นถูกนำไปขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Hot Compression โดยใช้ แรงกดอัดในการขึ้นรูป 10 MPa อุณหภูมิ  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราการไหลน้ำหล่อเย็น 3-4 ลิตร/นาที ทำการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติการสึกหรอ โดยการทดสอบการสึกหรอดำเนินการทดสอบด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ขนาดของชิ้นทดสอบ  $10\times 10\times 10$  มิลลิเมตร โดยการทดสอบแบบแห้ง วงแหวนทดสอบ  $\varnothing 62$  มิลลิเมตร ทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ความเร็วในการเสียดสี 0.3 m/s แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N การวัดอัตราการสึกหรอ ทำการวัดโดยการถ่ายภาพรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาที่ใส่ทดสอบ แล้วนำมาคำนวณหาอัตราพื้นที่รอยสึกหรอด้วยโปรแกรม Rhinoceros V.3.0 และทำการลากเส้นตามขอบเพื่อดูรอยสึกที่เกิดขึ้น และยังได้ศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี

ผลการศึกษาวิจัยพบว่า เวลาของการเตรียมวัสดุ (MA) 20 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุดและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำสุดเท่ากับ 1.33 ซึ่งโครงสร้างจุลภาคไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or Flake Pattern) และจากการศึกษาเอกลักษณ์ทางเคมี พบว่า IR Spectrum ไม่มีสัญญาณการสั่นของหมู่ Carbonyl ( $\text{C}=\text{O}$ ) แต่จะพบสัญญาณการสั่นของหมู่ Methylene ( $-\text{CH}_2-$ ) หมู่ Vinyl ( $\text{C}=\text{C}$ ) และ Trans-Vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด

Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์

2.6.3 ความต้านทานการเสียดทานนาโนคอมโพสิตที่ผสมวัสดุผง UHMWPE ด้วยการปรับปรุงผงด้วยวิธีทางเคมี เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและ สมบัติทางโทรโบโลยี [43]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยวัสดุผง UHMWPE นาโนคอมโพสิตด้วยการปรับปรุงทางเคมีโดยการผสม LDPE Grafted และ UHMWPE Grafted ซึ่งมีส่วนผสมของ Maleic Anhydride อัตราการผสม 1-20 wt% หลังจากนั้นถูกนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression โดยใช้แรงกดอัดในการขึ้นรูป 10 MPa อุณหภูมิ 190 °C อัตราการไหลน้ำหล่อเย็น 3-4 ลิตร/นาที จากนั้นทำการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติการสึกหรอ โดยการทดสอบการสึกหรอดำเนินการทดสอบด้วยวิธี Block on Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77, ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G99, วิเคราะห์สมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึงและทดสอบความแข็ง วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเอกลักษณ์ทางมี

ผลการศึกษาวิจัยพบว่า การปรับปรุงวิธีทางเคมีช่วยให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอต่ำ ซึ่งอัตราการผสม LDPE Grafted อัตราการผสมที่ 10 wt% มีการยึดตัวได้ดี มีค่าความหยาบผิวต่ำสุด และมีอัตราการสึกหรอต่ำ โดยยืนยันผลโดยตรวจสอบปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ซึ่งมีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 68.6 % สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้อัตราการสึกหรอต่ำ และเมื่อวิเคราะห์ IR Spectrum พบว่าขึ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression บางชิ้นแสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 1100  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Carbonyl (C=O) ที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ จากการที่หมู่ anhydride ปรากฏในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลทำให้อัตราการสึกหรอสูงหรือความต้านทานการสึกหรอต่ำ

2.6.4 การเปรียบเทียบวิเคราะห์อิทธิพลของอนุภาคนาโนออกไซด์อนุภาคนาโนเมตรและไมโครเมตรที่มีผลต่อสมบัติทางโทรโบโลยีและสมบัติทางกลของ UHMWPE [44]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบวิเคราะห์อิทธิพลของอนุภาคนาโนเมตรและไมโครเมตรที่มีผลต่อสมบัติทางโทรโบโลยีและสมบัติทางกลของ UHMWPE โดยการผสมอนุภาคนาโนไฟเบอร์ อัตราการผสม 0.1-0.5 wt%, อนุภาคนาโนออกไซด์ขนาดอนุภาค 200-500 นาโนเมตร อัตราการผสม 0.1-0.5 wt% และอัตราการผสมอนุภาคนาโนออกไซด์ขนาดอนุภาค 3-5 ไมโครเมตร อัตราการผสม 20 wt% ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression โดยใช้แรงกดอัดในการขึ้นรูป 10 MPa อุณหภูมิ 190 °C อัตราการไหลน้ำหล่อเย็น 3-4 ลิตร/นาที จากนั้น

ทำการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติการสึกหรอ โดยการทดสอบการสึกหรอดำเนินการทดสอบด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77, ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G99 และ DIN 50324 วิเคราะห์สมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงดึงและทดสอบเอกลักษณ์ทางมีโดยการวิเคราะห์ IR Spectrum

ผลการศึกษาวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชั้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.13-0.14 อัตราการผสมอลูมิเนียมออกไซด์นาโนไฟเบอร์ อัตราการผสมที่ 0.5 wt% มีความต้านทานแรงดึงสูงสุด มีค่าความหยาบผิวต่ำสุด และมีความต้านทานการสึกหรอสูงสุด เมื่อวิเคราะห์ IR Spectrum พบว่าเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ และเมื่อวิเคราะห์ IR Spectrum ของอัตราการผสมอลูมิเนียมออกไซด์ขนาดอนุภาค 3-50 ไมโครเมตร อัตราการผสม 20 wt% พบว่าเกิดการออกซิเดชันในสายโซ่โมเลกุลของวัสดุก่อน UHMWPE เนื่องจากพบสัญญาณการสั่นของ IR Spectrum ที่  $1200\text{ cm}^{-1}$  และ  $802\text{ cm}^{-1}$  ปรากฏว่าสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพหรือการสลายตัว ส่งผลทำให้มีความต้านทานการสึกหรอต่ำ

2.6.5 การศึกษาอัตราการสึกหรอของ PTFE โดยการผสม ZnO ที่มีขนาดอนุภาค 50 nm ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-Ring Tribometer [2]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยอัตราการสึกหรอของ PTFE โดยการผสม ZnO ที่มีขนาดอนุภาค 50 nm ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-ring Tribometer โดยใช้วัสดุ Stainless Steel เป็นวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้ในการเสียดสี กำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 200 N ความเร็วของการเสียดสีเท่ากับ 0.431 m/s

ผลการศึกษาวิจัยพบว่า ปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  15 wt % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $13 \times 10^{-6}\text{ mm}^3/\text{Nm}$

2.6.6 การศึกษาอัตราการสึกหรอ ของ Epoxy โดยการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดอนุภาค 3.8 nm ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-Ring Tribometer [3]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยอัตราการการสึกหรอ ของ Epoxy โดยการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดอนุภาค 3.8 nm ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-ring Tribometer โดยใช้วัสดุ Carbon steel เป็นวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้ในการเสียดสี กำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 1 MPa ความเร็วของการเสียดสีเท่ากับ 1 m/s

ผลการศึกษาวิจัยพบว่า ปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1.6 wt % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $8 \times 10^{-6}\text{ mm}^3/\text{Nm}$



2.6.7 การศึกษาอัตราการสึกหรอ ของ PEEK โดยการผสม  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดอนุภาค 15 นาโนเมตร ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-ring Tribometer [4]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยอัตราการสึกหรอ ของ PEEK โดยการผสม  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดอนุภาค 15 นาโนเมตร ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-ring Tribometer โดยใช้วัสดุ Carbon Steel เป็นวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้ในการเสียดสี กำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 196 N ความเร็วของการเสียดสีเท่ากับ 0.42 m/s

ผลการศึกษาวินิจฉัยพบว่า ปริมาณ การผสม  $Al_2O_3$  5 wt % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $3.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$

2.6.8 การศึกษาอัตราการสึกหรอ ของ PS โดยการผสม MWCNT ที่มีขนาดอนุภาค 10-20 นาโนเมตร ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-ring Tribometer [5]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัยอัตราการสึกหรอ ของ PEEK โดยการผสม MWCNT ที่มีขนาดอนุภาค 10-20 นาโนเมตร ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Block-on-ring Tribometer โดยใช้วัสดุ Carbon steel เป็นวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้ในการเสียดสี กำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 50 N ความเร็วของการเสียดสีเท่ากับ 0.431 m/s

ผลการศึกษาวินิจฉัยพบว่า ปริมาณ การผสม MWCNT 1.5 wt % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$

2.6.9 สรุปเป็นองค์ความรู้ที่ได้จากการอ้างอิงตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การเตรียมชิ้นทดสอบ โดยการศึกษาอัตราการสึกหรอด้วยวิธีแบบ Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 สอดคล้องกับงานวิจัยของ [2-5,42] การเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์สอดคล้องกับงานวิจัยของ [42,46] การสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอสูงสอดคล้องกับงานวิจัยของ [43-44,49] ปริมาณความเป็นผลึกสูงส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอต่ำสอดคล้องกับงานวิจัยของ [49] สมบัติทางกลที่สูงและอัตราการสึกหรอที่ต่ำมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวินิจฉัยของ [49] ชิ้นทดสอบมีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or Flake Pattern) ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ [42] การเสื่อมสภาพของ UHMWPE ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพิกแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานต่างๆ สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวินิจฉัยของ [41] ที่ได้ศึกษาการเสื่อมสภาพ และการผิดปกติในสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุ UHMWPE

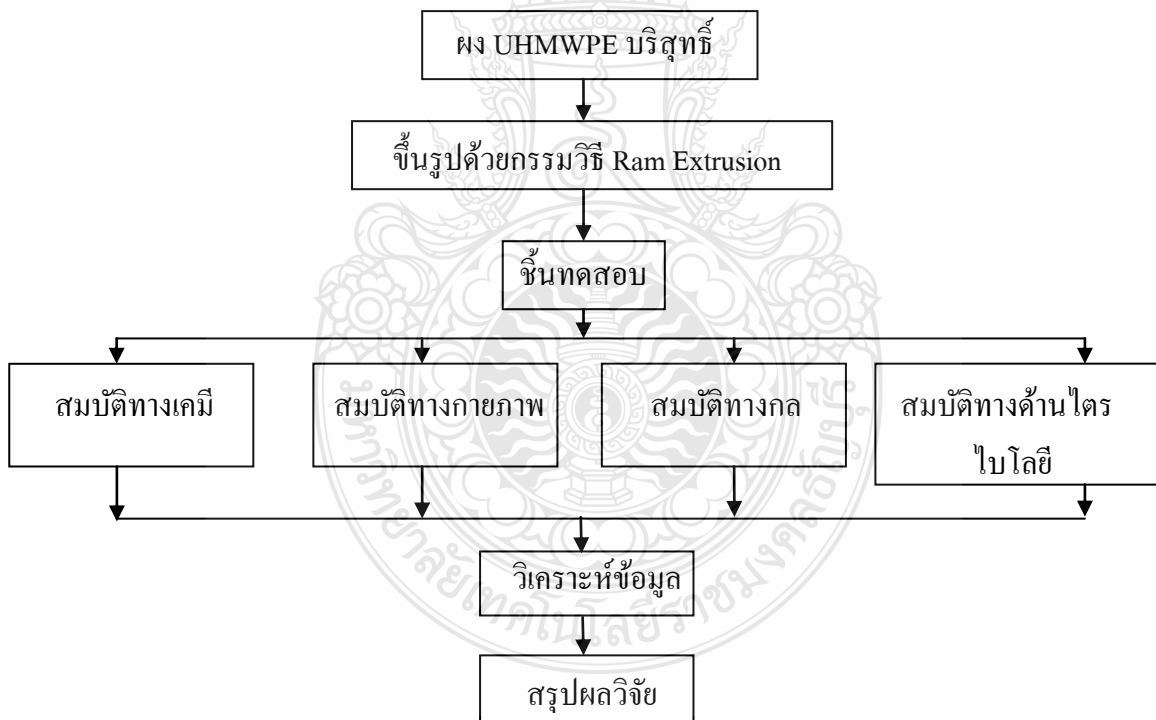
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอัดรีดขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ ด้วยกรรมวิธีอัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด (Ram Extrusion) ที่ให้ค่าสมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงสุด (วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอที่ต่ำที่สุด) เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

#### 3.1 แผนภาพการไหลของขั้นตอนการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยและการทดลองดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพทางผู้วิจัยจึงได้วางแผนการดำเนินการทดลองและวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1

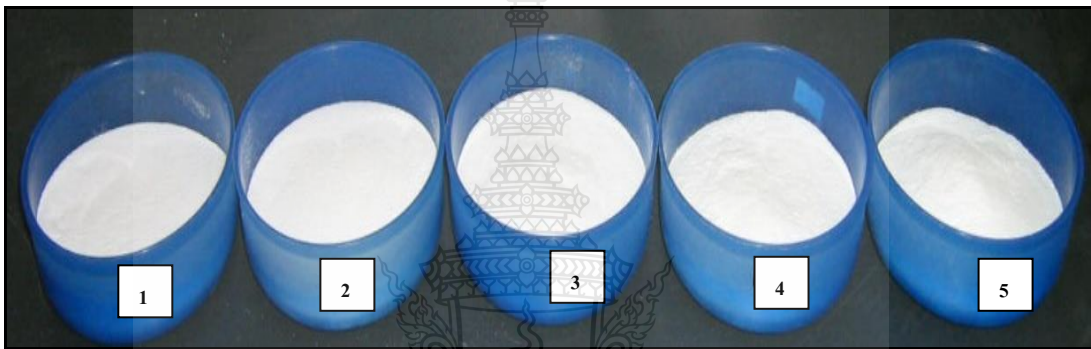


รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 พง UHMWPE เกรด SLL-6-6020 ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Corporation Limited ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีมวลโมเลกุล (Molecular weight) เท่ากับ  $6.5 \times 10^6$  g/mol ขนาดอนุภาค เท่ากับ 80-100 $\mu$ m

3.2.2 วัสดุก้อน UHMWPE ของบริษัท Ticona GmbH ประเทศเยอรมันมีลักษณะเป็นแท่งกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm. ขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 4.0 กรัม/โมล



รูปที่ 3.2 พง UHMWPE ที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

3.3.1 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมผง UHMWPE ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 mg และเตาอบลมร้อนยี่ห้อ Binder รุ่น FED 53L

3.3.2 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปชิ้นทดสอบ เครื่องอัดรีดขึ้นรูปแบบ Ram Extruder

3.3.3 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบ ประกอบด้วยเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับตัดแต่งชิ้นทดสอบได้ขนาดตามที่ต้องการ ได้แก่ เลื่อยสายพาน เครื่องกัด และกระดาษทราย สำหรับขัดเตรียมชิ้นทดสอบ

3.3.4 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ เครื่องทดสอบแรงดึง และเครื่องทดสอบความแข็ง

3.3.5 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอ ได้แก่ เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Block-on-ring ชุดกล้องถ่ายภาพรอยสึกหรอ

3.3.6 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP

3.3.7 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ได้แก่ เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond

3.3.8 เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์การทนต่อการสลายตัว (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One

### 3.4 การเตรียมวัสดุผง UHMWPE สำหรับการขึ้นรูป

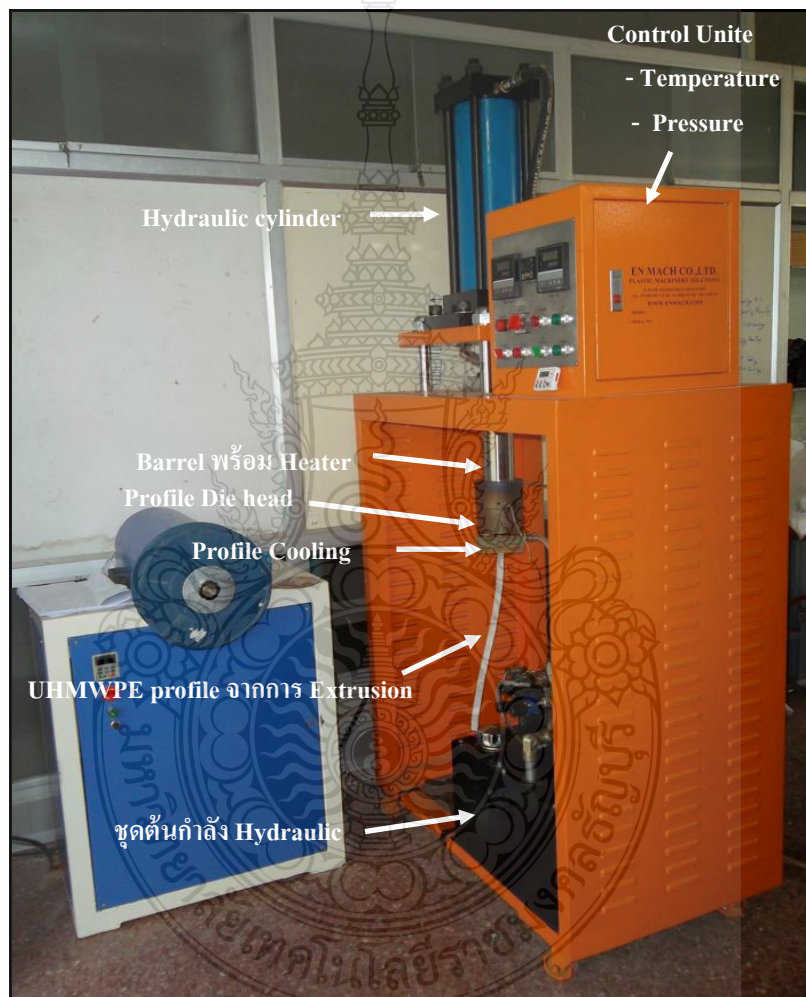
การเตรียมผง UHMWPE เพื่อขจัดความชื้นของผง UHMWPE ก่อนที่จะนำไปทำการอัดรีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Ram extruder ขั้นตอนการเตรียมดำเนินการโดยการนำผงไปทำการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นจึงนำผง UHMWPE เข้าเครื่อง Ram Extruder ไปทำการอัดรีดขึ้นรูปทันที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศที่ทำให้ผง UHMWPE เกิดความชื้น



รูปที่ 3.3 เตาอบลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งและแสดงการอบผง UHMWPE

### 3.5 การอัดรีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE

ผง UHMWPE หลังจากผ่านการอบไล่ความชื้นจะถูกนำไปทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดขึ้นรูป Ram Extruder ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยการเทผง UHMWPE ลงในกระบอกอัด (Barrel) ของเครื่อง ซึ่งกระบอกอัดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.5 แล้วแกนอัด (Ram) ดันอัดรีดผง UHMWPE ผ่านหัวตาย (Profile Die Head) ขนาดหน้าตัดเท่ากับ 10 x 20 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่อง Ram Extruder และการอัดรีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE



รูปที่ 3.5 ครอบก้อัด (Barrel)

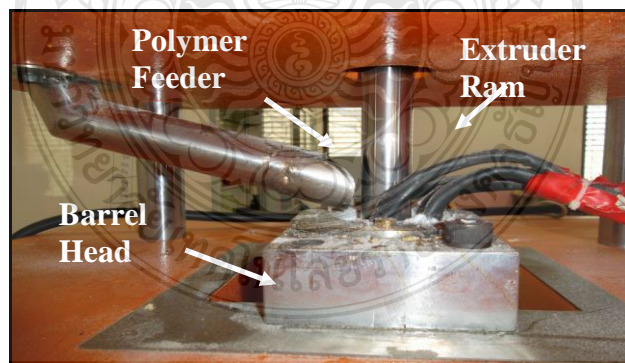


รูปที่ 3.6 หัวคาย (Profile die head)

สถานะของการอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

- 1) ปริมาณผง UHMWPE สำหรับการอัดขึ้นรูปของชิ้นทดสอบแต่ละครั้งเท่ากับ 130 g
- 2) อุณหภูมิที่ทำการอัดขึ้นรูป 3 ระดับ ประกอบด้วย 140, 150 และ 160 °C
- 3) ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป 4 ระดับ ประกอบด้วย 3, 5, 8 และ 10 MPa
- 4) ระยะเวลาสำหรับการคงอุณหภูมิและความดันของการอัดขึ้นรูป 30 นาที
- 5) อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นชุด Profile Cooling Die เท่ากับ 5 °C อัตราการไหล 150

ลิตร/นาที



รูปที่ 3.7 การป้อนเติมผง UHMWPE



รูปที่ 3.8 ลักษณะการอัดรีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Ram Extruder



รูปที่ 3.9 รูปชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Ram Extruder

### 3.6 การศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี

การศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของพอลิเมอร์เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจพิสูจน์เกี่ยวกับโมเลกุลของสารด้วยเครื่อง FT-IR Spectroscopy ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด Wave Number ที่อยู่ในช่วงประมาณ 12800 ถึง  $10\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วง Far IR (200 ถึง  $10\text{ cm}^{-1}$ ) Mid IR ( $4000$  ถึง  $200\text{ cm}^{-1}$ ) และ Near IR ( $12800$  ถึง  $4000\text{ cm}^{-1}$ )

FT-IR spectroscopy ย่อมาจาก Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังที่กล่าวถึงข้างต้น เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันคร่าวๆ ในสารที่ไม่ทราบว่าเป็นสารอะไร เช่นสารที่วิเคราะห์นี้อาจจะมี หมู่ Hydroxyl (-OH) Methyl (-CH<sub>3</sub>) หรือ Carbonyl (-CO) แต่ถ้า

จะใช้เทคนิคนี้ในการระบุว่าเป็นสารชนิดใดนั้น จะต้องนำผลที่ได้ซึ่งเป็นสเปกตรัม (Spectrum) ของสารนั้นไปเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบอยู่แล้ว (Reference) ถ้ามีสเปกตรัมเหมือนกันก็จะเป็นสารเดียวกัน เปรียบเหมือนลักษณะการเปรียบเทียบลายนิ้วมือ

การดำเนินการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี คณะผู้วิจัยส่งตัวอย่างชิ้นทดสอบไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR Spectroscopy ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ที่สาขาวิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น และที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 3.7 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

#### 3.7.1 การศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก

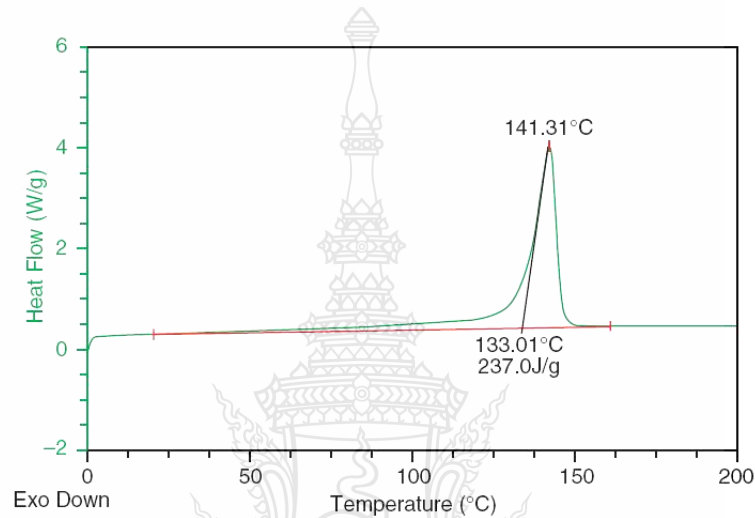
การศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกสำหรับวัสดุพอลิเมอร์โดยทั่วไปนิยมประยุกต์ใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetric (DSC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก และการเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานอลูมิเนียมที่อยู่ในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิง ซึ่งเป็นจานอลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน

ตัวอย่างเทคนิคการทดสอบพื้นฐานทั่วไปสำหรับ UHMWPE ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางความร้อน, จุดหลอมละลายและร้อยละของปริมาณความเป็นผลึก ตามที่ได้กล่าวถึงไปแล้วอย่างคร่าวๆ เกี่ยวกับการเปลี่ยนสถานะเป็นแก้ว (Glass Transition) ของ UHMWPE จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $-160^{\circ}\text{C}$  และนักวิจัยส่วนใหญ่จะไม่ทำการทดสอบสมบัตินี้ ในการทดสอบ UHMWPE น้ำหนักของชิ้นทดสอบต่ำสุดประมาณ 5–10 mg โดยชิ้นทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูง (ประมาณ 0.1 mg) หลังจากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกปิดผนึกไว้ในถาดสำหรับวางชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียม ซึ่งถาดสำหรับวางชิ้นงานจะวางคู่กับถาดเปล่า โดยที่ถาดทั้งสองจะมีขนาดให้ความร้อน ในการให้ความร้อนนั้นโดยปกติจะให้ความร้อนในอัตรา  $10^{\circ}\text{C}/\text{minute}$  จากช่วงอุณหภูมิ  $0-200^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ให้ความร้อน อัตราการเปลี่ยนแปลงของความร้อนจะแสดงที่จอภาพของเครื่อง DSC ซึ่งตัวอย่าง DSC trace ของชิ้นทดสอบ UHMWPE- GUR 1050 Powder มี



ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.10 ที่แสดงให้เห็นปฏิกิริยาการดูดซับความร้อนขณะหลอมละลายที่อุณหภูมิ 141°C ปฏิกิริยาการดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมของอุณหภูมิจากในช่วง 20–160°C ( $\Delta H_{\text{endotherm}}$ ) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิการหลอมละลายของ UHMWPE บริสุทธิ์ ( $\Delta H_f = 291 \text{ J/g}$ ) หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาร้อยละของปริมาณความเป็นผลึก ซึ่งค่าที่ได้คือ  $\chi = 81\%$ . ตามสมการที่ 3.1[1]



รูปที่ 3.10 DSC ของวัสดุ UHMWPE- GUR 1050 powder (First Heat) [1]

ซึ่งปริมาณความเป็นผลึกขึ้นอยู่กับพลังงานของปฏิกิริยาการดูดซับความร้อนในการหลอม (Melting endothermic) และพลังงานในการหลอมละลาย UHMWPE บริสุทธิ์ ที่มีค่าเท่ากับ 291 J/g, ดังนั้น ร้อยละของปริมาณความเป็นผลึกที่ได้จึงมีค่าเท่ากับ 81% ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 20–160°C

$$\% \chi = \frac{\Delta H_{\text{endotherm}}}{\Delta H_f} \% \quad (3.1)$$

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกของ UHMWPE ที่ดำเนินการในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยส่งตัวอย่างชิ้นทดสอบไปทำการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning

Calorimetric ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 3.7.2 การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ เป็นการศึกษานำลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ได้จากอัดขึ้นรูป เพื่อวิเคราะห์สภาวะของการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค ซึ่งลักษณะของโครงสร้างจุลภาคมีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก่อน UHMWPE

การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ดำเนินการในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยส่งตัวอย่างชิ้นทดสอบไปทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning Electron Microscope: SEM) กำลังขยายสูง ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP ของภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

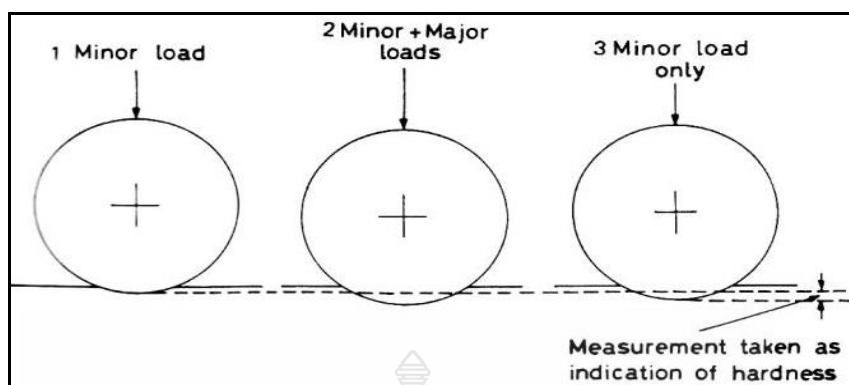
## 3.8 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล

### 3.8.1 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) ในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (Deformation) ของวัสดุ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช่ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (Relative Term)

การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถกระทำได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ (ตารางที่ 3.1) กล่าวคือการทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (plasticized PVC) และพอลิเอธิลีน

หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell คือ การวัดความลึกของลูกบอลเหล็กที่ใช้เป็นตัวกด (Indenter) โดยในการทดสอบ จะมี 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยเริ่มจากการวางน้ำหนักรอง (Minor load) ประมาณ 10 กิโลกรัม ลงบนลูกบอลเหล็ก เพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจึงทำการ Set Zero (ภายในเวลา 10 วินาที มิฉะนั้นค่าอาจจะเปลี่ยนแปลงไปอีกเนื่องจากความเป็น Viscoelastic ของพอลิเมอร์)



รูปที่ 3.11 แสดงหลักการของวิธีการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell

หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (Major load) ให้กับลูกบอลเหล็ก เป็นเวลานาน 15 นาที จากนั้นจึงยกน้ำหนักกดออก ปล่อยให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (Recover) ต่ไปอีกประมาณ 15 วินาที แล้วจึงอ่านค่าความแข็ง Hardness จากสเกลของเครื่องวัด โดยจะมีหน่วยกำกับเป็นสัญลักษณ์ R, L, M, E อยู่ข้างหลังตัวเลข ขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กและแรงที่ใช้กด ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงที่ใช้กดในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ

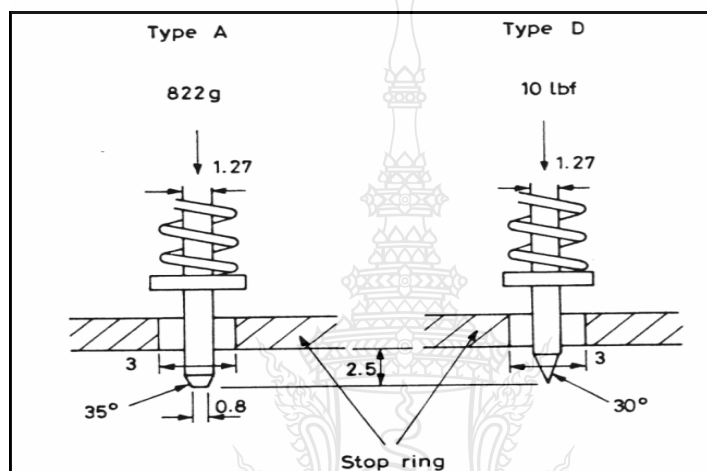
Scale	Major load (kg)	Diameter of indenter (in)
R	60	1/2
L	60	1/4
M	100	1/4
E	100	1/8

โดยสเกล R และ L จะใช้กับพลาสติกที่มีค่าความแข็ง Hardness ต่ำ ส่วนสเกล M และ E จะใช้กับพลาสติกที่มีความแข็ง Hardness สูง โดยในแต่ละสเกลที่ใช้ทดสอบนั้น ถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 จะถือว่าความไว (Sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไป และต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป

หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Durometer การใช้ Durometer วัดความแข็งพอลิเมอร์จะกระทำโดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบ กดหัวเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุทธระยะของ

หัวเข็ม (ถึงจุด Stop Ring) แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ (เช่น ประมาณ 10 วินาที) ซึ่งตัวเลขที่อ่านค่าได้จาก Durometer นี้จะไม่มีหน่วย

นอกจากนั้น Durometer ที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งย่อยออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบ Shore A และ แบบ Shore D ดังลักษณะของวิธีการที่แสดงในแผนภาพในรูปที่ 3.12 ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด โดยทั่วไป Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่า ในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 3.12 ลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore A และ Shore D



รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็งแรง Durometer แบบ Shore D

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13

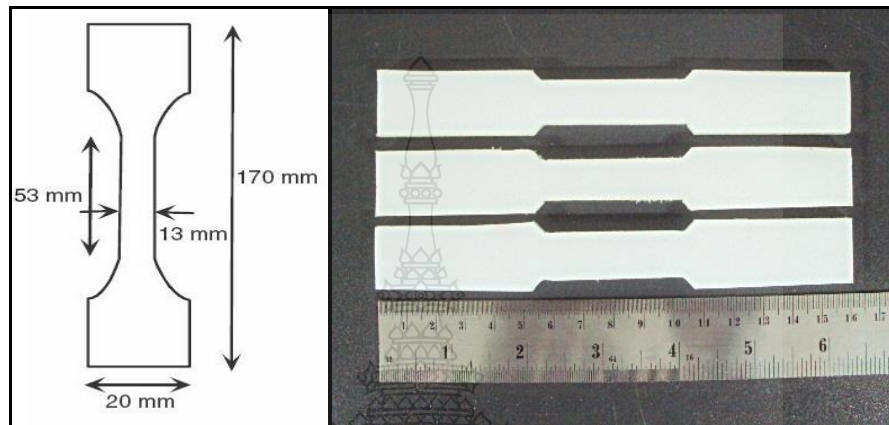
### 3.8.2 การทดสอบความต้านแรงดึง

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 5 kN ยี่ห้อ IE-Tensile รุ่น IE-T5k ของห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.14



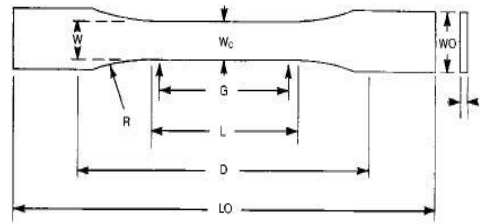
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบแรงดึงและการจับยึดชิ้นทดสอบและการดึงชิ้นทดสอบ

ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบน ความหนาไม่เกิน 7 mm. ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.16 โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 ซึ่งมีลักษณะกำหนดค่าพิกัดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ในการทดสอบแรงดึง กำหนดความเร็วในการดึงทดสอบเท่ากับ 50 mm/min

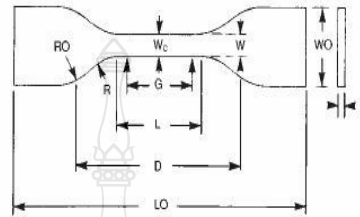


รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I





TYPES I, II, III & V



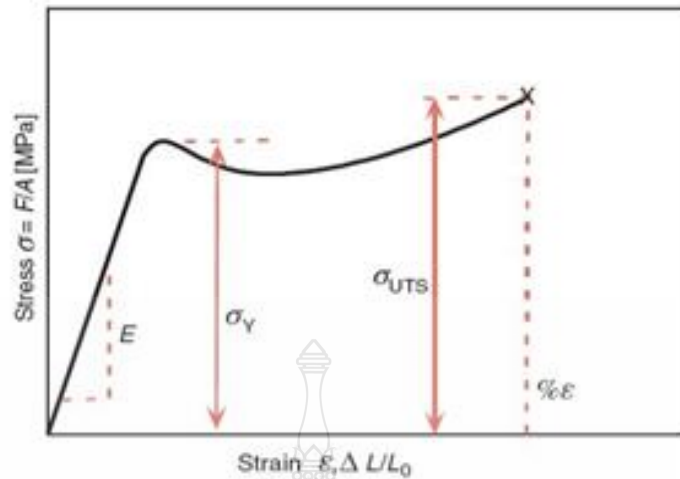
TYPE IV

Specimen Dimensions for Thickness,  $T$ , mm [in.]<sup>4</sup>

Dimensions (see drawings)	7 [0.28] or under		Over 7 to 14 [0.28 to 0.55], incl		4 [0.16] or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>		
$W$ —Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 [0.50]	6 [0.25]	19 [0.75]	6 [0.25]	3.18 [0.125]	$\pm 0.5$ [ $\pm 0.02$ ] <sup>B,C</sup>	
$L$ —Length of narrow section	57 [2.25]	57 [2.25]	57 [2.25]	33 [1.30]	9.53 [0.375]	$\pm 0.5$ [ $\pm 0.02$ ] <sup>C</sup>	
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19 [0.75]	19 [0.75]	29 [1.13]	19 [0.75]	...	+ 6.4 [+ 0.25]	
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 [0.375]	+ 3.18 [+ 0.125]	
$LO$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165 [6.5]	183 [7.2]	246 [9.7]	115 [4.5]	63.5 [2.5]	no max [no max]	
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50 [2.00]	50 [2.00]	50 [2.00]	...	7.62 [0.300]	$\pm 0.25$ [ $\pm 0.010$ ] <sup>C</sup>	
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 [1.00]	...	$\pm 0.13$ [ $\pm 0.005$ ]	
$D$ —Distance between grips	115 [4.5]	135 [5.3]	115 [4.5]	65 [2.5] <sup>J</sup>	25.4 [1.0]	$\pm 5$ [ $\pm 0.2$ ]	
$R$ —Radius of fillet	76 [3.00]	76 [3.00]	76 [3.00]	14 [0.56]	12.7 [0.5]	$\pm 1$ [ $\pm 0.04$ ] <sup>C</sup>	
$RO$ —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 [1.00]	...	$\pm 1$ [ $\pm 0.04$ ]	

### รูปที่ 3.16 ค่าพิสัยของส่วนต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638

หลังจากนั้นจึงทำการดึงชิ้นทดสอบให้แยกออกจากกันด้วยความเร็วของการดึงคงที่ การทดสอบแรงดึงจะต้องเฝ้าติดตามและบันทึกแรงดึง ( $F$ ) อัตราการยืดตัวของวัสดุ ( $\Delta L$ ) แล้วทำการแปลงกลับเป็นค่า Engineering Stress และ Strain ดังตัวอย่างกราฟผลการทดสอบแรงดึงที่แสดงในรูปที่ 3.17 ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามารถนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่า Yield Strength ( $\sigma_y$ ), Ultimate Tensile Strength ( $\sigma_u$ ), Breaking Strength ( $\sigma_b$ ) และ Elongation at Break (% $\epsilon$ )



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

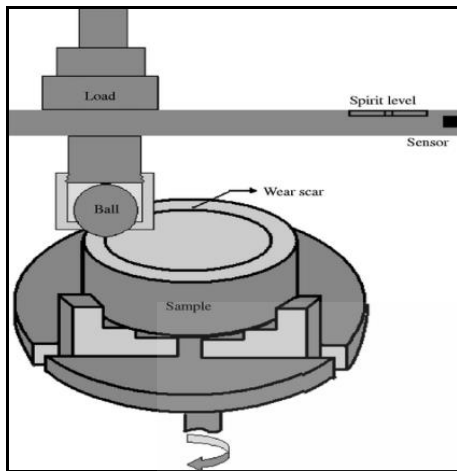
### 3.9 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยี

การวิเคราะห์ทดสอบทางด้านไทรโบโลยีที่ดำเนินการในโครงการนี้ ประกอบด้วย การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการสึกหรอ และการวัดวิเคราะห์ความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอ ซึ่งรายละเอียดการดำเนินการต่างๆ มีดังนี้

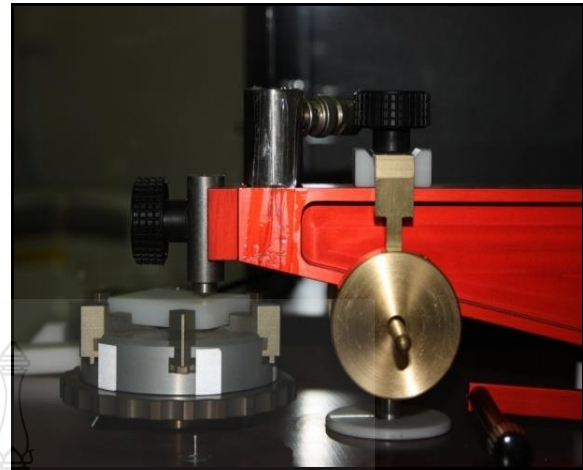
#### 3.9.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การทดสอบ Ball-on-Disk เป็นการทดสอบโดยการใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าทรงกลมที่ถูกยึดอยู่กับที่และมีแรงกดลูกบอลให้กดสัมผัสเสียดสีกับชิ้นทดสอบที่หมุนอยู่กับที่ด้วยความเร็วรอบที่กำหนด ซึ่งหลักการของการทดสอบแสดงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.18 การทดสอบด้วยวิธีการ Ball-on-Disk สามารถนำมาใช้ทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอระหว่างวัสดุคู่สัมผัส





a) แผนภาพหลักการทำงานของเครื่องทดสอบ



b) เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Ball-on-Disk)

### รูปที่ 3.18 การทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีแบบ Ball-on-Disk Tribometer

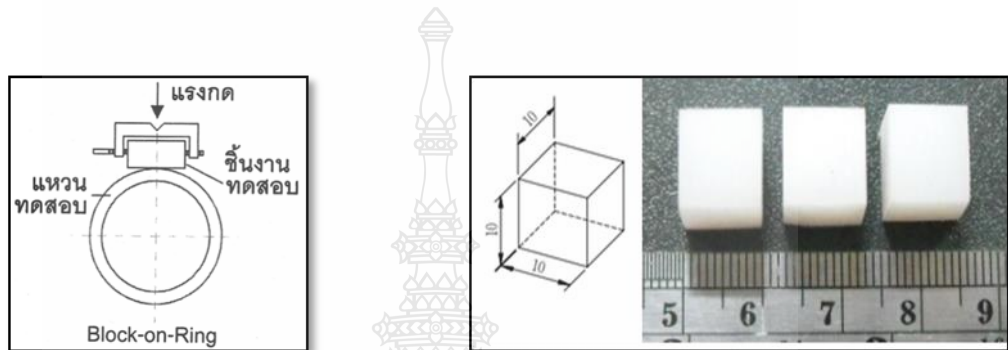
การดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่อง Ball on Disk Tribometer (TRIBO Technic, France) ของห้องปฏิบัติการและกลุ่มงานวิจัย Physics of Surface Hardening ของ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS) เมือง Tomsk ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G99-95a and DIN 50324 โดยทำการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่นด้วยลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm แรงกดลูกบอล 5 N และ ความเร็วของการเสียดสี 0.3 m/sec

#### 3.9.2 การศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอ

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบมีลักษณะดังไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3.20 โดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.21 วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน  $0.2 \mu\text{m}$  ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการไทรโบโลยีอุตสาหกรรมผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.19 โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้ง กำหนดความเร็วของการเสียดทาน 0.3 m/sec แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N และทำการ

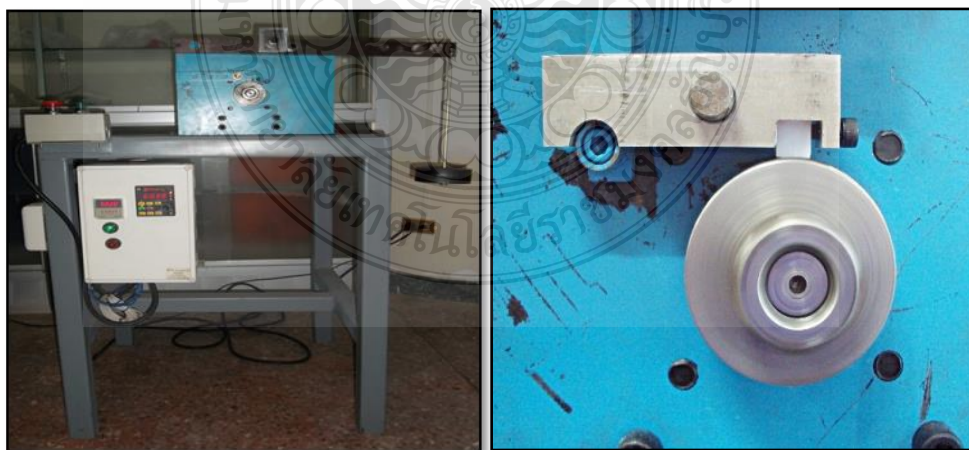
ทดสอบด้วยระยะเวลา 180 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหา น้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg และนำค่าน้ำหนักที่ สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กด ชิ้นทดสอบและระยะทางทำการทดสอบดังสมการที่ 3.2 [40]

$$\text{Wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nm} \quad (3.2)$$



(a) หลักการของการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 (b) ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ

รูปที่ 3.19 หลักการการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีแบบ Block on Ring และชิ้นงานทดสอบ



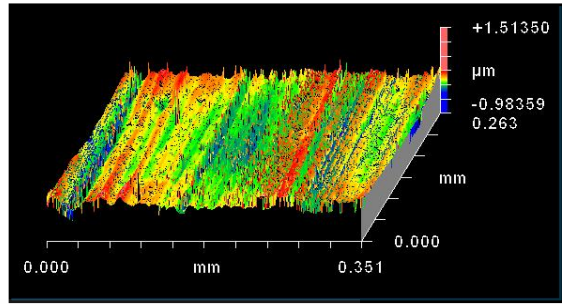
รูปที่ 3.20 เครื่องและการจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ



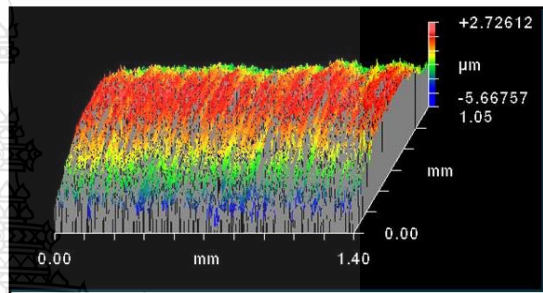
รูปที่ 3.21 เครื่องชั่งน้ำหนัก AND รุ่น HR-200 ความละเอียด 0.1 mg

### 3.9.3 การทดสอบความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอ

ความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ เป็นข้อมูลผลการทดสอบที่จำเป็นสำหรับใช้ประกอบการอธิบายพฤติกรรมการสึกหรอของและอัตราการสึกหรอชิ้นทดสอบ ซึ่งในการดำเนินการโครงการนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดด้วยเครื่อง Optical profilometer “NewView™ 6200” (Zygo Inc, Middlefield, USA) ของห้องปฏิบัติการและกลุ่มงานวิจัย Polymer Composite Materials ของ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS) เมือง Tomsk ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย โดยเครื่องวัดดังกล่าวนี้มีประโยชน์สำหรับการวัดค่าความหยาบพื้นผิว แสดงลักษณะภูมิศาสตร์พื้นผิวและลักษณะทางสัญญาณวิทยาของพื้นผิวการสึกของชิ้นทดสอบหลังจากการทดสอบการสึกหรอ รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะของเครื่อง Optical Profilometer และลักษณะทางสัญญาณวิทยาของพื้นผิวการสึกของชิ้นทดสอบและลูกกลิ้งคู่สัมผัส



บ) ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของพื้นผิวการสึกของ  
ชิ้นทดสอบ



ค) ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของพื้นผิวลูกกลิ้งคู่  
สัมผัส

า) ลักษณะของเครื่อง Optical Profilometer

รูปที่ 3.22 เครื่องและผลการทดสอบความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรือ



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดที่ได้ดำเนินการศึกษามานี้ ประกอบด้วยการทดลองอัดรีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบ UHMWPE บริสุทธิ์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี อัดรีดขึ้นรูปด้วยแกนอัด (Ram Extrusion) โดยพิจารณาจากสมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงสุดเป็นหลักที่ให้ผลการทดลองออกมาเป็นค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุอื่น UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้การแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดลองอัดรีดขึ้นรูปชิ้นทดสอบ UHMWPE เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุอื่น UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

##### 4.1.1 เอกลักษณะทางเคมี (Chemical characteristic)

จากการศึกษาค้นคว้าสืบค้นข้อมูล IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่ามีค่าการดูดกลืนพลังงานที่  $3200-3600\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  Stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่  $2891-2844\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่  $1472\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  Bending ในสายโซ่พอลิเมอร์ และที่  $690-900\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Bending ซึ่งอยู่นอกกระนาบของสายโซ่พอลิเมอร์ [45]

เมื่อก้าวถึงการวิเคราะห์ทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีของพอลิเมอร์ด้วย IR spectrum พบว่า สามารถนำไปเชื่อมโยงถึงการศึกษาลักษณะเสื่อมสภาพหรือการสลายตัวของพอลิเมอร์ (Degradation of Polymer) ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ประกอบด้วย อุณหภูมิ แสงรังสี และสารเติมแต่งบางชนิด ถ้าพอลิเมอร์ได้รับปัจจัยเหล่านี้เข้าไปจะทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์

จากการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบ IR spectrum ของชิ้นงานตัวอย่าง UHMWPE กับ IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่า การเสื่อมสภาพของ UHMWPE ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพีคแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานดังต่อไปนี้ [41]

1) พีคที่  $2000-2600\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Methylene ( $-\text{CH}_2-$ ) ที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์

2) พีคที่  $1850-1700\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Carbonyl (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์

3) พีคที่  $1640\text{ cm}^{-1}$  และ  $966\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Vinyl (C=C) และ Trans-Vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์

4) พีคที่  $910\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Terminal Vinyl ( $-\text{CH}=\text{CH}_2-$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ และการถูกตัดภายในสายโซ่พอลิเมอร์

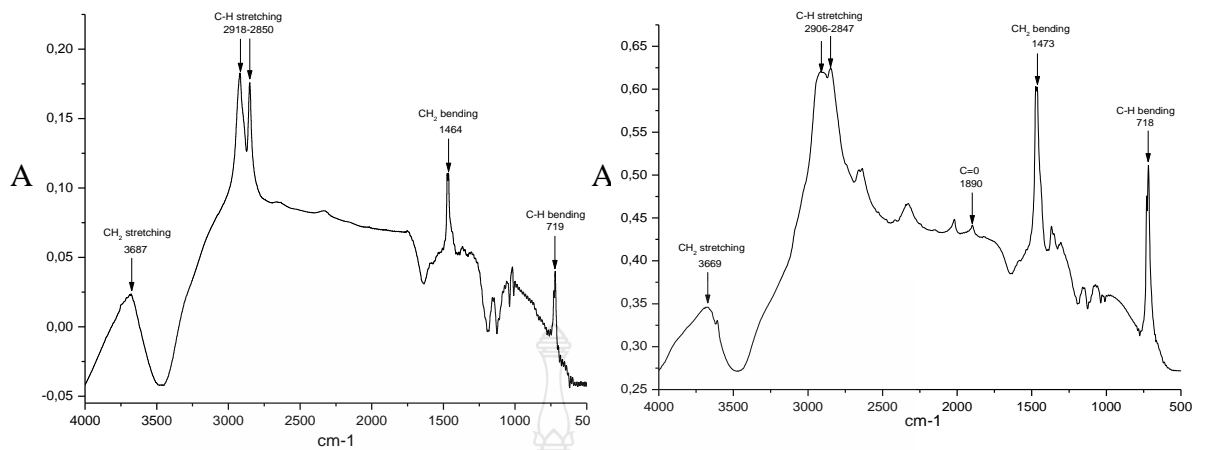
#### 4.1.2 เอกลักษณะทางเคมีของผง UHMWPE บริสุทธิ์

ผลการศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณะทางเคมีของผง UHMWPE บริสุทธิ์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว จากการวิเคราะห์ IR Spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.1 a) แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่  $3687\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  stretching, ที่  $2918-2850\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่  $1464\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  Bending และที่  $719\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สอดคล้องตรงกับ IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE[41]

#### 4.1.3 เอกลักษณะทางเคมีวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

สำหรับในส่วน of วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบนี้มีลักษณะเป็นแท่งกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $75\text{ mm}$ . จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram Extrusion มีมวลโมเลกุลเท่ากับ  $4.0\text{ กรัม/โมล}$  และจากการวิเคราะห์ IR Spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.1 b) แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่  $3669\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  Stretching, ที่  $2906-2847\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่  $1473\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  Bending, ที่  $730-718\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Bending, และที่  $1890\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Carbonyl (C=O) ที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ [41]

ผลจากการวิเคราะห์ IR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ เปรียบเทียบกับ IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE แสดงให้เห็นว่า กระบวนการขึ้นรูปมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ



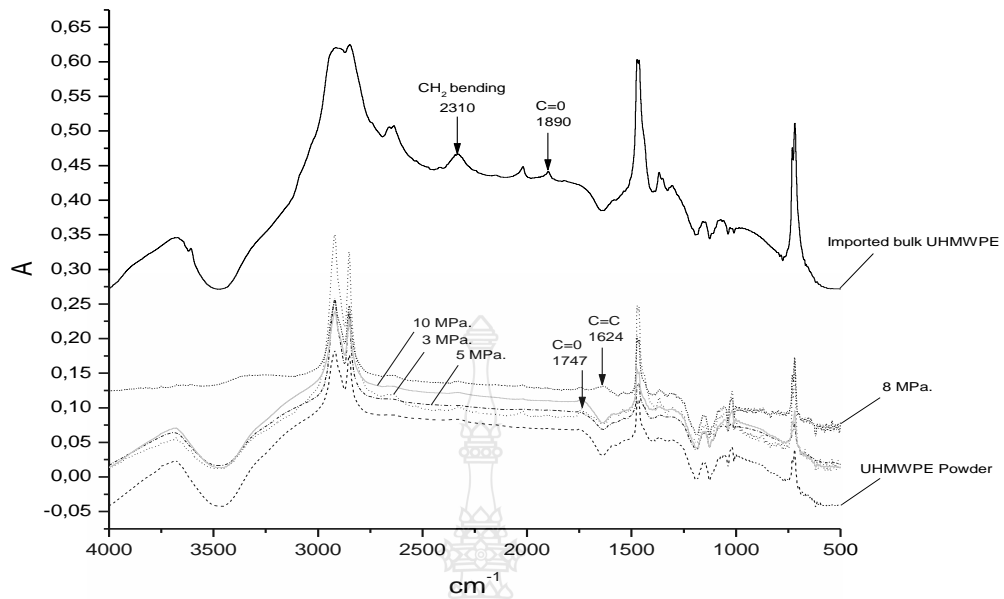
a) พง UHMWPE บริสุทธิ์

b) วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

รูปที่ 4.1 IR Spectrum ของวัสดุ UHMWPE

#### 4.1.4 เอกลักษณะทางเคมีวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูป

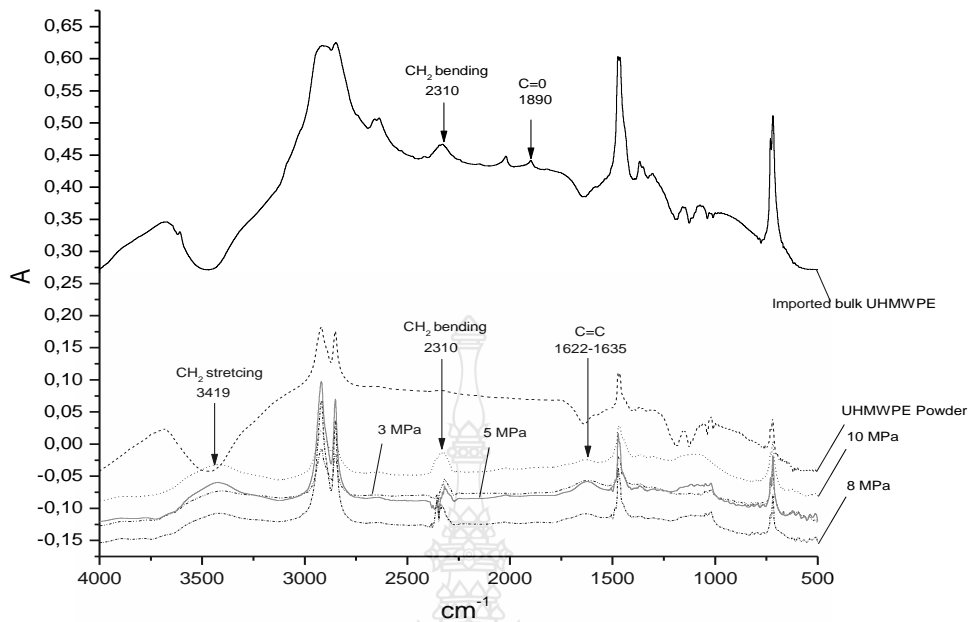
จากการวิเคราะห์ IR Spectrum ของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram Extrusion ที่อุณหภูมิ 140 150 และ 160 ° C ที่ความดัน 3 5 8 และ 10 MPa ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที พบว่า รายละเอียดผลการวิเคราะห์มีลักษณะพีก IR Spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.2 -4.4 และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์พีกต่างๆ ที่ปรากฏ ดังตารางที่ 4.1 โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 ° C ด้วยความดัน 5 และ 10 MPa มีสัญญาณการสั่นของหมู่ Carbonyl (C=O) ที่แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุก้อน UHMWPE ดังพีกที่ปรากฏในรูปที่ 4.2 สำหรับชิ้นทดสอบอื่นๆ จะพบพีกของหมู่ Vinyl (C=C)



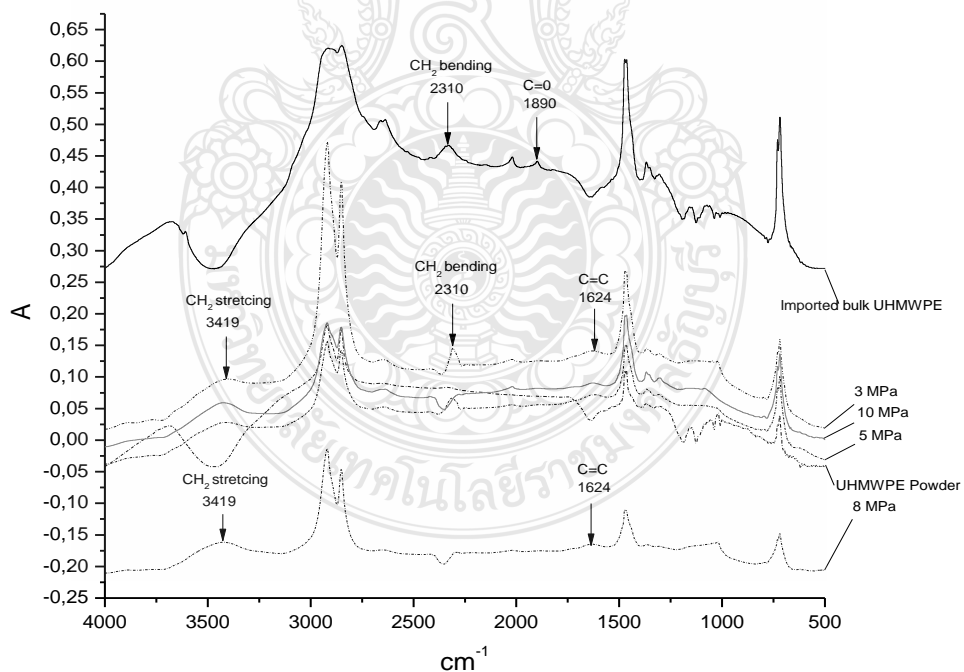
รูปที่ 4.2 IR Spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ และวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 °C

สำหรับในกรณีของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 และ 160°C ด้วยค่าความดันระดับต่างๆ พบว่า ไม่มีสัญญาณการสันของหมู่ Carbonyl (C=O) แต่จะพบสัญญาณการสันของหมู่ Methylene (-CH<sub>2</sub>-) หมู่ Vinyl (C=C) และ Trans-Vinylene (-R<sup>1</sup>CH=CHR<sup>2</sup>-) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ดังพิกที่ปรากฏในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [42,46.]





รูปที่ 4.3 IR Spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ และของวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C



รูปที่ 4.4 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ และของวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทรีดสอป  
วัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ

Sample	Forming condition			Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm <sup>-1</sup> )						หมายเหตุ
	Temp. (°C)	Pressure (MPa)	Exposure time (min.)	-CH <sub>2</sub> - stretching	C-H stretching	-CH <sub>2</sub> - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
UHMWPE powder	—	—	—	3687	2918-2850	1464	719	—	—	
Imported bulk UHMWPE	—	—	—	3669	2906-2847	1473	730-718	1890	—	Peak 1890 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
1	140	3	30	3419	2919-2851	1464	719	—	1624	Peak 1624 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
2		5	30	3686	2918-2850	1464	719	1747	—	Peak 1747 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
3		8	30	3258	2919-2850	1464	719	—	1643	Peak 1643 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
4		10	30	3687	2918-2850	1464	719	1736	—	Peak 1736 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
5		3	30	3398	2918-2850	2311 1464	719	—	1624	Peak 2311 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์
										Peak 1624 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทราสเปกตรัมของวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (UHMWPE) ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample	Forming condition			Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm <sup>-1</sup> )						หมายเหตุ
	Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Exposure time (min.)	-CH <sub>2</sub> - stretching	C-H stretching	-CH <sub>2</sub> - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
6		5	30	3419	2918-2850	2309-1471	718	—	1622	Peak 2309 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1622 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
7		8	30	3418	2918-2850	2336-1471	718	—	1624	Peak 2336 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1624 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
8		10	30	3401	2918-2850	2306-1464	718	—	1635	Peak 2306 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1635 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
9	160	3	30	3412	2918-2850	2310-1463	718	—	1615	Peak 2310 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1615 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทราสเปกตรัมของวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

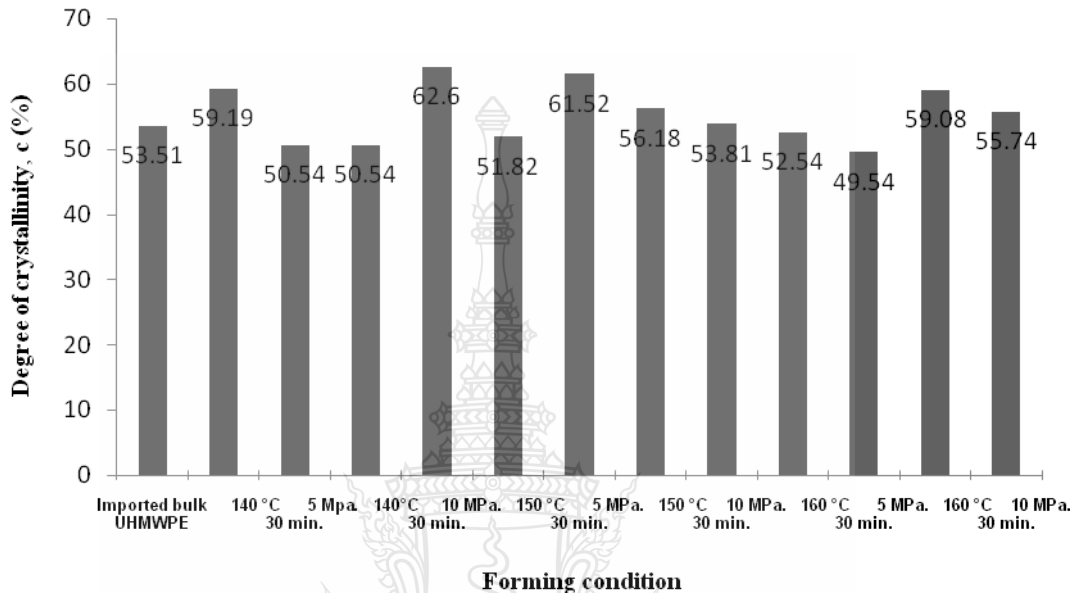
Sample	Forming condition			Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm <sup>-1</sup> )						หมายเหตุ
	Tem p. (°C)	Pressu re (MPa)	Expos ure time (min.)	-CH <sub>2</sub> - stretchin g	C-H stretchin g	-CH <sub>2</sub> - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
10		5	30	3412	2918-2850	2310-1463	718	—	1615	Peak 2310 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1615 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
11		8	30	3419	2918-2850	1471	718	—	1637	Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
12		10	30	3418	2918-2850	1463	718	—	1621	Peak 1621 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

หมายเหตุ : ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข

#### 4.2 สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ประกอบด้วยการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ความหนาแน่น และโครงสร้างจุลภาคของอินทราสเปกตรัม ที่ทำการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 20-400 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) 10 °C/min, ค่า Enthalpy มาตรฐานสำหรับวัสดุ HDPE มีค่า  $\Delta H = 291$  J/g ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4. 5 โดยวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 62.60 % รองลงคือ สภาวะการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52 % สำหรับในส่วน of วัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 %

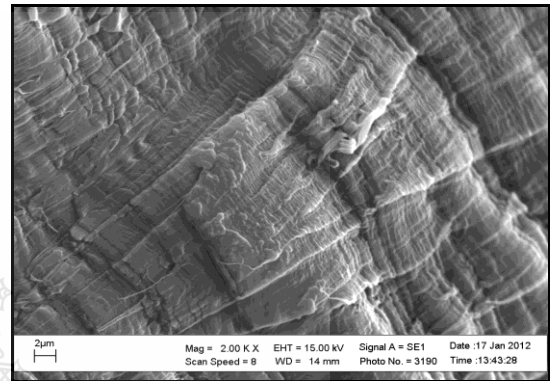
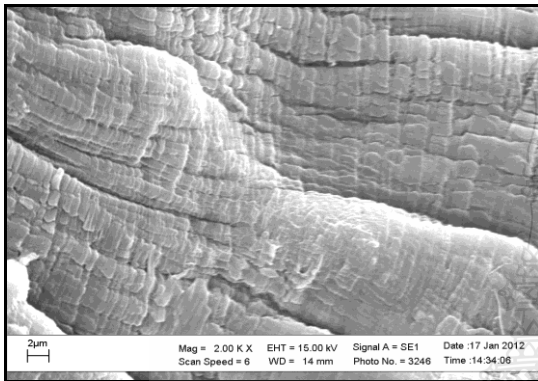
สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชิ้นทดสอบส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.92-0.93 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm<sup>3</sup> (แสดงในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1)



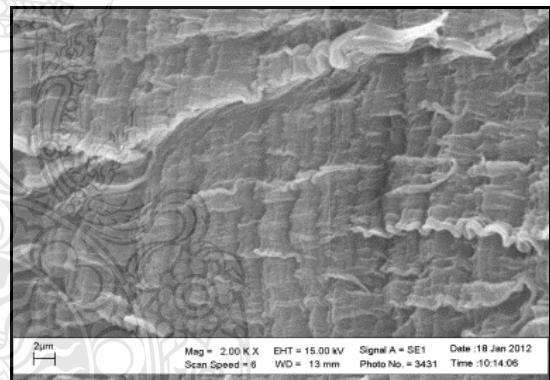
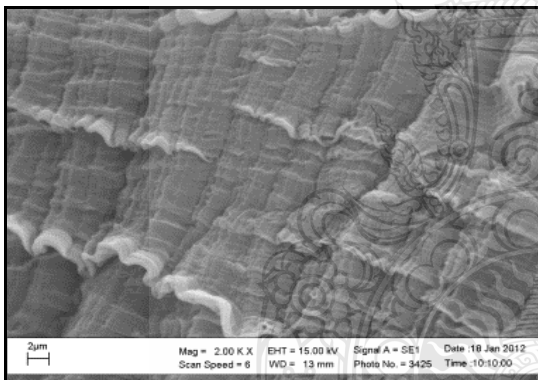
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

สำหรับในส่วนของ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ทำการศึกษาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ( Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP ของภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีลักษณะเป็น โครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด ( Lamellar or Flake Pattern) [42] ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4. 6 ที่เกิดจากการเชื่อมประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ถูกกดอัดรีดให้ประสานติดกันภายใต้อุณหภูมิและความดันระดับต่างๆ และหลังจากนั้นทำให้เกิดการเย็นตัวทันทีในระหว่างการอัดรีดผ่านชุดสายเย็นที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 °C อัตราการไหล 150 ลิตร/นาที่ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเชื่อมประสานติดกันของผงอนุภาค UHMWPE เปรียบเทียบกับสมบัติของ UHMWPE ที่ไม่มีจุดไหลตัวและหลอมละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พบว่า มีลักษณะคล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดสาธู แต่เมื่อวิเคราะห์

ความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างจุลภาค พบว่า ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่มีการเชื่อมประสานติดกันหรือมีการหลอมละลายรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเม็ดอนุภาคผง UHMWPE มากกว่าชิ้นทดสอบอื่นๆ

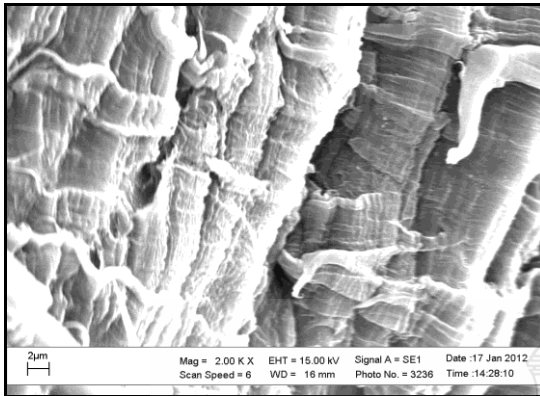


a) วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ      b) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 3 MPa

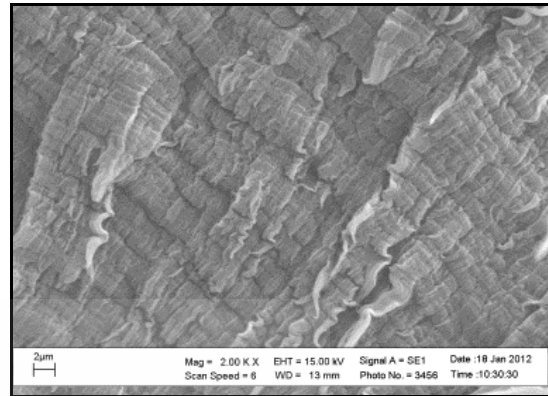


c) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 5 MPa      d) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 8 MPa

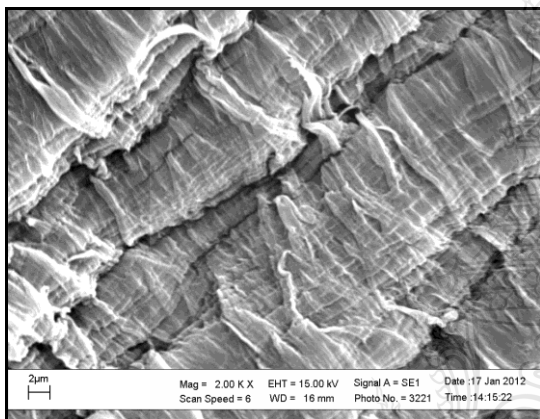
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



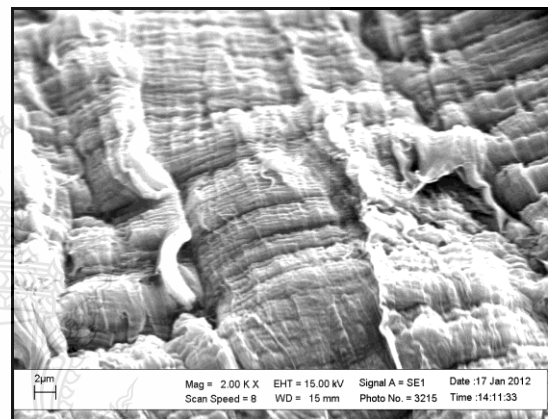
e) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 10 MPa



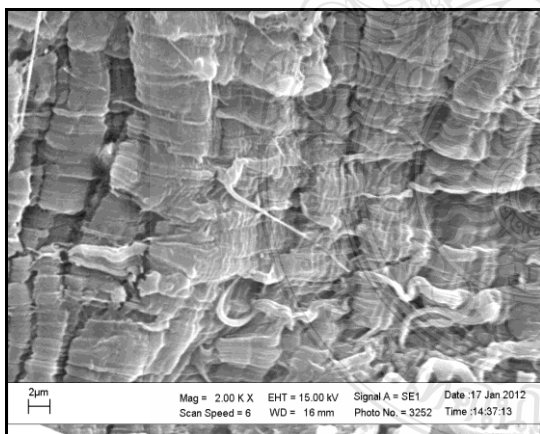
f) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 3 MPa



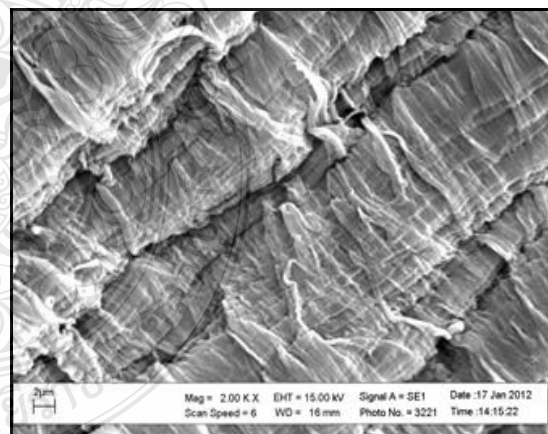
g) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 5 MPa



h) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 8 MPa

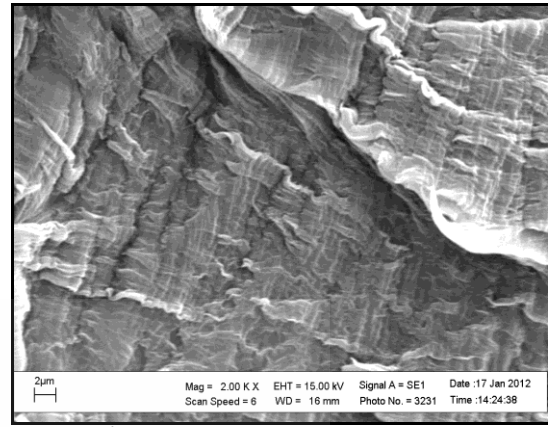
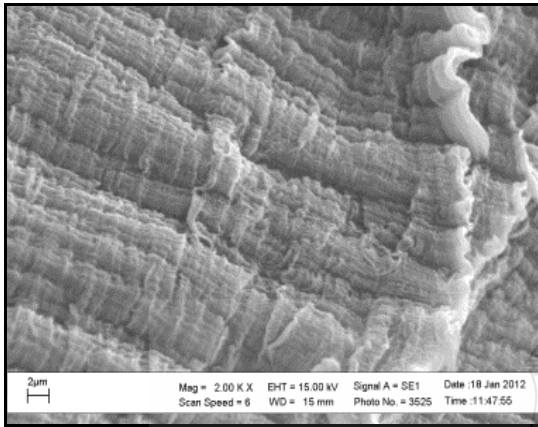


i) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 10 MPa

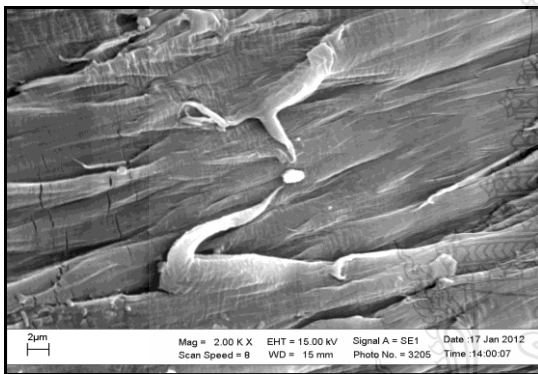


j) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 3 MPa

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัครีคขึ้นรูปเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)



k) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 5 MPa      l) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 8 MPa



m) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 10 MPa

หมายเหตุ : ชิ้นทดสอบผ่านการทดลองอัครีคขึ้นรูปภายใต้เวลาระยะเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัครีคขึ้นรูปเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)

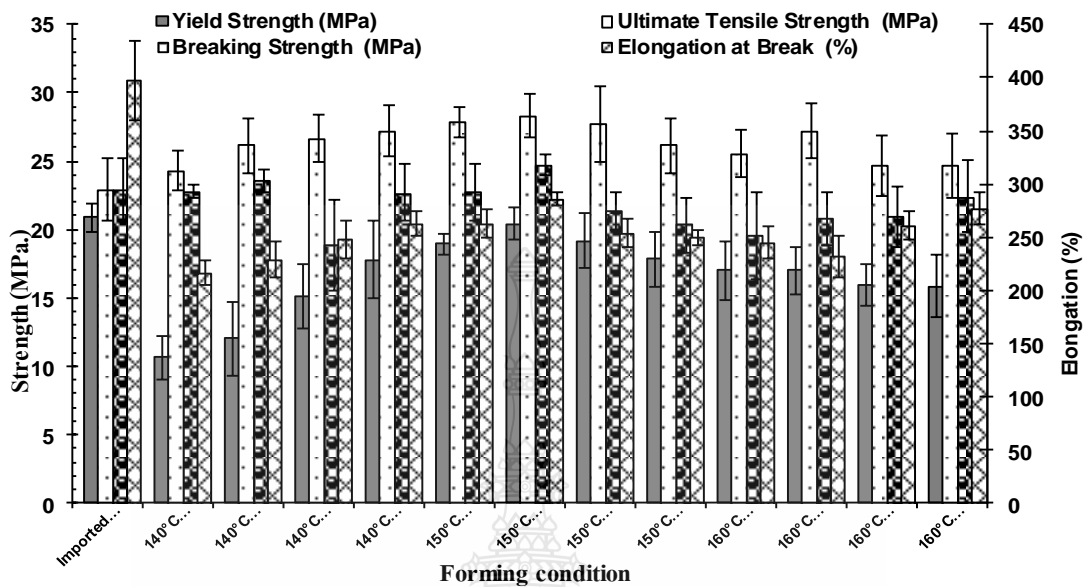
### 4.3 สมบัติทางกล (Mechanical Properties)

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง พบว่า ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ทำการทดลองอัครีคขึ้นรูปทุกสภาวะการขึ้นรูป มีค่า Ultimate Tensile Strength สูงกว่าชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ แต่ Yield Strength และ Elongation กลับมีค่าต่ำกว่าชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ดังผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟการวิเคราะห์เปรียบเทียบดังรูปที่ 4.7



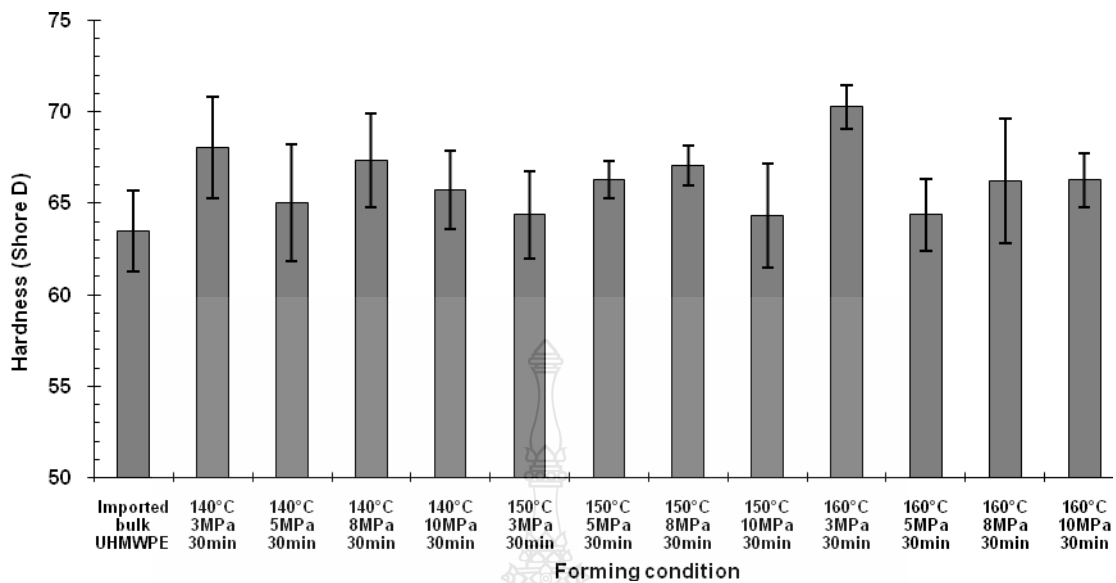
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลอง  
อัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Sample / Forming condition	Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)		Ultimate Strength, $\sigma_y$ (MPa)		Breaking Strength, $\sigma_y$ (MPa)		Elongation, $\epsilon$ (%)		Hardness (Shore D)	
	Average.	SD	Average	SD	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
Imported bulk UHMWPE	20.87	1.01	22.93	2.27	22.93	2.27	396.67	37.43	63.47	2.19
140 °C 3 MPa. 30 min.	10.67	1.59	24.33	1.47	22.80	0.53	216.80	12.01	68.00	2.79
140 °C 5 MPa. 30 min.	12.00	2.65	26.17	2.02	23.53	0.81	228.70	16.67	65.00	3.22
140 °C 8 MPa. 30 min.	15.17	2.36	26.67	1.76	18.87	3.27	247.83	17.09	67.33	2.55
140 °C 10 MPa. 30 min.	17.77	2.86	27.23	1.86	22.67	2.08	262.40	11.38	65.70	2.17
150 °C 3 MPa. 30 min.	18.94	0.74	27.83	1.15	22.73	2.03	262.60	13.60	64.33	2.40
150 °C 5 MPa. 30 min.	20.43	1.21	28.33	1.53	24.67	0.76	285.60	6.41	66.27	1.01
150 °C 8 MPa. 30 min.	19.17	2.02	27.73	2.73	21.33	1.44	253.80	13.03	67.03	1.10
150 °C 10 MPa. 30 min.	17.83	2.02	26.17	2.02	20.33	2.02	249.77	7.35	64.27	2.84
160 °C 3 MPa. 30 min.	17.00	2.18	25.57	1.69	19.50	3.18	245.07	15.31	70.23	1.17
160 °C 5 MPa. 30 min.	16.98	1.80	27.23	1.99	20.77	1.97	232.00	19.83	64.33	1.99
160 °C 8 MPa. 30 min.	15.93	1.50	24.70	2.23	20.93	2.20	260.83	13.33	66.17	3.41
160 °C 10 MPa. 30 min.	15.83	2.25	24.67	2.36	22.40	2.62	276.83	15.00	66.23	1.45



รูปที่ 4.7 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสภาวะการอัดรีดขึ้นรูปที่ต่างกันมีผลทำให้ได้สมบัติทางกลต่างกัน โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa มีค่า Yield Strength, Ultimate Tensile Strength และค่า Elongation สูงสุด เท่ากับ  $20.43 \pm 1.21$  MPa,  $28.33 \pm 1.53$  MPa และ  $285.60 \pm 6.41\%$  ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ มีค่าเท่ากับ  $20.87 \pm 1.01$  MPa,  $22.93 \pm 2.27$  MPa และ  $396.67 \pm 37.43\%$  ตามลำดับ สำหรับในกรณีของค่าความแข็ง พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปส่วนใหญ่มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 66-70 Shore D ซึ่งสูงกว่าชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทดสอบเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.8



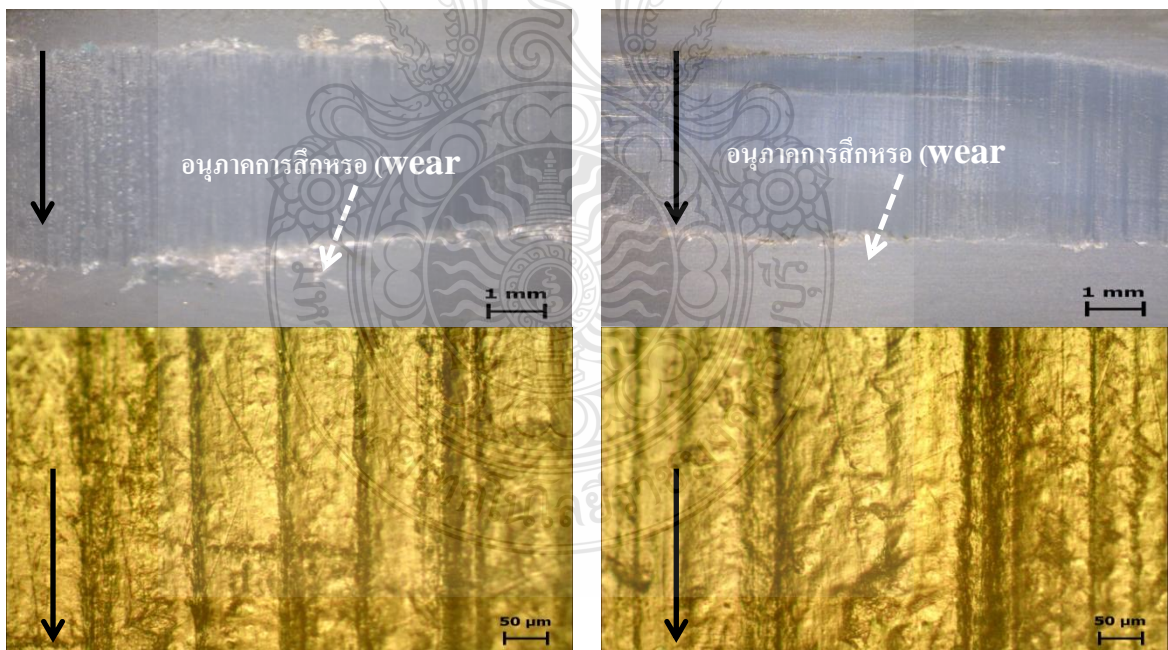
รูปที่ 4.8 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ IR spectrum และปริมาณความเป็นผลึก พบว่า ชิ้นทดสอบที่เกิดการ Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกสูง มีค่า Yield Strength และ Ultimate Tensile Strength สูง แต่ในทางกลับกันชิ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำจะมีค่า Yield strength, Ultimate Tensile Strength ต่ำ และมีค่า Elongation ลดต่ำลงตามไปด้วยเช่นกัน และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ โครงสร้างจุลภาค พบว่า ชิ้นทดสอบที่มีการผสมเป็นเนื้อเดียวกันหรือเม็ดอนุภาค UHMWPE เกาะยึดเชื่อมประสานติดกัน ได้สมบูรณ์กว่ามีค่า Elongation สูงกว่า

#### 4.4 สมบัติทางด้านไทรโบโลยี (Tribological Properties)

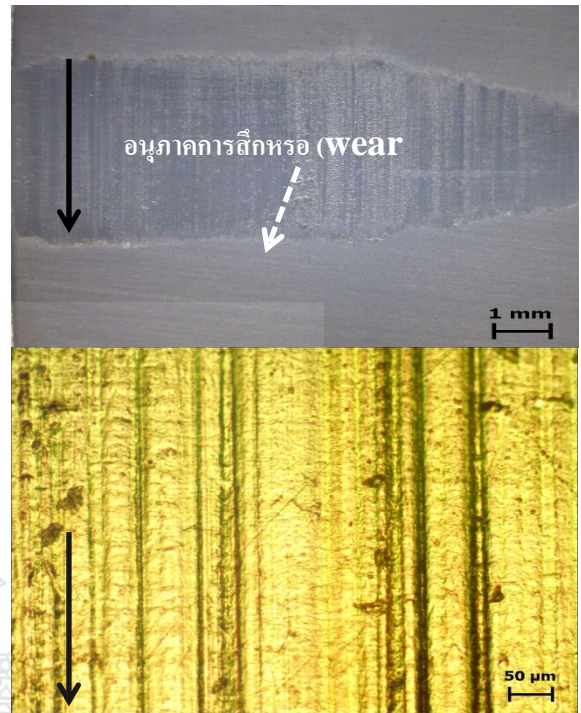
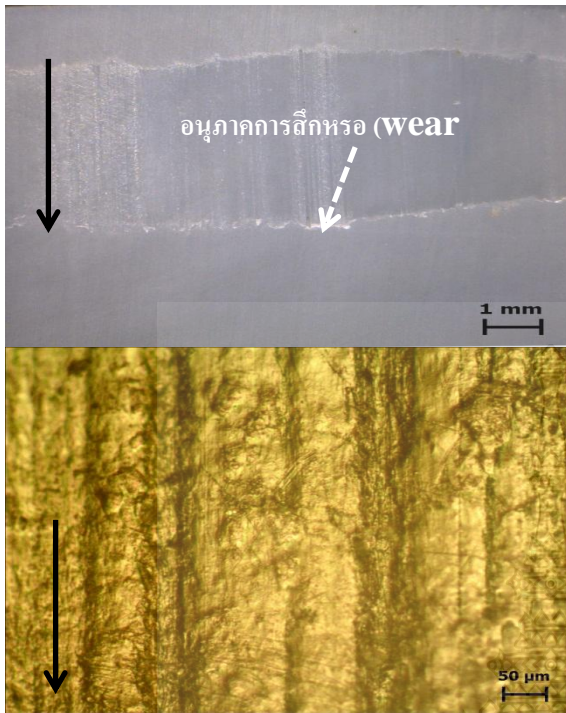
หลังจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบด้วยระยะเวลาของการทดสอบ 180 นาที โดยใช้วิธีการทดสอบการสึกหรอแบบ Block on Ring [42-44] พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดมีการปรากฏของอนุภาคการสึกหรอ (Wear Debris) สะสมตัวอยู่บริเวณขอบรอยสึกหรอ (ลูกศรเส้นประสีขา) ตามทิศทางการไถล (ลูกศรสีดำ) ของลูกกลิ้งวัสดุคู่สัมผัส โดยชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีขนาดพื้นที่รอยสึกหรอและปริมาณการสะสมตัวของอนุภาคการสึกหรอมากที่สุด ดังปรากฏในรูปที่ 4.8 และนอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความหยาบพื้นผิว

ของรอยสึกหรอ พบว่า บริเวณพื้นผิวของรอยสึกหรอยังปรากฏพื้นผิวที่มีลักษณะหยาบขรุขระและบางบริเวณมีลักษณะเป็นร่องที่เกิดจากการไถครูดเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ ทำให้สามารถสันนิษฐานรูปแบบการสึกหรอที่เกิดขึ้นได้ว่า เป็นการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ที่เกิดจากการถ่ายโอนเนื้อพอลิเมอร์ไปยังพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัสและเกาะยึดติดแน่นบนพื้นผิวลูกกลิ้งที่เรียกว่า การถ่ายโอนเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์ (Polymer Transfer Film) ที่มีลักษณะเป็นชั้นเยื่อบางๆ และเหนียวบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส โดยชั้นเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์สามารถช่วยลดการสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์ หลังช่วงเวลาเริ่มต้นเกิดการสึกหรอ [47] และเมื่อขึ้นทดสอบผ่านการทดสอบด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ชั้นเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์เกิดการสะสมตัวจนมีความหนาเพิ่มขึ้นและเหนียวขึ้นพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่เกิดการเกาะยึดเชื่อมประสานติดกันออกจากชั้นทดสอบ ส่งผลให้พื้นผิวขึ้นทดสอบบางบริเวณเกิดเป็นรอยหยาบขรุขระ และในช่วงเวลาเดียวกันนี้บางบริเวณของพื้นผิวลูกกลิ้งเกิดการสะสมตัวของเนื้อพอลิเมอร์ที่ฉีกออกมาจากชั้นทดสอบก่อตัวเป็นก้อนนูน (Lumpy) ยึดเกาะติดแน่นและยื่นโผล่พ้นออกมาจากพื้นผิวลูกกลิ้งทำให้เกิดการไถครูดลงไปเนื้อพอลิเมอร์ในระหว่างที่มีการไถสัมผัสของลูกกลิ้งกับชั้นทดสอบ ส่งผลให้เกิดเป็นร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ [48] ดังลักษณะที่ปรากฏในรูปที่ 4.9



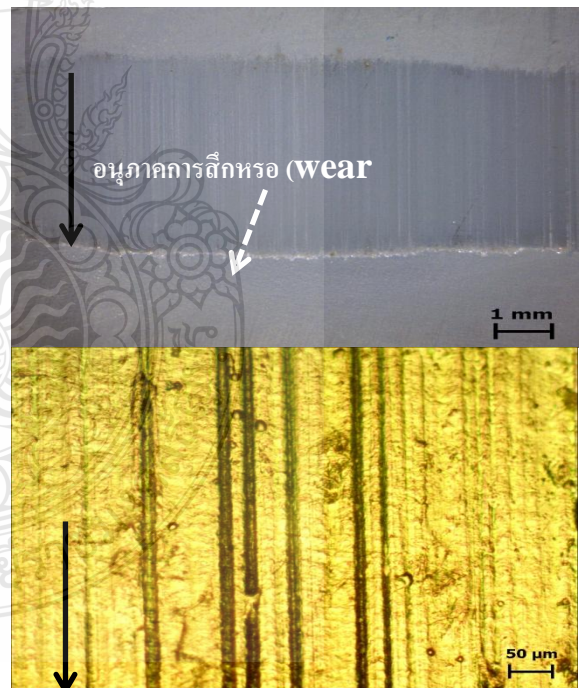
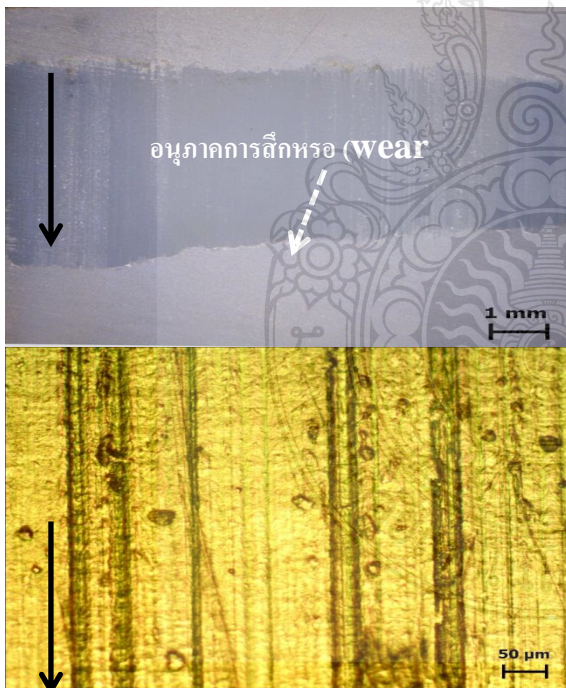
a) วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

b) อัครีคขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 3 MPa



c) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 5 MPa

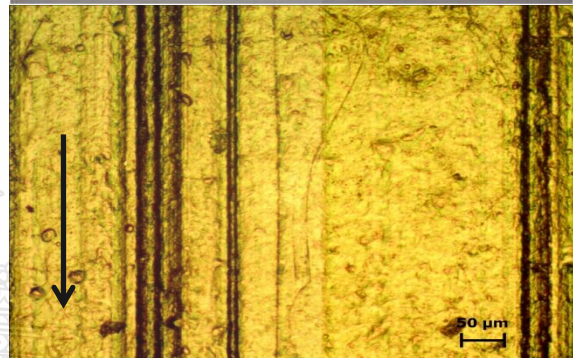
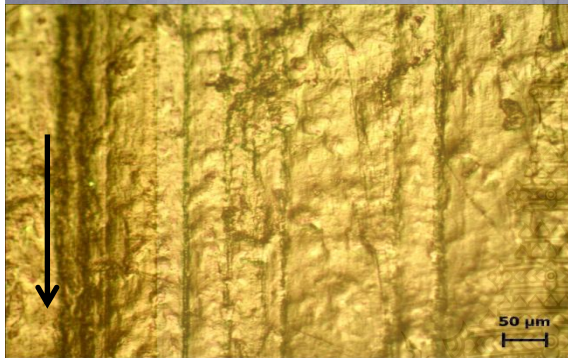
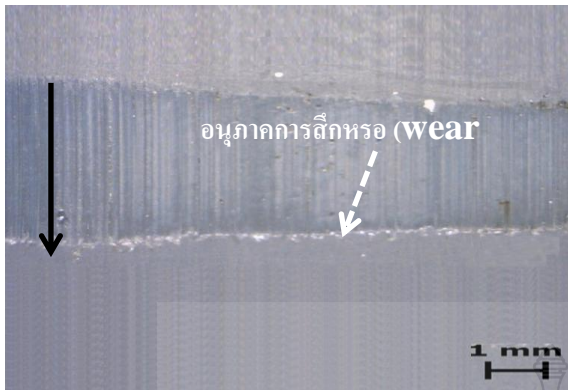
d) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 8 MPa



e) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 10 MPa

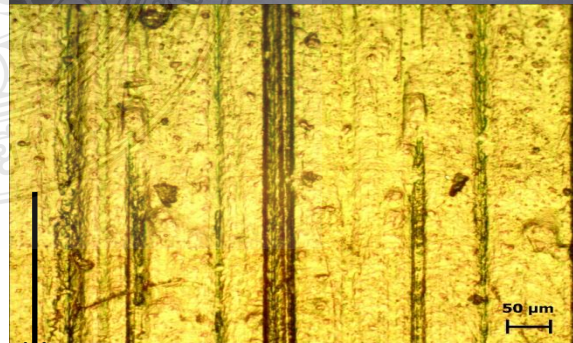
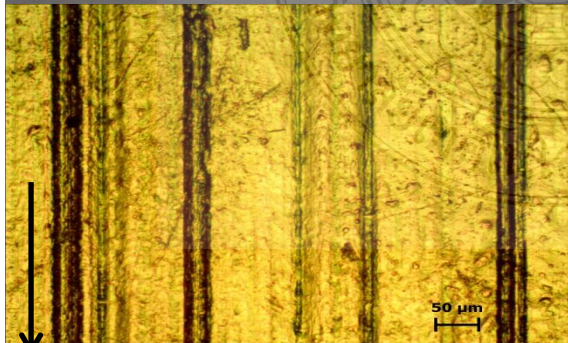
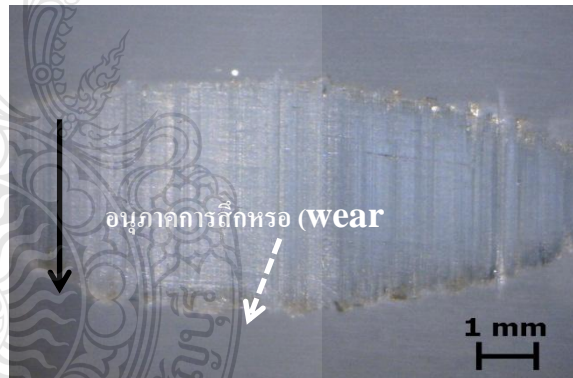
f) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 3 MPa

รูปที่ 4.9 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ



g) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 5 MPa

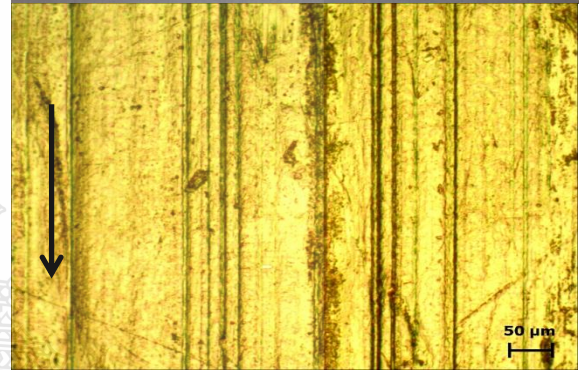
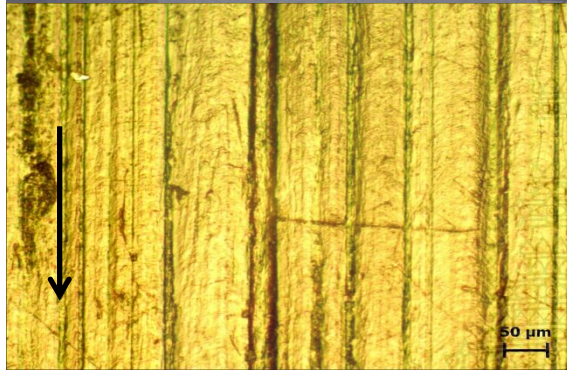
h) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 8 MPa



i) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 10 MPa

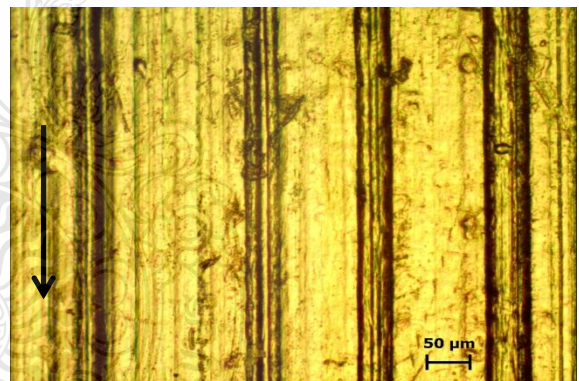
j) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 3 MPa

รูปที่ 4.9 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ (ต่อ)



k) อัตรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 5 MPa

l) อัตรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 8 MPa



m) อัตรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 10 MPa

รูปที่ 4.9 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลอง อัตรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ (ต่อ)

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE และ UHMWPE Composite [48] อนุภาคการสึกหรอที่ปรากฏนี้ เกิดขึ้นจากการพฤติกรรมการถ่ายโอนเนื้อพอลิเมอร์ (Polymer Transfer) และการสลายตัว (Degradation) ของพอลิเมอร์ที่มีสาเหตุมาจากการแตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ (การล้าตัวของพอลิเมอร์ (Polymer Fatigue) หรือ การขจัดที่ เกิดจากการตัดเฉือน

ระดับไมโครของจุดปลายความหยาบพื้นผิวของพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัส ( Abrasive Micro Cutting of Roller Counterface Asperity)) แล้วเกิดการสะสมตัวบริเวณขอบรอยสึกหรอตามทิศทางการไถของ ลูกกลิ้งคู่สัมผัสจากการทดสอบการสึกหรอ

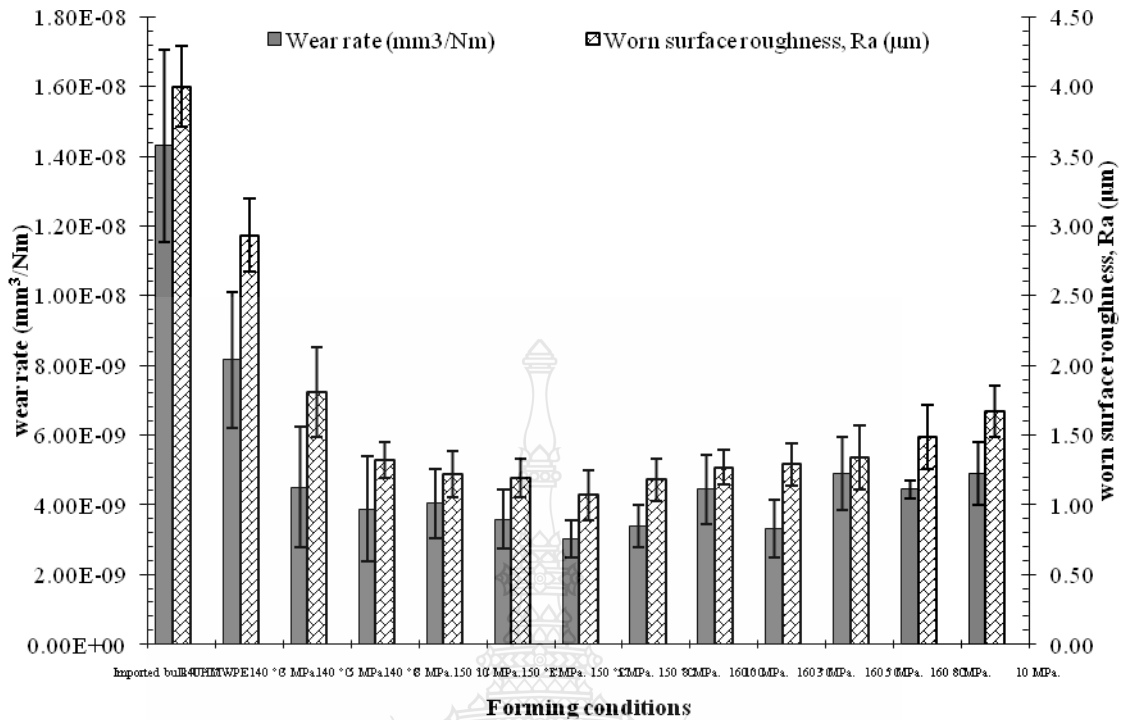
ในตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยีด้วยเครื่องมือต่างๆ ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียหายของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.12-0.14 โดยชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายสูงสุดเท่ากับ 0.14 และนอกจากนี้ชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศยังมีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ได้ดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูป โดยมีค่าเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $4.00 \pm 0.29 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ

จากกราฟการวิเคราะห์เปรียบเทียบดังรูปที่ 4.10 พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำสุด มีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $1.09 \pm 0.15 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa และชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa ตามลำดับ จากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า สภาพะของการขึ้นรูปมีผลต่ออัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมีความสัมพันธ์กัน โดยชิ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน



ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางด้านโทรโพลีของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Sample / Forming condition	Coefficient of friction, $\mu$		Wear rate, K ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )		Worn surface Roughness, Ra ( $\mu\text{m}$ )	
	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
Imported bulk UHMWPE	0.14	0.01	1.43E-08	2.76E-09	4.00	0.29
140 °C 3 MPa. 30 min.	0.12	0.01	8.17E-09	1.95E-09	2.93	0.26
140 °C 5 MPa. 30 min.	0.12	0.00	4.51E-09	1.71E-09	1.81	0.32
140 °C 8 MPa. 30 min.	0.12	0.01	3.89E-09	1.51E-09	1.32	0.13
140 °C 10 MPa. 30 min.	0.12	0.01	4.04E-09	9.93E-10	1.22	0.17
150 °C 3 MPa. 30 min.	0.12	0.01	3.59E-09	8.34E-10	1.19	0.14
150 °C 5 MPa. 30 min.	0.12	0.01	3.02E-09	5.27E-10	1.09	0.15
150 °C 8 MPa. 30 min.	0.12	0.01	3.39E-09	6.11E-10	1.18	0.15
150 °C 10 MPa. 30 min.	0.12	0.01	4.44E-09	9.84E-10	1.27	0.12
160 °C 3 MPa. 30 min.	0.12	0.01	3.31E-09	8.26E-10	1.29	0.15
160 °C 5 MPa. 30 min.	0.12	0.01	4.91E-09	1.04E-09	1.34	0.23
160 °C 8 MPa. 30 min.	0.12	0.01	4.44E-09	2.70E-10	1.49	0.23
160 °C 10 MPa. 30 min.	0.12	0.01	4.90E-09	8.87E-10	1.67	0.18



รูปที่ 4.10 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa เกิดการ Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2309 cm<sup>-1</sup> และ 1622 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นพีคสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene (-CH<sub>2</sub>-), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ ที่ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีอัตราการสึกหรอต่ำสุด[42] ซึ่งพีคเหล่านี้ไม่ปรากฏในผงอนุภาค UHMWPE บริสุทธิ์และวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และนอกจากนี้ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ยังพบพีคที่ 1890 cm<sup>-1</sup> ที่เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ [43,44,49] ซึ่งส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ทำการทดลองอัดรีดขึ้นรูป

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึก สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกสูง จะมีสมบัติทางกลสูงกว่าชิ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำ และปริมาณความเป็นผลึกสูงยังส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน [43] และนอกจากนี้สมบัติทางกลที่สูงและอัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายใน

สายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha [49] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์ที่มีค่า Ultimate Tensile Strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-Crystalline Microstructure) เพราะค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ หมายถึง ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไถลมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นเยื่อต่างๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษา หาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุ ก่อนถึงสำเร็จรูป UHMWPE ด้วยกรรมวิธี Ram Extrusion ที่ให้ค่า Yield Strength สูงสุด และอัตราการสึกหรอต่ำสุด สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องจักรกลต่างๆ และ ผลจากการดำเนินงานศึกษาวิจัยทั้งหมดที่ได้มีการทดลองวิเคราะห์ทดสอบและอภิปรายความสัมพันธ์ระหว่างของผลการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยผลการวิเคราะห์ทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี, สมบัติทางกายภาพ, สมบัติทางกลและสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ วัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ที่ได้จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยออกเป็นกลุ่มการทดลอง ดังต่อไปนี้

สรุปผลการทดลองอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ UHMWPE เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

1. วัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า

1) ปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 %

2) จากการวิเคราะห์ IR-Spectrum พบ พิกัดสัญญาณการสั่นของหมู่ Carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลง

3) สมบัติทางกล มีค่า Yield Strength, Ultimate Tensile Strength และค่า Elongation เท่ากับ  $20.87 \pm 1.01$  MPa,  $22.93 \pm 2.27$  MPa และ  $396.67 \pm 37.43$  % ตามลำดับ

4) สมบัติทางด้านไทรโบโลยี มีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9}$  mm<sup>3</sup>/Nm

2. วัสดุก่อน UHMWPE ที่ทำการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะของตัวแปร อุณหภูมิ ความดันและเวลาของการคงอุณหภูมิ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที โดยขึ้นทดสอบมีสมบัติต่างๆ ดังนี้

1) ปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52%

2) จากการวิเคราะห์ IR-Spectrum พบ พีคสัญญาณการสั่นของหมู่ Vinyl (C=C) ที่แสดงการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเกิดการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์นี้มีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

3) สมบัติทางกล มีค่า Yield Strength, Ultimate Tensile Strength และค่า Elongation เท่ากับ  $20.43 \pm 1.21$  MPa,  $28.33 \pm 1.53$  MPa และ  $285.60 \pm 6.41$  % ตามลำดับ ซึ่งขึ้นทดสอบมีสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 23.3 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) จากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า

4) สมบัติทางด้านไทรโบโลยีมีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการที่ขึ้นทดสอบมี Ultimate Tensile strength และค่า Elongation ที่สูงกว่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากผลการทดลอง พบว่า สภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดไม่ใช่สภาวะเดียวกัน ดังนั้น การเลือกวัสดุ UHMWPE มาประยุกต์ใช้งานควรพิจารณาวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ถ้าต้องการคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงควรศึกษาที่สภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 °C ความดัน 8 MPa เวลาคงอุณหภูมิและความดัน 30 นาที และต้องการความเหนียว ควรศึกษาที่สภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C ความดัน 10 MPa เวลาคงอุณหภูมิและความดัน 30 นาที

5.2.2 ถ้าเป็นงานที่ต้องการให้วัสดุทนต่อการเสียดสีหรือสึกหรอ เช่น นำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านสัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ และนำมาใช้ทำเป็นรางวิ่งหรือรางลำเลียงขวดในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ ควรศึกษาที่สภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิและความดัน 30 นาที

## รายการอ้างอิง

- [1] Steven M. Kurtz. **UHMWPE Biomaterials Handbook**. China: Elsevier Inc.; 2009.
- [2] F. Li, K. Hu, J. Li, B. Zhao, **The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene**. *Wear*, 249 (2001) 877–882
- [3] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, G. Shi, Q. L. Ji, B. Wetzel, K. Friedrich, Graft polymerization onto inorganic nanoparticles and its effect on tribological performance improvement of polymer composites. *Tribol. Int.*, 136 (2003) 697–707.
- [4] H. B. Qiao, Q. Guo, A. G. Tian, G. L. Pan, L. B. Xu, A study on friction and wear characteristics of nanometer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PEEK composites under the dry sliding condition. *Tribol. Int.*, 140 (2007)–110
- [5] Z. Yang, B. Dong, Y. Huang, L. Liu, F.-Y. Yan, H.-L. Li, **Enhanced wear resistance and micro-hardness of polystyrene nanocomposites by carbon nanotubes**. *Mater. Chem. Phys.*, 109 (2003) 94–113
- [6] Rodriguez F. **Principles of polymer systems**. New York: Hemisphere; 1989.
- [7] Young RJ. **Introduction to polymers**. London: Chapman and Hall Ltd.; 1983.
- [8] Kurtz SM, Muratoglu OK, Evans M, Edidin AA. Advances in the processing, **sterilization, and crosslinking of ultra-high molecular weight polyethylene for total joint arthroplasty**. *Biomaterials* 1999; 20:1659–88.
- [9] Bellare A, Schnablegger H, Cohen RE. **A small-angle x-ray scattering study of high-density polyethylene and ultra-high molecular weight polyethylene**. *Macromolecules* 1995;17:2325–33.
- [10] Gul R. **Improved UHMWPE for use in total joint replacement**. Ph.D. Dissertation. Boston: Massachusetts Institute of Technology; 1997.
- [11] Han KS, Wallace JF, Truss RW, Geil PH. **Powder compaction, sintering, and rolling of ultra-high molecular weight polyethylene and its composites**. *J Macromol Sci-Phys* 1981;B19:313–49
- [12] Barnetson A, Hornsby PR. Observations on the sintering of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) powders. *J Materials Sci Letters* 1995;14:80–4.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [13] Bellare A, Cohen RE. **Morphology of rod stock and compressionmoulded sheets of ultra-high- molecular-weight polyethylene used in orthopaedic implants.** *Biomaterials*, 1996; 17:2325–33.
- [14] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra PJ. **Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history.** *Polymer* 1990;31:1435–40
- [15] Farrar DF, Brain AA. **The microstructure of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements.** *Biomaterials*, 1997; 18:1677–85..
- [16] Olley RH, Hosier IL, Bassett DC, Smith NG. **On morphology of consolidated UHMWPE resin in hip cups,** *Biomaterials*, 1999; 20:2037–46.
- [17] Lykins MD, Evans MA. **A comparison of extruded and molded UHMWPE.** *Trans 21st Soc Biomater*, 1995; 18:385.
- [18] Gwidon W. Stachowiak and Andrew W. Batchelor, *Tribology Series 24, Engineering Tribology*, Butterworth Heinemann, 1993.
- [19] Jamal Takadoun. **Materials and Surface Engineering in Tribology**, CPI Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, Great Britain, 2008.
- [20] 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, 2009, pp 3–32.
- [21] K. Tanaka, Y. Uchiyama and S. Toyooka, **Wear**, 1973, vol. 23, pp. 153.
- [22] K. R. Makinson and D. Tabor, **Proc. Roy. Soc.**, 1964, no. A281, pp. 49.
- [23] A. I. Sviridenok, V. A. Bely, V. A. Smurugov, and V. G. Savkin, **Wear**, 1973. vol. 25, pp. 301.
- [24] 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*, 1978, vol. 100, pp. 208–218.

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [25] I. V. Kragelskii, M. N. Dobychin and V. S. Kombatov, **Friction and Wear Calculation Methods**, Oxford, Pergamon Press, 1982.
- [26] S. Bahadur, **The development of transfer layers and their role in polymer tribology**, *Wear*, 2000, no.245, pp. 92.
- [27] S. P. Gubin, Yu. A. Koksharov, G. B. Khomutov and G. Yu. Yurkov, *Russ. Chem. Rev.*, 2005, vol. 74, pp. 489.
- [28] L. Yu and S. Bahadur, *Wear*, 1998, vol. 214, pp. 245.
- [29] V. L. Vakula and L. M. Pritykin, **Physical Chemistry of Polymer Adhesion**, (Khimia, Moscow, 1984) (in Russian).
- [30] D.H. Buckley, **Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication**, Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [31] D. Gong, Q. Xue and H. Wang, **ESC A Study on Tribochemical Characteristics of Filled PTFE**, *Wear*, 1991, vol. 148, pp. 161–169.
- [32] C.W. Bunn and E.R. Howells, **Structures of Molecules and Crystals of Fluorocarbons**, *Nature*, 1954, vol. 174, pp. 549–551.
- [33] C.M. Pooley and D. Tabor, **Friction and Molecular Structure: the Behaviour of some Thermoplastics**, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, 1972, vol. 329, pp. 251–274.
- [34] K. Tanaka, **Effects of Various Fillers on the Friction and Wear of PTFE-Based Composites**, in **Composite Materials Science**, editor: K. Friedrich, Elsevier, Amsterdam, 1986, pp. 137–174.
- [35] K. R. Makinson and D. Tabor. **The Friction and Transfer of Polytetrafluoro-ethylene**, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, 1964, vol. 281, pp. 49–61.
- [36] J.M. Thorpe, **Tribological Properties of Selected Polymer Matrix Composites against Steel Surfaces**, in **Composite Materials Science**, editor: K. Friedrich, Elsevier, Amsterdam, 1986, pp. 89–135.

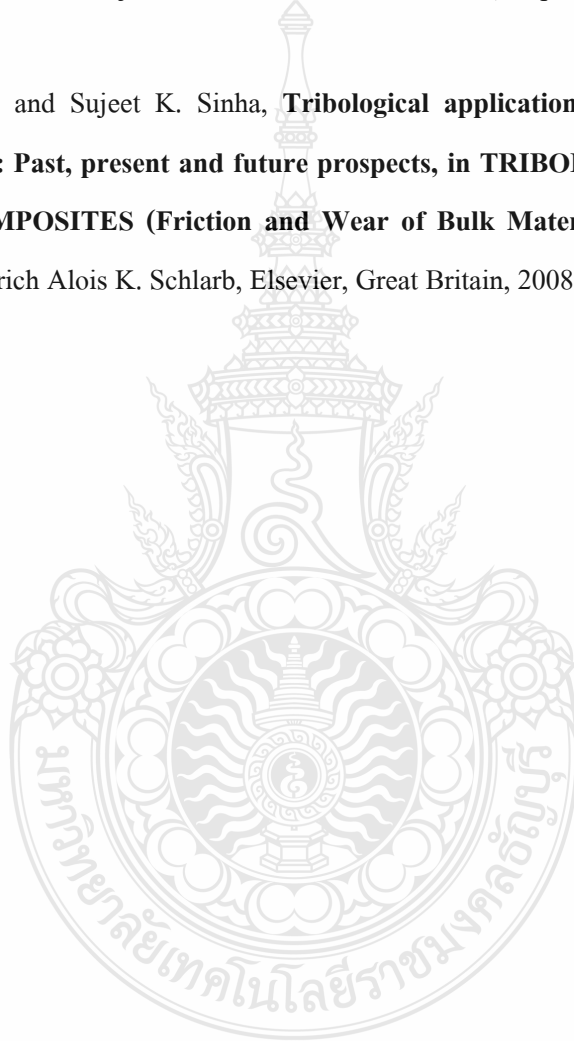


รายการอ้างอิง (ต่อ)

- [37] Shyam Bahadur<sup>1</sup> 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, 2009, pp 416–448.
- [38] K. Tanaka and T. Miyata, **Studies on the Friction and Transfer of Semi-Crystalline Polymers**, *Wear*, 1977, vol. 41, pp. 383–398.
- [39] V.K. Jain and S. Bahadur, **Material Transfer in Polymer–Polymer Sliding**, *Wear*, 1978, vol. 46, pp. 177–198.
- [40] ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ 2547, **การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม ความรู้เบื้องต้น และการป้องกัน**, พิมพ์ครั้งที่ 2 สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทยญี่ปุ่น)
- [41] L. Costa, M.P. Luda, L. Trossarelli, E.M. Brach del Prever, M. Crova, and P. Gallinaro. 1998. **Oxidation in orthopaedic UHMWPE sterilized by gamma-radiation and ethylene oxide**, *Biomaterials* 19: P659-668
- [42] Panin V.E., Panin S.V., Komeinko L.A., Wannasri S., Komeinko L.A., Ivanona L.R., Shil'ko S.V., **Effect of Mechanical Activation of Ultra High Molecular Weight Polyethylene on Its Mechanical and Triboengineering Properties**. *Mesomechanics* 2009, Tomsk, Russia. 2009
- [43] S.V.Panin.,L.A.Kornienko.,S.Piriyaonb.,L.R.Ivanova.,S.V.Shil'ko.,Yu.M.Pleskachevskii., V.M. Orlove. **Antifriction Nanocomposites Based on Chemically Modified UHMWPE. Part1.Mechanical and Tribological Properties of Chemically Modified UHMWPE**. *Mesomechanics* 2011, Tomsk, Russia. 2011
- [44] Panin S.V., Komeinko L.A., Wannasri S., Komeinko L.A., Ivanona L.R., and Shil'ko S.V. **Comparative Analysis of the Influence of Nano and Microfillers of Oxidized Al on the Frictional–Mechanical Characteristics of UHMWPE**. *Mesomechanics* 2010, Tomsk, Russia. 2010
- [45] G.F.P.Woitchunas. 2007. **J Mater Sci, Mater Med.** 18:1659-1663.
- [46] Nakanisi, K., **Infrakrasnye spektry i stroenie organicheskikh soedinenii (Infrared Spectra and the Structure of Organic Compounds)**, Moscow: Mir, 1965.

รายการอ้างอิง (ต่อ)

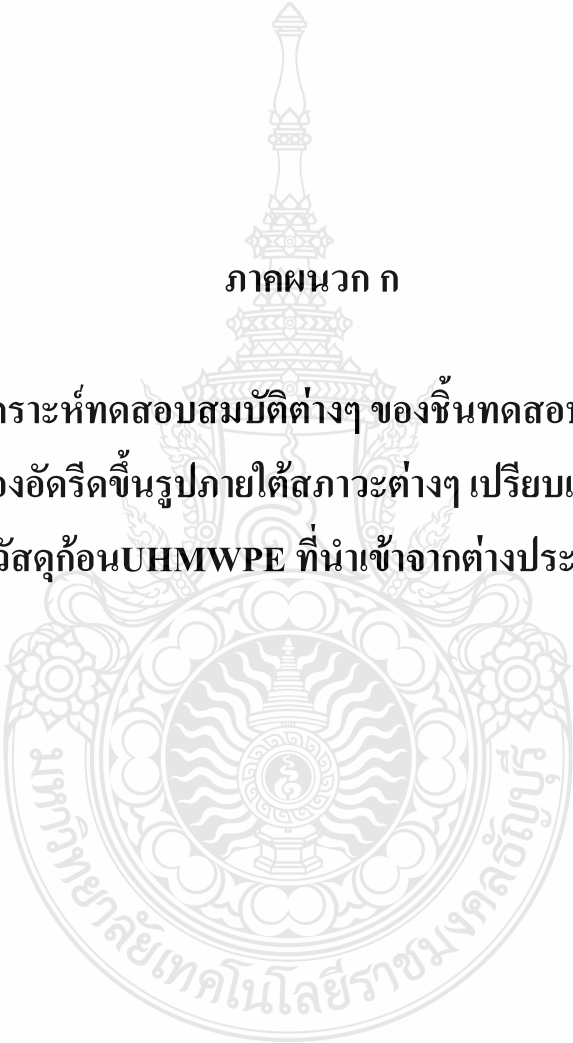
- [47] B. J Briscoe and S. K Sinha, **Wear of polymers**. Proc Instn Mech Engrs Vol 216 Part J: J Engineering Tribology,2002, 401-413 pp.
- [48] N.K. Myshkin and A.V. Kovalev, **Adhesion and Friction of Polymers, in Polymer Tribology**, editors: Sujeet K Sinha and Brian J Briscoe, Imperial College Press, 2009, pp 3–32.
- [49] Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha, **Tribological applications of polymers and their composites: Past, present and future prospects, in TRIBOLOGY OF POLYMERIC NANOCOMPOSITES (Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings)** editor Klaus Friedrich Alois K. Schlarb, Elsevier, Great Britain, 2008, pp 1-16





ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติต่างๆ ของชั้นทดสอบ UHMWPE  
ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบ  
วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Forming condition	Density, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )					Degree of crystallinity, $\chi$ (%)
	1	2	3	Average	SD	
Imported bulk UHMWPE	0.93	0.92	0.94	0.93	0.01	53.51
140 °C 3 MPa 30 min.	0.91	0.9	0.91	0.91	0.01	59.19
140 °C 5 MPa 30 min.	0.91	0.9	0.92	0.91	0.01	50.54
140 °C 8 MPa 30 min.	0.92	0.92	0.91	0.92	0.01	50.54
140 °C 10 MPa 30 min.	0.92	0.91	0.92	0.92	0.01	62.60
150 °C 3 MPa 30 min.	0.92	0.92	0.91	0.92	0.01	51.82
150 °C 5 MPa 30 min.	0.94	0.92	0.94	0.93	0.01	61.52
150 °C 8 MPa 30 min.	0.92	0.93	0.94	0.93	0.01	56.18
150 °C 10 MPa 30 min.	0.92	0.93	0.93	0.93	0.01	53.81
160 °C 3 MPa 30 min.	0.94	0.94	0.92	0.93	0.01	52.54
160 °C 5 MPa 30 min.	0.91	0.93	0.93	0.92	0.01	49.54
160 °C 8 MPa 30 min.	0.92	0.94	0.92	0.93	0.01	59.08
160 °C 10 MPa 30 min.	0.91	0.93	0.93	0.92	0.01	55.74

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบแสดงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบ วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Forming condition	Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)					Ultimate Tensile Strength, $\sigma_u$ (MPa)					Breaking Strength, $\sigma_b$ (MPa)					Elongation at Break, $\epsilon$ (%)				
	1	2	3	Average	SD	1	2	3	Average	SD	1	2	3	Average	SD	1	2	3	Average	SD
Imported bulk UHMWPE	21.00	21.80	19.80	20.87	1.01	24.80	23.60	20.40	22.93	2.27	24.80	23.60	20.40	22.93	2.27	424.00	412.00	354.00	396.67	37.43
140°C 3MPa 30min	9.60	12.50	9.90	10.67	1.59	23.80	26.00	23.20	24.33	1.47	23.00	22.20	23.20	22.80	0.53	229.10	205.10	216.20	216.80	12.01
140°C 5MPa 30min	10.00	11.00	15.00	12.00	2.65	28.00	26.50	24.00	26.17	2.02	24.00	24.00	22.60	23.53	0.81	241.30	235.00	209.80	228.70	16.67
140°C 8MPa 30min	12.50	16.00	17.00	15.17	2.36	25.00	26.50	28.50	26.67	1.76	15.10	21.00	20.50	18.87	3.27	267.40	240.30	235.80	247.83	17.09
140°C 10MPa 30min	18.00	20.50	14.80	17.77	2.86	29.20	27.00	25.50	27.23	1.86	25.00	22.00	21.00	22.67	2.08	272.90	264.00	250.30	262.40	11.38
150°C 3MPa 30min	18.52	19.80	18.50	18.94	0.74	26.50	28.50	28.50	27.83	1.15	21.10	22.10	25.00	22.73	2.03	277.20	260.30	250.30	262.60	13.60
150°C 5MPa 30min	20.00	21.80	19.50	20.43	1.21	27.00	28.00	30.00	28.33	1.53	23.80	25.20	25.00	24.67	0.76	279.00	291.80	286.00	285.60	6.41
150°C 8MPa 30min	19.50	17.00	21.00	19.17	2.02	30.20	28.20	24.80	27.73	2.73	23.00	20.50	20.50	21.33	1.44	251.00	268.00	242.40	253.80	13.03
150°C 10MPa 30min	17.50	20.00	16.00	17.83	2.02	25.00	25.00	28.50	26.17	2.02	22.50	18.50	20.00	20.33	2.02	242.50	249.60	257.20	249.77	7.35
160°C 3MPa 30min	14.50	18.50	18.00	17.00	2.18	24.80	24.40	27.50	25.57	1.69	22.20	16.00	20.30	19.50	3.18	242.50	231.20	261.50	245.07	15.31
160°C 5MPa 30min	18.50	15.00	17.45	16.98	1.80	29.40	26.80	25.50	27.23	1.99	18.50	21.80	22.00	20.77	1.97	237.50	210.00	248.50	232.00	19.83
160°C 8MPa 30min	15.80	14.50	17.50	15.93	1.50	26.50	22.20	25.40	24.70	2.23	23.20	18.80	20.80	20.93	2.20	271.20	265.50	245.80	260.83	13.33
160°C 10MPa 30min	16.00	13.50	18.00	15.83	2.25	26.50	22.00	25.50	24.67	2.36	16.00	13.50	18.00	15.83	2.25	280.00	260.50	290.00	276.83	15.00

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Forming condition	ความแข็ง (Shore D)																														Average	SD
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
Imported bulk	58	61	63	64	65	66	63	61	62	64	64	61	66	61	62	64	65	66	67	68	61	63	64	65	65	64	62	61	63	65	63.47	2.19
140°C 3MPa 30min	61	63	63	66	69	68	70	71	65	67	68	69	71	72	71	66	67	68	69	71	71	71	70	66	67	68	69	70	69	64	68.00	2.79
140°C 5MPa 30min	64	65	66	66	56	68	60	63	66	67	68	68	62	64	64	67	68	61	61	62	62	64	69	65	66	66	71	66	70	65	65.00	3.22
140°C 8MPa 30min	70	70	71	72	71	71	71	65	68	68	69	69	70	68	63	65	65	65	65	65	67	66	64	64	66	66	67	67	65	67	67.33	2.55
140°C 10MPa 30min	69	68	66	66	68	69	69	66	65	68	65	66	69	68	66	64	64	63	64	65	68	65	64	63	62	62	63	64	66	66	65.70	2.17
150°C 3MPa 30min	68	64	62	62	63	62	64	63	63	68	62	62	67	64	65	63	68	62	62	62	68	60	67	63	66	64	65	67	68	66	64.33	2.40
150°C 5MPa 30min	65	65	65	65	66	66	67	67	66	64	66	67	66	66	67	68	67	68	68	65	66	67	67	67	67	66	66	65	66	67	66.27	1.01
150°C 8MPa 30min	67	67	67	68	66	65	67	66	65	65	68	68	68	68	68	67	66	66	68	69	68	68	68	67	67	67	67	68	67	65	67.03	1.10
150°C 10MPa 30min	61	60	59	66	66	65	65	65	61	63	64	61	61	64	65	65	67	69	71	66	62	63	61	64	68	69	65	65	63	64	64.27	2.84
160°C 3MPa 30min	68	69	69	70	71	71	71	71	68	69	69	71	71	71	71	72	68	69	70	70	71	71	71	71	69	70	71	71	72	71	70.23	1.17
160°C 5MPa 30min	61	65	66	66	66	67	65	65	61	63	66	65	65	65	60	62	64	65	66	65	66	69	62	63	64	65	63	62	63	65	64.33	1.99
160°C 8MPa 30min	65	66	68	70	71	72	68	71	65	66	67	69	68	60	62	65	68	67	62	62	66	65	61	65	60	62	69	71	69	65	66.17	3.41
160°C 10MPa 30min	68	67	69	67	68	63	66	65	64	65	66	66	68	67	66	66	65	65	65	68	67	67	65	65	67	69	67	66	65	65	66.23	1.45

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบสมบัติทางโทรโบลยีและน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูป ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

Forming condition	Coefficient of friction, $\mu$					weight loss (mg)		
	1	2	3	Average	SD	1	2	3
Imported bulk UHMWPE	0.14	0.14	0.13	0.14	0.01	0.0079	0.0058	0.0057
140 °C 3 MPa 30 min.	0.12	0.11	0.12	0.12	0.01	0.0046	0.0032	0.0030
140 °C 5 MPa 30 min.	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	0.0015	0.0016	0.0029
140 °C 8 MPa 30 min.	0.12	0.12	0.11	0.12	0.01	0.0015	0.0025	0.0012
140 °C 10 MPa 30 min.	0.13	0.11	0.12	0.12	0.01	0.0013	0.0021	0.0020
150 °C 3 MPa 30 min.	0.12	0.12	0.11	0.12	0.01	0.0013	0.0015	0.0020
150 °C 5 MPa 30 min.	0.11	0.13	0.12	0.12	0.01	0.0015	0.0015	0.0011
150 °C 8 MPa 30 min.	0.11	0.13	0.11	0.12	0.01	0.0012	0.0017	0.0017
150 °C 10 MPa 30 min.	0.12	0.11	0.12	0.12	0.01	0.0023	0.0022	0.0015
160 °C 3 MPa 30 min.	0.12	0.13	0.11	0.12	0.01	0.0016	0.0011	0.0018
160 °C 5 MPa 30 min.	0.11	0.11	0.13	0.12	0.01	0.0027	0.0019	0.0020
160 °C 8 MPa 30 min.	0.11	0.12	0.12	0.12	0.01	0.0021	0.0019	0.0020
160 °C 10 MPa 30 min.	0.13	0.12	0.11	0.12	0.01	0.0022	0.0018	0.0026

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

Forming condition	Wear rate, K ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )					Worn surface roughness, Ra ( $\mu\text{m}$ )				
	1	2	3	Average	SD	1	2	3	Average	SD
Imported bulk UHMWPE	$1.75 \times 10^{-08}$	$1.30 \times 10^{-08}$	$1.25 \times 10^{-08}$	$1.43 \times 10^{-08}$	$2.76 \times 10^{-09}$	3.69	4.05	4.26	4.00	0.29
140 °C 3 MPa 30 min.	$1.04 \times 10^{-08}$	$7.32 \times 10^{-09}$	$6.78 \times 10^{-09}$	$8.17 \times 10^{-09}$	$1.95 \times 10^{-09}$	2.64	3.00	3.15	2.93	0.26
140 °C 5 MPa 30 min.	$3.39 \times 10^{-09}$	$3.66 \times 10^{-09}$	$6.49 \times 10^{-09}$	$4.51 \times 10^{-09}$	$1.71 \times 10^{-09}$	2.04	1.95	1.44	1.81	0.32
140 °C 8 MPa 30 min.	$3.35 \times 10^{-09}$	$5.59 \times 10^{-09}$	$2.71 \times 10^{-09}$	$3.89 \times 10^{-09}$	$1.51 \times 10^{-09}$	1.38	1.17	1.41	1.32	0.13
140 °C 10 MPa 30 min.	$2.91 \times 10^{-09}$	$4.75 \times 10^{-09}$	$4.47 \times 10^{-09}$	$4.04 \times 10^{-09}$	$9.93 \times 10^{-10}$	1.14	1.41	1.11	1.22	0.17
150 °C 3 MPa 30 min.	$2.91 \times 10^{-09}$	$3.35 \times 10^{-09}$	$4.52 \times 10^{-09}$	$3.59 \times 10^{-09}$	$8.34 \times 10^{-10}$	1.11	1.11	1.35	1.19	0.14
150 °C 5 MPa 30 min.	$3.28 \times 10^{-09}$	$3.35 \times 10^{-09}$	$2.41 \times 10^{-09}$	$3.02 \times 10^{-09}$	$5.27 \times 10^{-10}$	1.26	1.05	0.96	1.09	0.15
150 °C 8 MPa 30 min.	$2.68 \times 10^{-09}$	$3.76 \times 10^{-09}$	$3.72 \times 10^{-09}$	$3.39 \times 10^{-09}$	$6.11 \times 10^{-10}$	1.14	1.05	1.35	1.18	0.15
150 °C 10 MPa 30 min.	$5.14 \times 10^{-09}$	$4.87 \times 10^{-09}$	$3.32 \times 10^{-09}$	$4.44 \times 10^{-09}$	$9.84 \times 10^{-10}$	1.23	1.41	1.17	1.27	0.12
160 °C 3 MPa 30 min.	$3.50 \times 10^{-09}$	$2.41 \times 10^{-09}$	$4.03 \times 10^{-09}$	$3.31 \times 10^{-09}$	$8.26 \times 10^{-10}$	1.29	1.14	1.44	1.29	0.15
160 °C 5 MPa 30 min.	$6.11 \times 10^{-09}$	$4.20 \times 10^{-09}$	$4.42 \times 10^{-09}$	$4.91 \times 10^{-09}$	$1.04 \times 10^{-09}$	1.50	1.44	1.08	1.34	0.23
160 °C 8 MPa 30 min.	$4.70 \times 10^{-09}$	$4.16 \times 10^{-09}$	$4.47 \times 10^{-09}$	$4.44 \times 10^{-09}$	$2.70 \times 10^{-10}$	1.44	1.29	1.74	1.49	0.23
160 °C 10 MPa 30 min.	$4.97 \times 10^{-09}$	$3.98 \times 10^{-09}$	$5.75 \times 10^{-09}$	$4.90 \times 10^{-09}$	$8.87 \times 10^{-10}$	1.50	1.86	1.65	1.67	0.18





ภาคผนวก ข

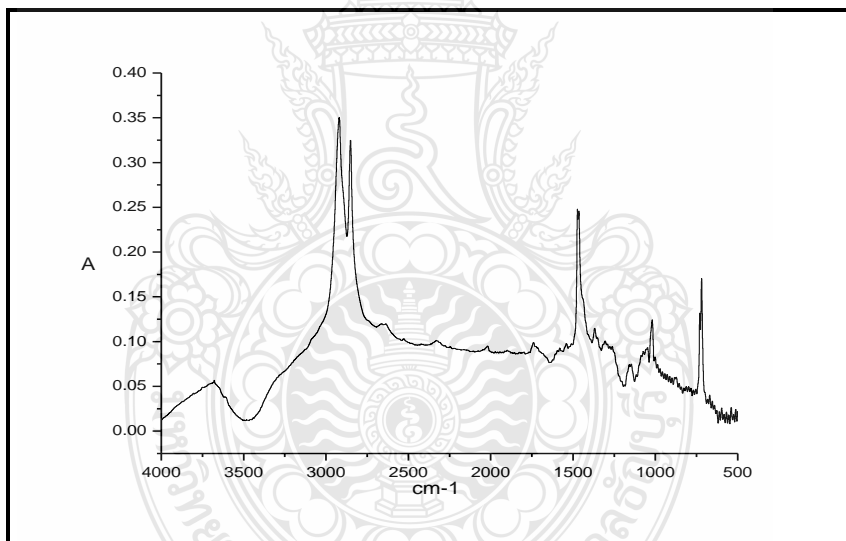
ผลการศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE  
ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ

จากการนำผง UHMWPE บริสุทธิ์ มาอัดรีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Ram Extruder โดยมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะที่ใช้ในการอัดรีดขึ้นรูป คือ อุณหภูมิ และความดัน ได้แก่ 140 °C, 150 °C, 160 °C และ 3 MPa, 5 MPa, 8 MPa, 10 MPa ตามลำดับ เพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ซึ่งจากการวิเคราะห์ทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีของชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปด้วย เครื่อง Ram Extruder ที่สภาวะต่างๆ ด้วยเครื่อง FTIR พบว่า มีลักษณะของ FT-IR สเปกตรัม ดังนี้

**1. วัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa**

จาก FTIR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.1 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3419  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2919-2851  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่ 1624  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1464  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ  $\text{CH}_2$  Bending และที่ 719  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ การเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 1624  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ Vinyl (C=C)

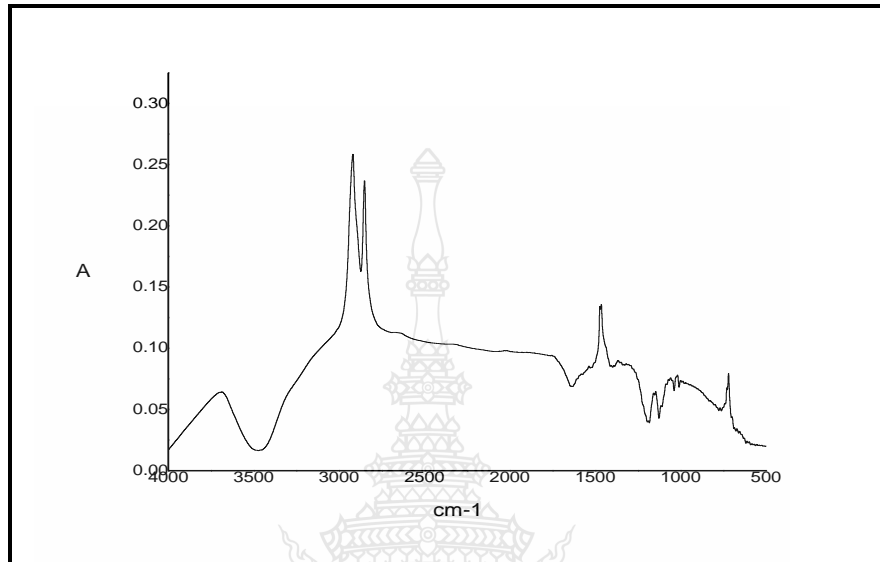


รูปที่ ข.1 FTIR Spectrum วัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa

**2. วัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa**

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3686  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 1747  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่, ที่ 1464  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ  $-\text{CH}_2$  Bending และที่ 719  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

สามารถสรุปได้ว่า วัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 1747  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่คาร์บอนิล (C=O)

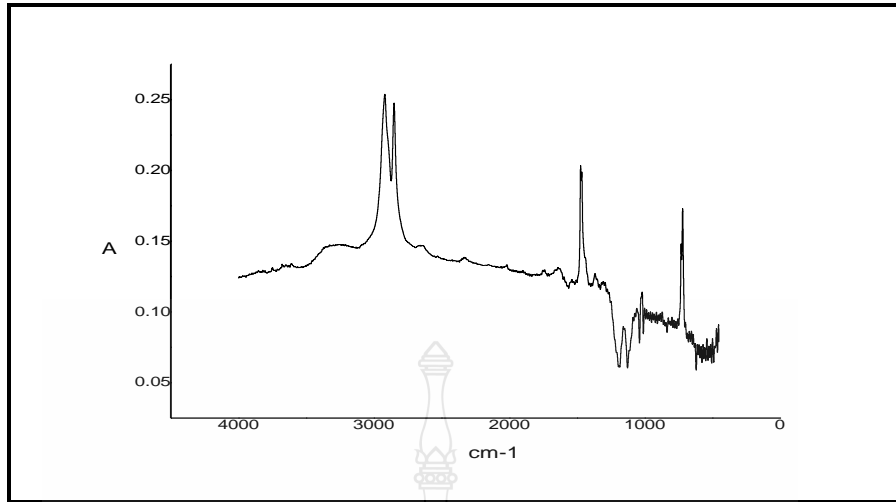


รูปที่ ข.2 FTIR Spectrum วัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa

### 3. วัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.3 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3258  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2919-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 1643  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1464  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ  $-\text{CH}_2$  Bending และที่ 719  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

สามารถสรุปได้ว่า วัสดุก่อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ การเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 1624  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ Vinyl (C=C)

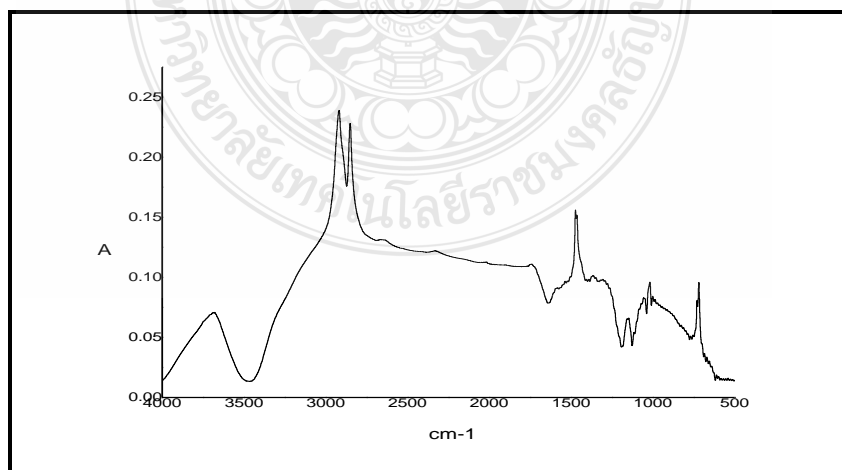


รูปที่ ข.3 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa

4. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.4 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่  $3687\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$  ที่  $2918\text{-}2850\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่  $1736\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่, ที่  $1464\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ  $-\text{CH}_2$  Bending และที่  $719\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่  $1736\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่คาร์บอนิล (C=O)

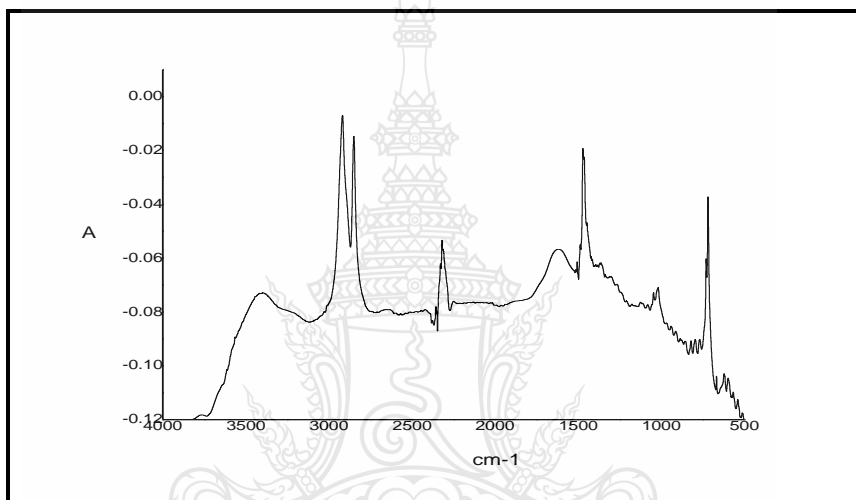


รูปที่ ข.4 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa

5. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.5 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3398  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 2311  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์, ที่ 1624  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1464  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ - $\text{CH}_2$  Bending และที่ 719  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์และเกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2311  $\text{cm}^{-1}$  และ 1624  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ

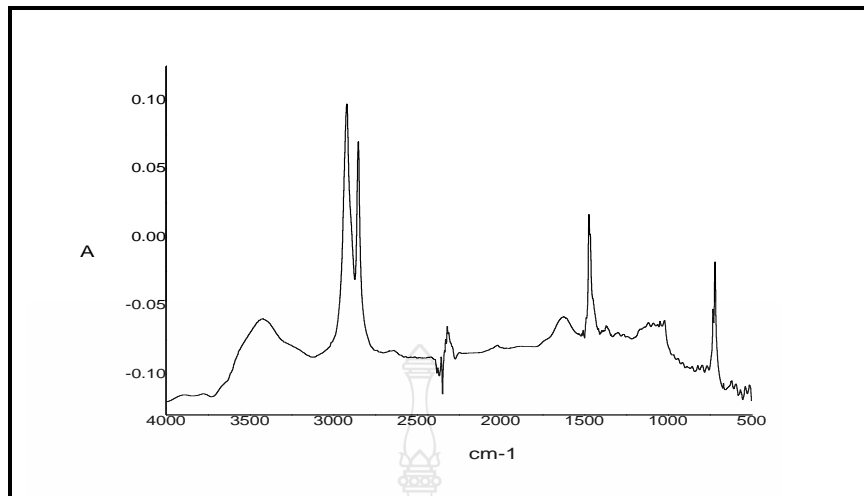


รูปที่ ข.5 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa

6. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.6 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3419  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 2309  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์, ที่ 1622  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1471  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ - $\text{CH}_2$  bending และที่ 718  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์และเกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2309  $\text{cm}^{-1}$  และ 1622  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -), หมู่ Vinyl (C=C) ตามลำดับ

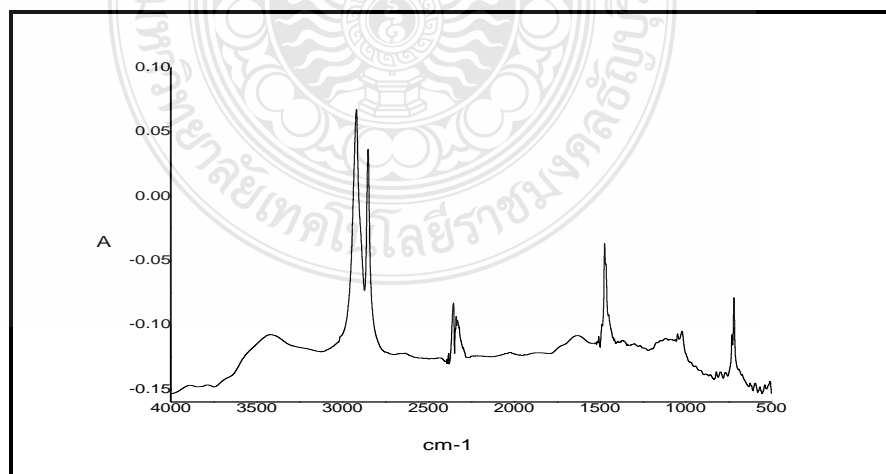


รูปที่ ข.6 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa

7. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.7 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3418  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 2336  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์, ที่ 1624  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1471  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ - $\text{CH}_2$  bending และที่ 718  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าสาร 7 มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์และเกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2336  $\text{cm}^{-1}$  และ 1624  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -), หมู่ Vinyl (C=C) ตามลำดับ

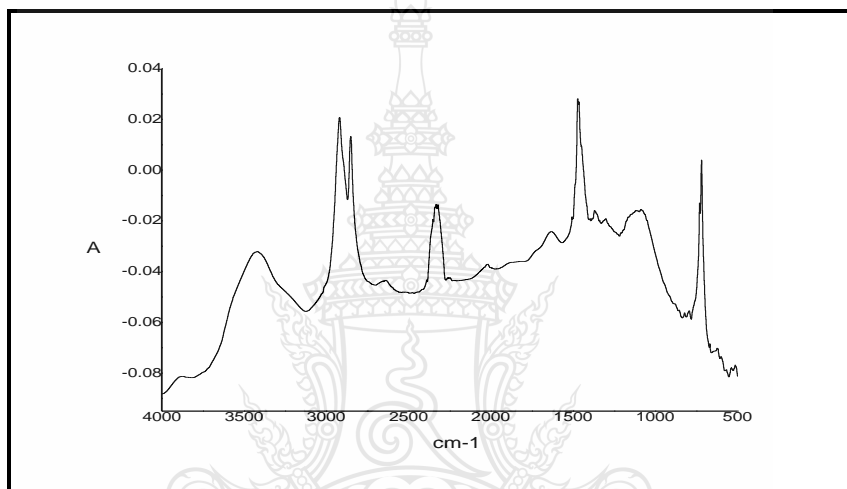


รูปที่ ข.7 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa

8. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.8 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3401  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 2306  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์, ที่ 1635  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1464  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ - $\text{CH}_2$  Bending และที่ 718  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์และเกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2306  $\text{cm}^{-1}$  และ 1635  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -), หมู่ Vinyl (C=C) ตามลำดับ

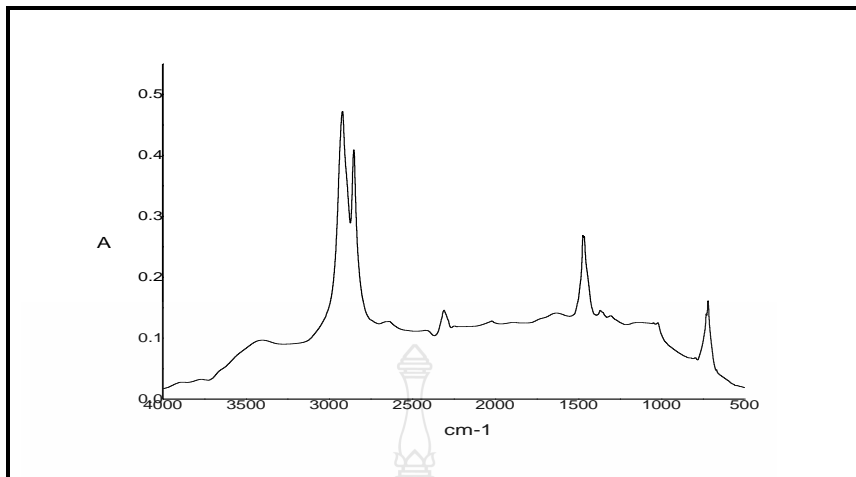


รูปที่ ข.8 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa

9. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.9 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3412  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 2310  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์, ที่ 1615  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1463  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ - $\text{CH}_2$  Bending และที่ 718  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์และเกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2310  $\text{cm}^{-1}$  และ 1615  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ

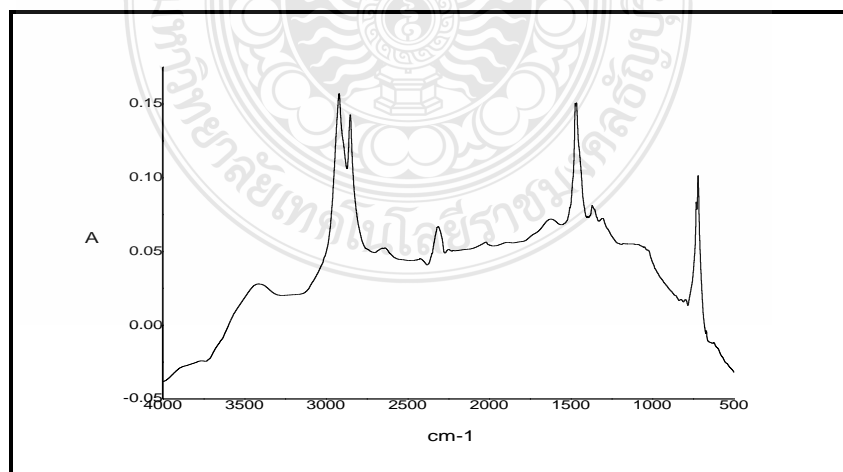


รูปที่ ข.9 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa

10. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.10 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3412  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 2310  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -) ที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์, ที่ 1615  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ Vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1463  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ - $\text{CH}_2$  Bending และที่ 718  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์และเกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2310  $\text{cm}^{-1}$  และ 1615  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (- $\text{CH}_2$ -), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ



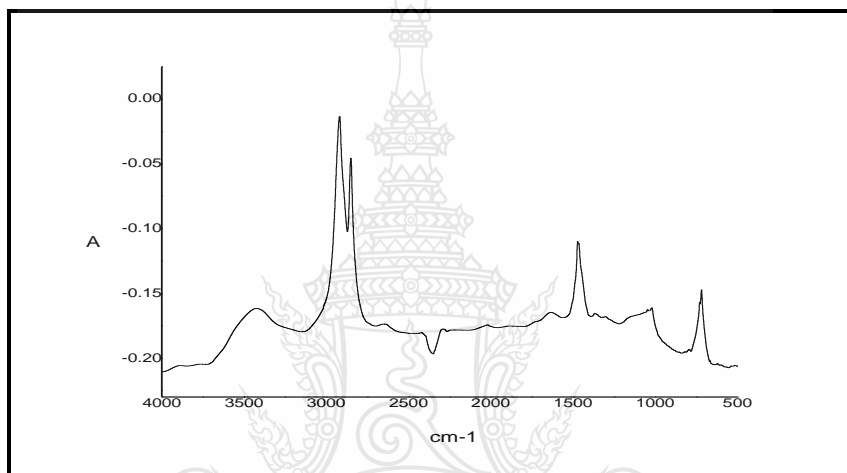
รูปที่ ข.10 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa



11. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.11 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3419  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 1637  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1471  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ  $-\text{CH}_2$  Bending และที่ 718  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 1615  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ vinyl (C=C)

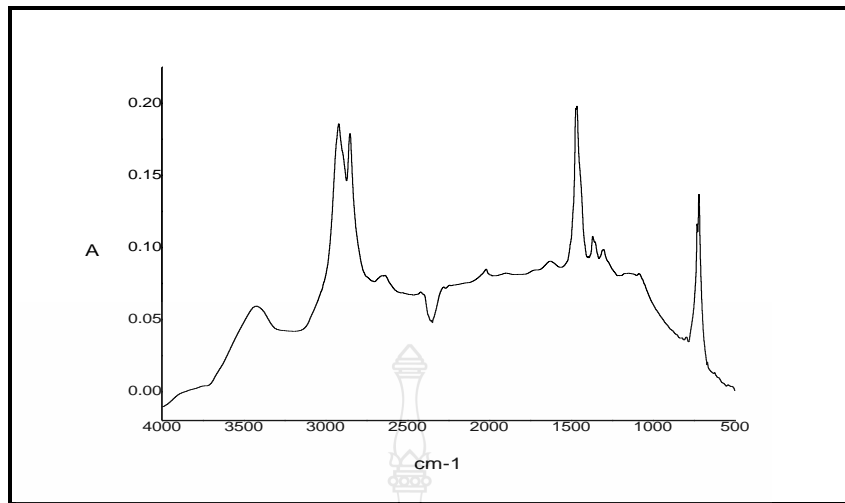


รูปที่ ข.11 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa

12. วัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa

จาก FT-IR สเปกตรัมที่แสดงในรูปที่ ข.12 แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3418  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $\text{CH}_2$ , ที่ 2918-2850  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H Stretching, ที่ 1621  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งมีการเกิด Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1463  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ  $-\text{CH}_2$  Bending และที่ 718  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณของ C-H Bending

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa มีการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น คือ เกิดการ Crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 1621  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ Vinyl (C=C)



รูปที่ ข.12 FTIR Spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa



ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยมหิดล

ร่วมกับ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและการจัดการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยศิลปากร

Proceedings  
**IE Network Conference 2013**  
**Green Productivity and Innovation**

16 - 18 ตุลาคม 2556

โรงแรม เอวัน เดอะ รอยัล ครุฑ พัทยา ชลบุรี

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึก  
หรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion

The Influence of Forming Variable on Wear Resistance Property of  
UHMWPE in Ram Extrusion Process

สุรศักดิ์ มะริโตปะนะ<sup>1</sup> ศิริชัย ต่อสกุล<sup>2</sup> สุรัตน์ วรรณศรี<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

อีสาน นครราชสีมา

E-mail: surasak\_td@hotmail.com

Surasak Matitapanum<sup>1</sup> Sirichai Torsakul<sup>2</sup> Surat Wannasri<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Thanyabury, Patumtanee

<sup>3</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Isan, Nakhonratchasima

E-mail: surasak\_td@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพล ของอุณหภูมิ ความดัน และเวลาคงอุณหภูมิ ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก่อน พอลิเอทิลีน มวลโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene,UHMWPE) จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion เปรียบเทียบกับวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยกำหนดสภาวะของการขึ้นรูป ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิขึ้นรูป 140 150 และ 160 °C ความดัน 3 5 8 10 MPa และ เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที สำหรับในส่วนของ การทดสอบการสึกหรอทำการทดสอบด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลการศึกษวิจัย พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปส่วนใหญ่มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  ซึ่งมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการเกิด Cross-linking ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่พบ พีคสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและมีผลต่อการลดลงของความต้านทานการสึกหรอ

**คำหลัก** UHMWPE ความต้านทานการสึกหรอ Ram extrusion Block on ring

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion  
The Influence of Forming Variable on Wear Resistance Property of UHMWPE in Ram Extrusion Process

สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะ<sup>1\*</sup> ศิริชัย ต่อสกุล<sup>2</sup> สุรัตน์ วรรณศรี<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

E-mail: surasak\_td@hotmail.com\*

Surasak Matitopanum<sup>1\*</sup> Sirichai Torsakul<sup>2</sup> Surat Wannasri<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyabury, Patumtanee

<sup>3</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima

E-mail: surasak\_td@hotmail.com\*

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิ ความดัน และเวลาคงอุณหภูมิ ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน พอลิเอทีลีน มวลโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion เปรียบเทียบกับวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยกำหนดสภาวะของการขึ้นรูปซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิขึ้นรูป 140 150 และ 160 °C ความดัน 3 5 8 10 MPa และ เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที สำหรับในส่วนของ การทดสอบการสึกหรอทำการทดสอบด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลการศึกษวิจัย พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปส่วนใหญ่มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm ซึ่งมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการเกิด Cross-linking ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศที่พบ พีคสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและมีผลต่อการลดลงของความต้านทานการสึกหรอ

คำหลัก UHMWPE, ความต้านทานการสึกหรอ, Ram extrusion, Block on ring

## Abstract

The objective of the research to study influence of temperature pressure and exposure time affect to wear resistance property of bulk UHMWPE that was performed by ram extrusion process to compare with imported bulk UHMWPE. Experimental extruded condition consists of the temperature of 140, 150 and 160 °C and pressure of 3, 5, 8 and 10 MPa with the temperature exposure time of 30 minutes. In the case of wear test, it was tested by mean of block on ring according with ASTM G77 standard. Result, most experimental formed bulk UHMWPE had shown a lower wear rate. Lowest wear rate of  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  obtain with performed condition of the temperature 150 °C exposure time of 30 minute and pressure of 5 MPa that it increase wear resistance by 4.75 times in contrast with imported bulk UHMWPE. The increasing wear resistance is caused by a cross-linking in polymer chain and the higher of degree of crystallinity of 61.52%. Imported bulk UHMWPE had shown variation peak of carbonyl group (C=O) and low degree of crystallinity of 53.31 % that indicated the oxidation reaction in the end of polymer chain and affect to decrease strength and wear resistance of polymer.

**Keywords:** UHMWPE, Wear Resistance, Ram Extrusion, Block on ring

## 1. บทนำ

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทก เจือยต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่างๆ การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ UHMWPE ในช่วงที่ผ่านมา เน้นไปที่การศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอเป็นหลัก เนื่องจาก UHMWPE ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสี รองรับการเสียดทานสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลและทางด้านทางการแพทย์ [1] การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เฟือง เกียร์ แบริ่ง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร รวมทั้งการนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียง





ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ  
การประชุมหน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช

ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร

ผศ.ดร.มานพ เรียวเดชะ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ. ดร.กรทิพย์ วัชรปัญญาวงศ์ เตชะเมธีกุล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน

ดร.เพ็ญสุดา พันธุ์คำ

ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง

ดร.ฐิติกร พัฒนพิบูล

ดร.นงนุชวิภา จันทรศรี

อ.จักรินทร์ กลั่นเงิน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล

ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์

รศ.ดร.ชนนาถ กฤตวรกาญจน์

ผศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว

รศ.ดร.นิวิธ เจริญใจ

ผศ.ดร.วิสสนัย วรรณจรรย์ยา

รศ.ดร.วิมลทิน เหล่าศิริถาวร

ผศ.ดร.อรรถพล สมุทคุปต์

รศ.ดร.อภิชาติ โสภางแดง

ดร.วสวัชร นาคเขียว

ผศ.ดร.ศักดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์

ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช

ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงศ์

ดร.อนิรุท ไชยजारุณิช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์

ผศ.ดร.อภิรัตน์นา อุดมศักดิ์กุล

รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์

รศ.วชิระ มีทอง

ผศ.ดร.ธนัญญา วสุศรี

ผศ.ดร.สุขสันต์ พรหมบุญพงศ์

ผศ.ดร.อิศรทัต พึ่งอ้น

ผศ.เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร  
ผศ.เชิดพงษ์ จอมเดช  
ผศ.เจริญ สุนทราวาณิชย์  
ดร.ปภัศร ชัยวัฒน์  
อ.ภัทธีรา ม้วนจั่น

ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์  
อ.แบงค์ งามอรุณโชติ  
อ.อาวุธ สนใจยุทธ  
ผศ.มงคล สีนะวัฒน์

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์  
ผศ.ดร.กุลศ พิมาพันธุ์ศรี  
ผศ.ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์

ผศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร  
ดร.ธนสาร อินทรกำจรชัย  
ดร.วรพจน์ มีถม

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ดร.วิจิตรสวัสดิ์ สุขสวัสดิ์ ณ อยุธยา  
อ.ธนกฤต โชติภาวริศ  
อ.ธนิดา สุนารักษ์  
อ.พัฒนพงษ์ แสงหัตถ์วัฒนา

อ.พรเทพ แก้วเชื้อ  
อ.วรินทร์ เกียรติบุญกุล  
อ.อรณิชา อนุชิตชาญชัย

#### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รศ.ดร.ณฐา ศุภทัชฐีเยียร  
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์  
ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล  
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง  
ผศ.นฤทธิ์ คชฤทธิ์  
ผศ.ไพฑูรย์ พูลสุขโข  
ผศ.ไพบูลย์ แยมเพื่อน  
ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก

ผศ.ศรีโร จารุภิญโญ  
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง  
ผศ.สุรัตน์ ตรียวนพงศ์  
ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ  
ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง  
ดร.ระพี กาญจนะ  
อ.วรรณวิมลจิตศิริ

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ**

ผศ.ดร.นนทโชติ อุดมศรี

ผศ.จักรินทร์ น่วมทิม

ผศ.ร่ำพีง เจริญยศ

ดร.สมพงษ์ พิริยานต์

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุโขทัยธรรมมาธิราช**

รศ.ผกามาศ ผจญเกล้า

รศ.สุภาวดี ธีรธรรมากร

รศ.สุณี ภูสีม่วง

รศ.ศุภณี เรียบเลิศหิรัญ

ดร.แหวงบุญ แยมแสงสังข์

อ.กรรณิการ์ ยัมนา

อ.จิรานุช บุตดีจัน

อ.บุญชัย วลีธรรมสวัสดิ์

อ.ภูมิ เจือศิริภักดี

อ.อิทธิเดช มูลมั่งมี

**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

ดร.จงกล ศรีธรรม

**มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**

รศ.ดร.จรรย์ พุทธกุลสมศิริ

**มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์**

ผศ.ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล

ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์

ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ

ดร.สันต์ รั้ววิบูลย์

อ.วุฒิกรณ์ จรรย์ตันติเวทย์

อ.อรดี พฤติศรีณนันท

ผศ.ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์

**มหาวิทยาลัยนครพนม**

ดร.บัณฑิต บุญขาว

ดร.วิชัย พัฒนพล

อ.รุจาภา นันทโพธิ์เดช

**มหาวิทยาลัยแม่โจ้**

ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ

**มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร**

รศ.ดร.ไพโรจน์ เนียมนาค

ผศ.วิชญ์ บัวเทศ

**มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช**

ดร.วีระยุทธ สุดสมบุรณ์

**มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์**

ดร.จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา

**มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร**

รศ.ดร.วิชัย แหวนเพชร

ผศ.ดร.ประณต บุญไชยอภิสิทธิ์

ผศ.อวยชัย วงศ์รัตน์

ดร.อนันตกุล อินทรผดุง

อ.ชาญชัย วัลลิสิต

อ.พิเชษฐ์ รัตนบุญทวี

อ.ภาสุระ อังกุลานนท์

อ.ลักขณา ฤกษ์เกษม

อ.อรมน ปั่นทอง

**มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**

อ.ธณิดา โชนงนุช

อ.อลงกรณ์ เมืองไหว

**มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย**

อ.เปรมชัย มูลกล้า

**มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต**

รศ.นียดา สวัสดิพงษ์

ผศ.สุทัศน์ จันบัวลา

ดร.ชาติ ทีฆะ

ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ณัฐลี

ดร.สิรวัลภ์ เรืองช่วย ตู้อู่ประกาย

**มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์**

ผศ.ดร.ชูชาติ พยอม

ผศ.ดร.ณัฐกานต์ พวงไพบูลย์

ผศ.ดร.นิคม ลนขุนทด

**มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี**

อ.ทิวรัตน์ ศรีราตรี

อ.วสันต์ พลั้วพันธ์

**มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์**

ดร.กัณฑ์ อินทวงศ์

**มหาวิทยาลัยรามคำแหง**

ผศ.ดร.กฤษดา พิศลยบุตร

ผศ.นุกูล อุบลบาน

ดร.เลิศเลขา ณะชัยพันธ์

**มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

รศ.ธนรัตน์ แต้ววัฒนา

ผศ.ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์

ผศ.ดร.พิลดา หวังพานิช

ผศ.รติรัตน์ กิตติปัญญาพัฒน์

ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ

ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ

ดร.วราธร ปัญญางาม

ดร.สิรเดช ชาตินิยม

**มหาวิทยาลัยศรีปทุม**

ผศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์

ผศ.ชวลิต มณีศรี

ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์

อ.จักรพันธ์ กัณหา

อ.ธนิน ศรีวะรมย์

**มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

รศ.ดร.นิกร ศิริวงศ์ไพศาล

รศ.สมชาย ชูโฉม

รศ.วนิดา รัตนมณี

ผศ.ดร.กลางเดือน โพขนา

ผศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล

ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล

ผศ.ดร.รัฐชนา สีนธวาลัย

ผศ.ดร.สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์

ผศ.ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์

ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์

ผศ.เจริญ เจตวิจิตร

ผศ.พิเชฐ ตระการชัยศิริ

ผศ.สงวน ตั้งโพธิธรรม

ผศ.ดร.ประภาค เมืองจันทร์บุรี

### มหาวิทยาลัยสยาม

รศ.ดร.วันชัย ริจิรวนิช  
รศ.คันสนีย์ สุภาภา  
ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วนิทธิ  
ผศ.ดร.รัฐวุฒิ ฐัแทนคุณ  
ผศ.ดร.อาทิตย์ โสตรโยม

อ.ณัฐพล พุฒยางกูร  
อ.ธัชฉนวนธ์ แคนเขต  
อ.ปุณยิศา คีนดี  
อ.พงศ์พัฒน์ เพชรรุ่งเรือง  
อ.วิมลพรรณ คงสมบูรณ์

### มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา  
ผศ.ดร.กาญจนา กาญจนสุนทร

ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์  
ดร.วัฒน์ชัย พฤกษ์กานนท์

### มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

ดร.นิตากร สมสุข  
อ.จิตลดา หมายมัน

อ.วรลักษณ์ เสถียรรังษฤกษ์  
อ.อรอุมา กอสนาน

### มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส  
ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม  
ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง  
ผศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ  
ผศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ

ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์  
ดร.จรวัยพร แสันทวีสุข  
ดร.ธารชуда พันธนิกุล  
ดร.สันท์ โอฬาพิริยกุล

### โรงเรียนนายเรืออากาศ

น.อ.สุทธิ ศรีบุรพา

น.ท.ปัญญารักษ์ โกศลวัฒน์

### สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ผศ.ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส  
ผศ.ดร.พิศุทธิ พงศ์ชัยฤกษ์  
ผศ.ดร.วราคม เนินน้อย  
ผศ.ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ

ดร.กรกฎ เหมสถาปัตย์  
ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์  
ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน

### สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.วิภู ศรีสืบสาย

ผศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล

รศ.ดร.วัลย์ลักษณ์ อัครีรวงศ์

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ

รศ.ดร.ฤดี มาสุจันทร์

รศ.ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต

ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย

ดร.พลชัย โชติปรายนกุล

ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม

ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข

### มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร

ผศ.จันทร์เพ็ญ อนุรัตนานนท์

ผศ.วันชัย สีสากวิวงศ์

ดร.กัญจนา ทองสนิท

ดร.คณศ พลอยदनัย

ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม

ดร.สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์

อ.กวินธร สัยเจริญ

### มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย

รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์

ผศ.ดร.กนกวรรณ กิ่งผดุง

ผศ.ดร. ดร.ธนกรณ์ แน่นหนา

ผศ.ดร.วเรศรา วีระวัฒน์

ผศ.ดร.สรนาถ ไกรภู

ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

ดร.จิรพรรณ เสี่ยงโรคาพาธ

ดร.มงคล เทียนวิบูลย์

อ.สิทธิพันธ์ ตันทวิรุฬห์

ดร.รณชัย ศิริเวธนูกุล

ดร.ศุภชัย ราษฎร์ศิริ

อ.กัญจน์ คณาธารทิพย์

อ.ดวงยศ สุภิกิตย์

อ.ธนา สาตรา

อ.นพกร ภูระยา

อ.พิมพ์ลัญช์ สุตะโคตร

MAN005	อิทธิพลของปัจจัยวัสดุที่มีผลต่อความเครียดที่เกิดขึ้นในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด <i>พิชิต วงษ์สุวรรณ ธงชัย เฟ็งจันทร์ดี และ ศิริชัย ต่อสกุล</i>	6
MAN006	อิทธิพลของปัจจัยวัสดุที่มีผลต่อแรงในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด <i>ศิริโชค แหยมเจริญ ธงชัย เฟ็งจันทร์ดี และ ศิริชัย ต่อสกุล</i>	อง 7
MAN007	การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียม 6063 และอะลูมิเนียม 7075 ด้วยบ่าเครื่องมือ 0 องศา <i>วิชัย พุ่มจันทร์</i>	8
MAN008	อิทธิพลของการอบบ่มอะลูมิเนียมผสม 6063 และอะลูมิเนียมผสม 7075 ที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน <i>วิชัย พุ่มจันทร์ และ ทวี หมดสี</i>	9
MAN009	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่คมตัดเครื่องมือสำหรับงานกลึงตัวอย่างโลหะ <i>วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล</i>	10
MAN010	การศึกษาอิทธิพลของกระบวนการตัดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ต่อปัญหาด้านคุณภาพ <i>อดิศักดิ์ กองกุล และ อภิวินน์ มุตตามระ</i>	11
MAN011	การวิจัยเพื่อหาช่องว่างที่เหมาะสมของแม่พิมพ์โลหะปั๊มตัดขาดสำหรับวัสดุ วัสดุรูปทรงกลม <i>กัมปนาท ถ่ายสูงเนิน วิมลภ อรุณสง มาโนช रिทินโย และ จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร</i>	A1100 12
MAN012	การสร้างหน้ากากตะกั่วสำหรับโครงสร้างเมมส์แอกซูเอเตอร์ด้วยกระบวนการลิทอ <i>พงษ์ศักดิ์ เกิดลาภี อนุรัตน์ วิศิษฎ์สรอรรถ คมกฤต เล็กสกุล และ รุ่งเรือง พัฒนากุล</i>	13
MAN013	การออกแบบเครื่องสีข้าวกล้องแบบภูมิปัญญาท้องถิ่น <i>จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์ สุทัศน์ ขานน้ำคำ และ ตะวันฉาย โพธิ์หอม</i>	14
MAN014	การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดวัสดุอะลูมิเนียมผสมด้วยน้ำแรงดันสูงแบบมีสารขัด <i>เมที สุขซี และ ศิริชัย ต่อสกุล</i>	15
MAN015	การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการผลิตด้วยกรรมวิธี Ram extrusion <i>สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะนำ ศิริชัย ต่อสกุล และ สุรัตน์ วรรณศรี</i>	16



การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึก  
หรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion

The Influence of Forming Variable on Wear Resistance Property of  
UHMWPE in Ram Extrusion Process

สุรศักดิ์ มะริโตปะนะ<sup>1</sup> ศิริชัย ต่อสกุล<sup>2</sup> สุรัตน์ วรรณศรี<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

อีสาน นครราชสีมา

E-mail: surasak\_td@hotmail.com

Surasak Matitapanum<sup>1</sup> Sirichai Torsakul<sup>2</sup> Surat Wannasri<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Thanyabury, Patumtanee

<sup>3</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Isan, Nakhonratchasima

E-mail: surasak\_td@hotmail.com

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพล ของอุณหภูมิ ความดัน และเวลาคงอุณหภูมิ ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน พอลิเอทิลีน มวลโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene,UHMWPE) จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion เปรียบเทียบกับวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยกำหนดสภาวะของการขึ้นรูป ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิขึ้นรูป 140 150 และ 160 °C ความดัน 3 5 8 10 MPa และ เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที สำหรับในส่วนของ การทดสอบการสึกหรอทำการทดสอบด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลการศึกษวิจัย พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปส่วนใหญ่มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  ซึ่งมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการเกิด Cross-linking ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่พบ พีคสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและมีผลต่อการลดลงของความต้านทานการสึกหรอ

**คำหลัก** UHMWPE ความต้านทานการสึกหรอ Ram extrusion Block on ring

การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion  
The Influence of Forming Variable on Wear Resistance Property of UHMWPE in Ram Extrusion Process

สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะ<sup>1\*</sup> ศิริชัย ต่อสกุล<sup>2</sup> สุรัตน์ วรรณศรี<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

<sup>3</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

E-mail: surasak\_td@hotmail.com<sup>\*</sup>

Surasak Matitopanum<sup>1\*</sup> Sirichai Torsakul<sup>2</sup> Surat Wannasri<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyabury, Patumtanee

<sup>3</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhonratchasima

E-mail: surasak\_td@hotmail.com<sup>\*</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิ ความดัน และเวลาคงอุณหภูมิ ที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน พอลิเอทีลีน มวลโมเลกุลสูง (Ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion เปรียบเทียบกับวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยกำหนดสภาวะของการขึ้นรูปซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิขึ้นรูป 140 150 และ 160 °C ความดัน 3 5 8 10 MPa และ เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที สำหรับในส่วนของ การทดสอบการสึกหรอทำการทดสอบด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ผลการศึกษาค้นคว้า พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปส่วนใหญ่มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm ซึ่งมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการเกิด Cross-linking ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศที่พบ พีคสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลงและมีผลต่อการลดลงของความต้านทานการสึกหรอ

คำหลัก UHMWPE, ความต้านทานการสึกหรอ, Ram extrusion, Block on ring

## Abstract

The objective of the research to study influence of temperature pressure and exposure time affect to wear resistance property of bulk UHMWPE that was performed by ram extrusion process to compare with imported bulk UHMWPE. Experimental extruded condition consists of the temperature of 140, 150 and 160 °C and pressure of 3, 5, 8 and 10 MPa with the temperature exposure time of 30 minutes. In the case of wear test, it was tested by mean of block on ring according with ASTM G77 standard. Result, most experimental formed bulk UHMWPE had shown a lower wear rate. Lowest wear rate of  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  obtain with performed condition of the temperature 150 °C exposure time of 30 minute and pressure of 5 MPa that it increase wear resistance by 4.75 times in contrast with imported bulk UHMWPE. The increasing wear resistance is caused by a cross-linking in polymer chain and the higher of degree of crystallinity of 61.52%. Imported bulk UHMWPE had shown variation peak of carbonyl group (C=O) and low degree of crystallinity of 53.31 % that indicated the oxidation reaction in the end of polymer chain and affect to decrease strength and wear resistance of polymer.

**Keywords:** UHMWPE, Wear Resistance, Ram Extrusion, Block on ring

## 1. บทนำ

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทก เจือต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่างๆ การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ UHMWPE ในช่วงที่ผ่านมา เน้นไปที่การศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอเป็นหลัก เนื่องจาก UHMWPE ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสี รองรับการเสียดทานสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลและทางด้านทางการแพทย์ [1] การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เฟือง เกียร์ แบริ่ง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร รวมทั้งการนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหินและพื้นกระบะ

รถบรรทุก เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้าน การแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ สำหรับงาน ศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ [1]

การขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัสดุก่อน UHMWPE จะต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่สูงและเหมาะสม เนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดสูง และไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จากเหตุผลนี้ทำให้ UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีต่างๆ ไปที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติก อาทิเช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดขึ้นรูปด้วยสกรู หรือการเป่าขึ้นรูป แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธี Compression molding และ Ram extrusion การขึ้นรูปนั้นจะต้องกระทำภายใต้สภาวะที่ อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสม จึงจะได้วัสดุหรือชิ้นส่วนที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน [2] แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำวัสดุหรือชิ้นส่วนมาใช้งาน จะต้องคำนึงถึงสมบัติของวัสดุนั้น ๆ เป็นสำคัญ การทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ทราบสมบัติทางด้าน ไทโรโบลีย์ ของพอลิเมอร์ได้ งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมา เกี่ยวกับ การศึกษาสมบัติ

ทางด้านโทรโพลีของพอลิเมอร์ เป็นการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอ พอลิเมอร์ ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Block on ring [3-5] เช่น การศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ PPESK ผสม  $TiO_2$  โดยวิธีการทดสอบแบบ Block-on-ring โดยแรงกระทำ 200 N ความเร็วของการเสียดสี 0.431 m/s [6] และการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ PEEK ผสม  $Al_2O_3$  โดยวิธีการทดสอบแบบ Block-on-ring โดยแรงกระทำ 196 N ความเร็วของการเสียดสี 0.42 m/s [7] เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์สภาวะของการอัดรีดขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติ ความต้านทานการสึกหรอ ของวัสดุก่อน UHMWPE จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion เปรียบเทียบกับขั้นตอนทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และเพื่อศึกษาวิเคราะห์สภาวะของการอัดรีดขึ้นรูป UHMWPE ที่เหมาะสมที่ให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอต่ำสุด

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุผง UHMWPE ที่ใช้ในการทดลองขึ้นรูปเป็นผง UHMWPE เกรด SLL-6-6020 มวลโมเลกุล (Molecular weight) เท่ากับ  $6.5 \times 10^6$  g/mol ขนาดอนุภาคเท่ากับ 80-100  $\mu m$  ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Corporation Limited ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

### 2.2 สภาวะของการทดลอง

สภาวะของการทดลองอัดรีดขึ้นรูป ทำการทดลองขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 150 และ 160 °C ความดัน 3 5 8 และ 10 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที โดยการนำผง UHMWPE ป้อนลงไป ในกระบอกอัด (Barrel) ของเครื่อง Ram extruder ที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งกระบอกอัดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วแแกนอัด (Ram) ดันอัดรีดผง UHMWPE ผ่านหัวตาย (Profile die head) ขนาดหน้าตัดเท่ากับ 10x20 mm<sup>2</sup> ดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากขึ้นทดสอบถูกอัดรีดผ่านหัวตาย จะถูกอัดรีดอย่างต่อเนื่องผ่านชุดตายเย็น (Profile Cooling Die ) ที่

มีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 °C อัตราการไหล 150 ลิตร/นาที



รูปที่ 1 เครื่อง Ram Extruder และการอัดรีดขึ้นรูป



รูปที่ 2 กระบอกอัด

รูปที่ 3 หัวตาย

### 2.3 การวิเคราะห์ตรวจสอบและทดสอบต่าง ๆ

การวิเคราะห์ตรวจสอบและทดสอบสมบัติต่าง ๆ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ตรวจสอบ เอกลักษณะทางเคมี โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล ซึ่งการวิเคราะห์ตรวจสอบเอกลักษณะทางเคมี ดำเนินการวิเคราะห์ตรวจสอบสเปกตรัมสัญญาณการสั่นของพีคต่างๆ ที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่อง Fourier transforms infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ตรวจสอบปริมาณความเป็นผลึกดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ยี่ห้อ Netzsch รุ่น 204 F1 โดยการหาวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับพลังงานความร้อนขณะหลอมละลาย ( enthalpy,  $\Delta H_{\text{endotherm}}$ ) ของขึ้นทดสอบเทียบกับ ค่า enthalpy มาตรฐานสำหรับวัสดุ UHMWPE ซึ่งมีค่า  $\Delta H = 291$  J/g น้ำหนักขึ้นทดสอบเท่ากับ 1-10 mg อัตราการให้ความร้อน 10 °C/min จากช่วง 20–160 °C หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาร้อยละของปริมาณความเป็นผลึก สำหรับในส่วนของค่าความหนาแน่นดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นความละเอียด 0.1 mg ยี่ห้อ AND รุ่น HR-200 การศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค ดำเนินการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP

สำหรับในส่วนการวิเคราะห์ทดสอบทางด้าน ไทโรโบโลยี ประกอบด้วย การทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอ และการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยดำเนินการการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชั้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชั้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 โดยกำหนดขนาดมิติของชั้นทดสอบเท่ากับ  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน  $0.2 \text{ }\mu\text{m}$  ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการ ไทโรโบโลยีอุตสาหกรรมการผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้ง กำหนดความเร็วของการเสียดทาน  $0.3 \text{ m/sec}$  แรงกดลงบนชั้นทดสอบ  $150 \text{ N}$  และทำการทดสอบด้วยระยะเวลา 180 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชั้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชั้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด  $0.1 \text{ mg}$  และนำค่า น้ำหนักที่สูญเสียของชั้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดขึ้นทดสอบและระยะทางทำการทดสอบ ดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$\text{Wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nm} \quad (1)$$

การดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ได้ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่อง Ball on disk tribometer (TRIBO technic, France) ของห้องปฏิบัติการ และกลุ่มงานวิจัย Physics of surface hardening ของ Institute of

Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS) เมือง Tomsk ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G99-95a and DIN 50324 โดยทำการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่นด้วยลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $3 \text{ mm}$  แรงกดลูกบอล  $5 \text{ N}$  และ ความเร็วของการเสียดสี  $0.3 \text{ m/sec}$

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

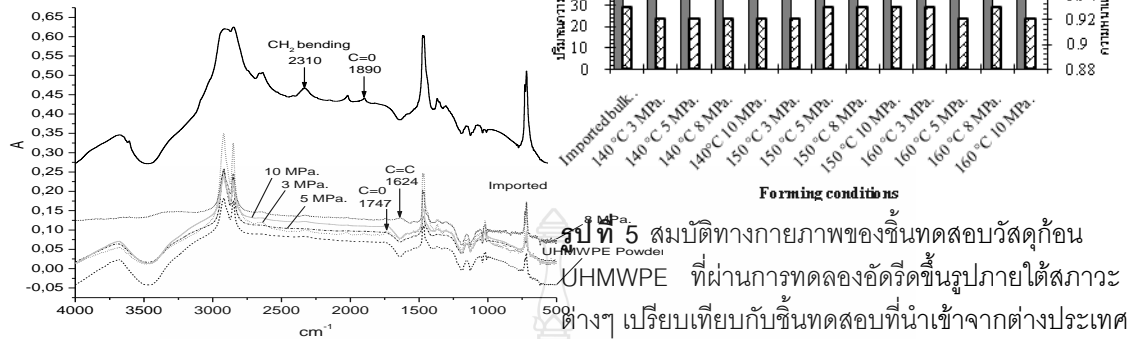
#### 3.1 เอกลักษณะทางเคมี

จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของชั้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process พบว่า ชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  ความดัน  $5$  และ  $10 \text{ MPa}$  และชั้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl ( $\text{C}=\text{O}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4 a) ที่แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุ ก่อน UHMWPE และมีผลทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง [8,9] สำหรับชั้นทดสอบอื่นๆ พบสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ( $-\text{CH}_2-$ ) หมู่ vinyl ( $\text{C}=\text{C}$ ) และ trans-vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-linking ในสายโซ่พอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 b) ซึ่งการเกิด Cross-linking ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [8-10]

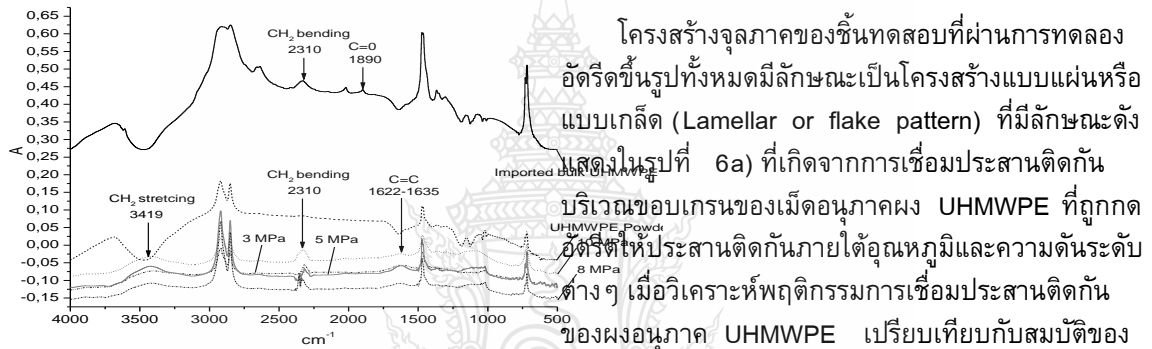
#### 3.2 สมบัติทางกายภาพ

ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ความหนาแน่น และโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบ พบว่า วัสดุ ก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  ความดัน  $10 \text{ MPa}$  มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ  $62.60 \%$  รองลงคือ สภาวะการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  ความดัน  $5 \text{ MPa}$  มีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ  $61.52 \%$  วัสดุ ก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ  $53.31 \%$  สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชั้นทดสอบทั้งหมดมีความ

หนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.92-0.93 g/cm<sup>3</sup>  
 ดังผลการวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 5



a) 140°C



b) 150°C



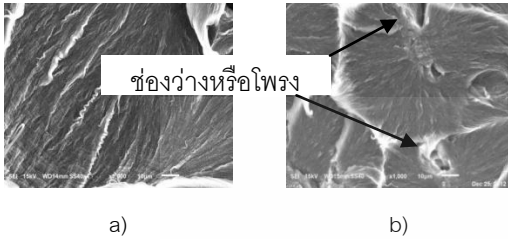
c) 160°C

รูปที่ 4 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ที่เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและของวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion ที่อุณหภูมิ a)140 b)150 และ c)160 ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที

รูปที่ 5 สมบัติทางกายภาพของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปทั้งหมดมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or flake pattern) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6a) ที่เกิดจากการเชื่อมประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ที่ถูกกดอัดรีดให้ประสานติดกันภายใต้อุณหภูมิและความดันระดับต่างๆ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเชื่อมประสานติดกันของผงอนุภาค UHMWPE เปรียบเทียบกับสมบัติของ UHMWPE ที่ไม่มีจุดไหลตัวและหลอมละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พบว่ามีลักษณะคล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดพลาสติก โดยหลังจากการแข็งตัวของแข็งผง UHMWPE จะยังคงรักษาสภาพการเป็นเม็ดอนุภาคภายในโครงสร้างเกรน [11-14] เนื่องจากกลไกที่ควบคุมการก่อตัวเป็นของแข็ง คือ การแพร่ของอะตอมที่เป็นเนื้อหลัก (self-diffusion) ในขณะที่สายโซ่โมเลกุล UHMWPE (หรือบางส่วนของสายโซ่) ของอนุภาคเกิดการแทรกตัวเข้าหากันในระดับโมเลกุล จลศาสตร์ของการแพร่บริเวณขอบเกรน เกิดจากการเชื่อมประสานของขอบเกรนบริเวณที่อยู่ติดกัน (ที่ความดันสูง) และความร้อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (ที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งส่งผลให้ขอบเกรนแพร่มีข้อจำกัด โดยการก่อตัวเป็นของแข็ง UHMWPE จะเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้โซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE สำหรับในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า มีลักษณะเป็นแผ่นหรือ

เกล็ดเช่นเดียวกัน แต่ขอบเกรนเกิดการเชื่อมประสานไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีช่องว่างหรือโพรงเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน ดังลักษณะเกรนที่แสดงในรูปที่ 6b)

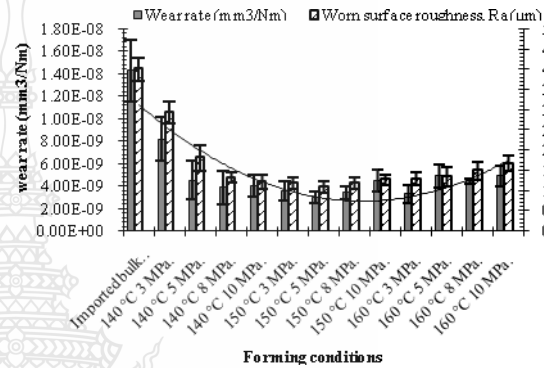


รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE a) ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปอุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที b) ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

### 3.3 สมบัติทางด้านโทรโพลี

จากการศึกษาวิเคราะห์ ทดสอบสมบัติทางด้านโทรโพลีด้วยเครื่องมือต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียดทานของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.12-0.14 โดยชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุดเท่ากับ 0.14 และนอกจากนี้ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศยังมีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่า ชิ้นทดสอบที่ได้ดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูป โดยมีค่าเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $4.00 \pm 0.29 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ สำหรับอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ได้ดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ มีค่าดังแสดงในรูปที่ 7 โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำสุด มีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $1.09 \pm 0.15 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa และชิ้น

ทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa ตามลำดับ จากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า สภาวะของการขึ้นรูปมีผลต่ออัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมีความสัมพันธ์กัน โดยชิ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน



รูปที่ 7 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

### 4. สรุปผลการทดลอง

#### 4.1. วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า มีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  ปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % และนอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ IR-spectrum พบพีดสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มี อัตราการสึกหรอสูง ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทดสอบเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 7

#### 4.2 วัสดุก้อน UHMWPE จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion

สมบัติความ อัตราการสึกหรอ ของวัสดุก้อน UHMWPE จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

และความดัน ภายใต้เวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE คือ สภาวะการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เนื่องจาก มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52%

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Mtec) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553 รหัสโครงการ MT-B-53-MAC-47-202-G

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Steven M. Kurtz. UHMWPE Biomaterials Handbook. China: Elsevier Inc.; 2009.
- [2] Lykins MD, Evans MA. A comparison of extruded and molded UHMWPE. *Trans 21st Soc Biomater* 1995;18:385.
- [3] Panin S.V., Ivanona L.R., Komeinko Piriayon S. Increasing wear resistance of UHMWPE by mechanical activation and chemical modification combined with addition of nanofiber. *Mesomechanics* 2009, Oxford, England. 2009
- [4] Q. Wang, J. Xu, W. Shen, W. Liu, An investigation of the friction and wear properties of nanometer Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> filled PEEK. *Wear*, 196 (1996) 82–86.
- [5] Q. Wang, Q. Xue, W. Shen, J. Zhang, The friction and wear properties of nanometer ZrO<sub>2</sub>-filled polyetheretherketone. *J. Appl. Polym. Sci.*, 69 135 (1998)–141
- [6] Z. Yang, B. Dong, Y. Huang, L. Liu, F.-Y. Yan, H.-L. Li, Enhanced wear resistance and micro-hardness of polystyrene nanocomposites by carbon nanotubes. *Mater. Chem. Phys.*,
- [7] H. B. Qiao, Q. Guo, A. G. Tian, G. L. Pan, L. B. Xu, A study on friction and wear characteristics of nanometer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PEEK composites under the dry sliding condition. *Tribol. Int.*, 105 (2007) 140–110
- [8] L. Costa, M.P. Luda, L. Trossarelli, E.M. Brach del Prever, M. Crova, and P. Gallinaro. Oxidation in orthopaedic UHMWPE sterilized by gamma-radiation and ethylene oxide, *Biomaterials*; 1998.
- [9] Stephen Spiegelberg. Analytical techniques for assessing the effect of radiation on UHMWPE, Cambridge polymer group, Inc, UK; 2001.
- [10] Nakanisi K. *Infrakrasnye spektry i stroenie organicheskikh soedinenii (Infrared Spectra and the Structure of Organic Compounds)*, Mir, Moscow; 1965.
- [11] Gul R. Improved UHMWPE for use in total joint replacement. Ph.D. Dissertation.: Massachusetts Institute of Technology; Boston, USA ;1997.
- [12] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra P.J. Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history. *Polymer* ;1990.
- [13] Farrar DF, Brain AA. The microstructure of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements. *Biomaterials* ;1997.
- [14] C.M. Pooley and D. Tabor, Friction and Molecular Structure: the Behaviour of some Thermoplastics, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*;1972.



นหินและพื้นกระเบื้องบรรทุก เป็นต้น สำห  
หรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์  
UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็น  
ส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ สำหรับงาน  
ศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ [1]

การขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัสดุก่อน UHMWPE  
จะต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิและ  
ความดันที่สูงและเหมาะสม เนื่องจาก UHMWPE  
มีความเหนียวสูง และไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูง  
กว่าจุดหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิด  
อื่นๆ ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จากเหตุผลนี้ทำให้  
UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วย  
กรรมวิธีทั่วๆ ไปที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติก  
 อาทิเช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดขึ้นรูปด้วยสกรู  
หรือการเป่าขึ้นรูป แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วย  
กรรมวิธี Compression molding และ Ram  
extrusion การขึ้นรูป นั้นจะต้องกระทำภายใต้  
สภาวะที่ อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสม  
จึงจะได้วัสดุหรือชิ้นส่วนที่มีสมบัติที่เหมาะสม  
สำหรับการใช้งาน [2] แต่อย่างไรก็ตามก่อนที่จะ  
นำวัสดุหรือชิ้นส่วนมาใช้งาน จะต้องคำนึงถึง  
สมบัติของวัสดุนั้นๆเป็นสำคัญ การทดสอบความ  
ต้านทานการสึกหรอเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้ทราบ  
สมบัติทางด้าน ไทโรโบโลยี ของพอลิเมอร์ได้  
งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านๆ มาเกี่ยวกับการศึกษา  
สมบัติทางด้าน ไทโรโบโลยี ของพอลิเมอร์ เป็น  
การศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอ พอลิ  
เมอร์ด้วยวิธีการทดสอบแบบ Block on ring [3-5]  
เช่น การศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอ  
ของ PPSK ผสม  $TiO_2$  โดยวิธีการทดสอบแบบ  
Block-on-ring โดยแรงกระทำ 200 N ความเร็ว  
ของการเสียดสี 0.431 m/s [6] และการศึกษา  
สมบัติความต้านทานการสึกหรอของ PEEK ผสม  
 $Al_2O_3$  โดยวิธีการทดสอบแบบ Block-on-ring  
โดยแรงกระทำ 196 N ความเร็วของการเสียดสี  
0.42 m/s [7] เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์  
สภาวะของการอัดรีดขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติ ความ  
ต้านทานการสึกหรอ ของวัสดุก่อน UHMWPE  
จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram

extrusion เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจาก  
ต่างประเทศ และเพื่อศึกษาวิเคราะห์สภาวะของการอัด  
รีดขึ้นรูป UHMWPE ที่เหมาะสมที่ให้สมบัติ ความ  
ต้านทานการสึกหรอต่ำสุด

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุผง UHMWPE ที่ใช้ในในการทดลองขึ้นรูปเป็น  
ผง UHMWPE เกรด SLL-6-6020 มวลโมเลกุล  
(Molecular weight) เท่ากับ  $6.5 \times 10^6$  g/mol ขนาด  
อนุภาคเท่ากับ 80-100  $\mu m$  ของบริษัท Luoyang  
Guorun Pipes Corporation Limited ประเทศสาธารณรัฐ  
ประชาชนจีน

### 2.2 สภาวะของการทดลอง

สภาวะของการทดลองอัดรีดขึ้นรูป ทำการทดลอง  
ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 150 และ 160 °C ความดัน 3 5 8  
และ 10 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที โดยการนำผง  
UHMWPE ป้อนลงไปในการบดอัด (Barrel) ของเครื่อง  
Ram extruder ที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งกระบอกอัดที่ใช้มี  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm. ที่มีลักษณะดังแสดงใน  
รูปที่ 2 แล้วแกนอัด (Ram) ดันอัดรีดผง UHMWPE ผ่าน  
หัวตาย (Profile die head) ขนาดหน้าตัดเท่ากับ 10 x20  
mm<sup>2</sup> ดังแสดงในรูปที่ 3 หลังจากชิ้นทดสอบถูกอัดรีดผ่าน  
หัวตาย จะถูกอัดรีดอย่างต่อเนื่องผ่านชุดตายเย็น (Profile  
Cooling Die) ที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 °C  
อัตราการไหล 150 ลิตร/นาที



รูปที่ 1 เครื่อง Ram Extruder และการอัดรีดขึ้นรูป



รูปที่ 2 กระบอกอัด



รูปที่ 3 หัวตาย

### 2.3 การวิเคราะห์ตรวจสอบและทดสอบต่างๆ

การวิเคราะห์ตรวจสอบและทดสอบสมบัติต่างๆ  
ประกอบด้วย การวิเคราะห์ตรวจสอบ เอกลักษณะทางเคมี

โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล ซึ่งการวิเคราะห์ตรวจสอบเอกลักษณ์ทางเคมี ดำเนินการวิเคราะห์ตรวจสอบสเปกตรัมสัญญาณการสั่นของพีคต่างๆ ที่เกิดขึ้น ด้วยเครื่อง Fourier transforms infrared spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27

สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์ตรวจปริมาณความเป็นผลึกดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ยี่ห้อ Netzsch รุ่น 204 F1 โดยการหาวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับพลังงานความร้อนของหลอมละลาย (enthalpy,  $\Delta H_{\text{endotherm}}$ ) ของชั้นทดสอบเทียบกับ ค่า enthalpy มาตรฐานสำหรับวัสดุ UHMWPE ซึ่งมีค่า  $\Delta H = 291 \text{ J/g}$  น้ำหนักชั้นทดสอบเท่ากับ 1-10 mg อัตราการให้ความร้อน  $10 \text{ }^{\circ}\text{C/min}$  จากช่วง  $20\text{--}160 \text{ }^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาร้อยละของปริมาณความเป็นผลึก สำหรับในส่วนของค่าความหนาแน่น ดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหนาแน่นความละเอียด 0.1 mg ยี่ห้อ AND รุ่น HR-200 การศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดำเนินการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP

สำหรับในส่วนการวิเคราะห์ทดสอบทางด้านไทรโบโลยี ประกอบด้วย การทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอ และการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยดำเนินการการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชั้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชั้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 โดยกำหนดขนาดมิติของชั้นทดสอบเท่ากับ  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน  $0.2 \text{ }\mu\text{m}$  ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการ ไทรโบโลยีอุตสาหกรรมการ

ผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้ง กำหนดความเร็วของการเสียดทาน  $0.3 \text{ m/sec}$  แรงกดลงบนชั้นทดสอบ  $150 \text{ N}$  และทำการทดสอบด้วยระยะเวลา 180 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชั้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชั้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด  $0.1 \text{ mg}$  และนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชั้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอ (Wear rate) ในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อ น้ำหนักที่กดชั้นทดสอบและระยะทางทำการทดสอบ ดังสมการต่อไปนี้ [3]

$$\text{Wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nm} \quad (1)$$

การดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ได้ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่อง Ball on disk tribometer (TRIBO technic, France) ของห้องปฏิบัติการและกลุ่มงานวิจัย Physics of surface hardening ของ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS) เมือง Tomsk ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G99-95a and DIN 50324 โดยทำการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่นด้วยลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm แรงกดลูกบอล  $5 \text{ N}$  และ ความเร็วของการเสียดสี  $0.3 \text{ m/sec}$

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

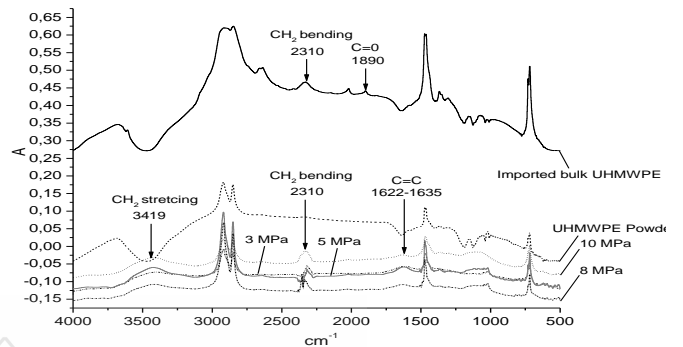
#### 3.1 เอกลักษณ์ทางเคมี

จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของชั้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process พบว่า ชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ  $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ความดัน  $5$  และ  $10 \text{ MPa}$  และชั้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl ( $\text{C}=\text{O}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4 a) ที่แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุ

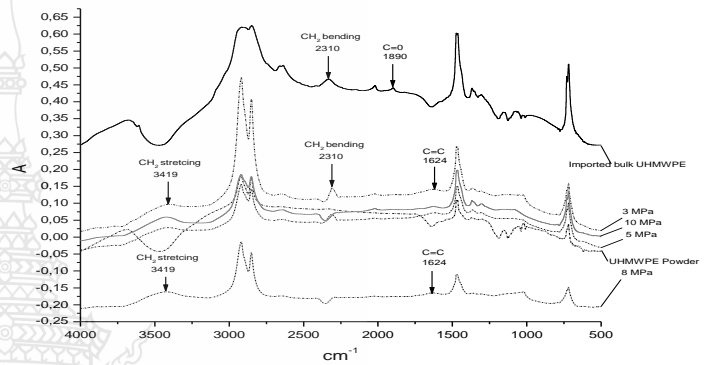
ก่อน UHMWPE และมีผลทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง [ 8,9] สำหรับชั้นทดสอบอื่นๆ พบสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene (-CH<sub>2</sub>-) หมู่ vinyl (C=C) และ trans-vinylene (-R<sup>1</sup>CH=CHR<sup>2</sup>-) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-linking ในสายโซ่พอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 b) ซึ่งการเกิด Cross-linking ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [8-10]

### 3.2 สมบัติทางกายภาพ

ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ความหนาแน่น และโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบ พบว่า วัสดุ ก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 °C ความดัน 10 MPa มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 62.60 % รองลงคือ สภาวะการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa มีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52 % วัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชั้นทดสอบทั้งหมดมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.92-0.93 g/cm<sup>3</sup> ดังผลการวิเคราะห์ทดสอบที่แสดงในรูปที่ 5

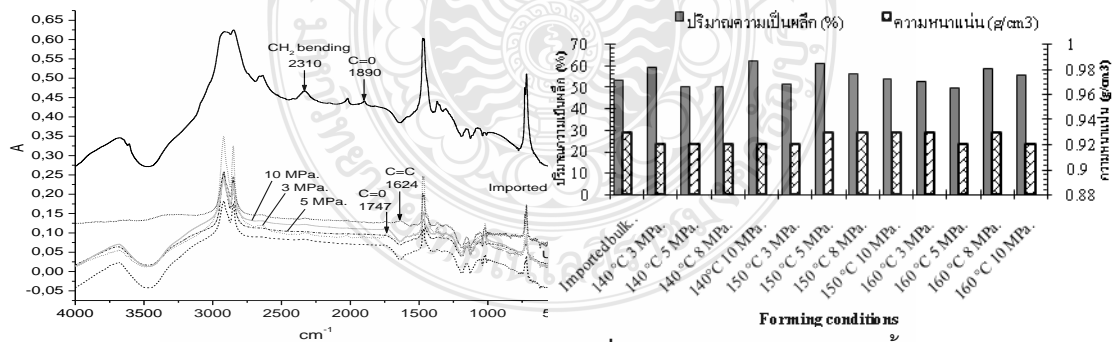


b) 150°C



c) 160°C

รูปที่ 4 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและของวัสดุก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion ที่อุณหภูมิ a)140 b)150 และ c)160 ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที

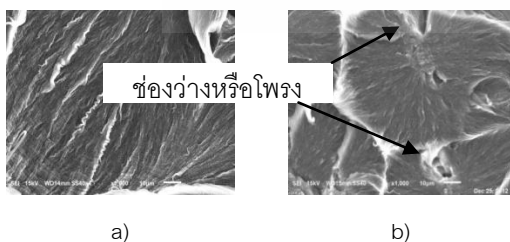


a) 140°C

รูปที่ 5 สมบัติทางกายภาพของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปทั้งหมดมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or flake pattern) ที่มีลักษณะดัง

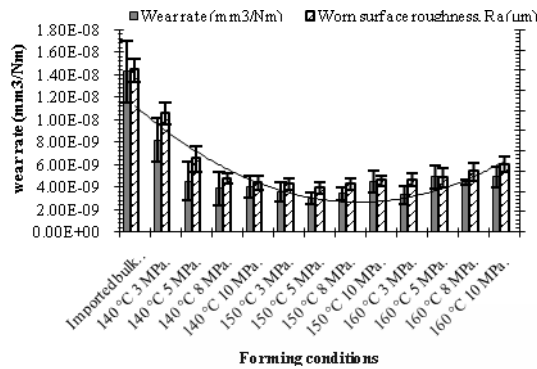
แสดงในรูปที่ 6a) ที่เกิดจากการเชื่อมประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ที่ถูกกดอัดรีดให้ประสานติดกันภายใต้ อุณหภูมิและความดันระดับต่างๆ เมื่อวิเคราะห์ พฤติกรรมการเชื่อมประสานติดกันของผงอนุภาค UHMWPE เปรียบเทียบกับสมบัติของ UHMWPE ที่ไม่มีจุดไหลตัวและหลอมละลายผสมเป็นเนื้อ เดียวกันเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พบว่า มีลักษณะคล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดสาธู โดยหลังจากการแข็งตัวเป็นของแข็งผง UHMWPE จะยังคงรักษาสภาพการเป็นเม็ดอนุภาคภายในโครงสร้างเกรน [11-14] เนื่องจากกลไกที่ควบคุมการก่อตัวเป็นของแข็ง คือ การแพร่ของอะตอมที่เป็นเนื้อหลัก ( self-diffusion) ในขณะที่สายโซ่โมเลกุล UHMWPE (หรือบางส่วนของสายโซ่) ของอนุภาคเกิดการแทรกตัวเข้าหากันในระดับโมเลกุล จลศาสตร์ของการแพร่บริเวณขอบเกรน เกิดจากการเชื่อมประสานของขอบเกรนบริเวณที่อยู่ติดกัน (ที่ความดันสูง) และความร้อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (ที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งส่งผลให้ ขบวนการแพร่มีข้อจำกัด โดยการก่อตัวเป็นของแข็ง UHMWPE จะเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้โซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE สำหรับในส่วนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบอัดรีดขึ้นรูป UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า มีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด เช่นเดียวกัน แต่ขอบเกรนเกิดการเชื่อมประสานไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีช่องว่างหรือโพรงเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรน ดังลักษณะเกรนที่แสดงในรูปที่ 6b)



**รูปที่ 6** แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบอัดรีดขึ้นรูป UHMWPE a) ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปอุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที b) ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

### 3.3 สมบัติทางด้านโทรโพลี

จากการศึกษาวิเคราะห์ ทดสอบสมบัติทางด้านโทรโพลีด้วยเครื่องมือต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ ความเสียหายของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.12-0.14 โดยชิ้นทดสอบอัดรีดขึ้นรูป UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย สูงสุดเท่ากับ 0.14 และนอกจากนี้ชิ้นทดสอบอัดรีดขึ้นรูป UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศยังมีอัตราการสึกหรอ และความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ได้ดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูป โดยมีค่าเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $4.00 \pm 0.29 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ สำหรับอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิว รอยสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ได้ดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ มีค่าดังแสดงใน รูปที่ 7 โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำสุด มีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $1.09 \pm 0.15 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa และชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa ตามลำดับ จากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้ แสดงให้เห็นว่า สภาวะของการขึ้นรูปมีผลต่ออัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอ และความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมีความสัมพันธ์กัน โดยชิ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน



รูปที่ 7 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิว รอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

#### 4. สรุปผลการทดลอง

##### 4.1. วัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

วัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า มีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9}$  mm<sup>3</sup>/Nm ปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % และนอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ IR-spectrum พบ พีคสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มี อัตราการสึกหรอสูง ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทดสอบเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 7

##### 4.2 วัสดุก่อน UHMWPE จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion

สมบัติความ อัตราการสึกหรอ ของวัสดุก่อน UHMWPE จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน ภายใต้เวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปวัสดุก่อน UHMWPE คือ สภาวะการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความ

ดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เนื่องจาก มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52%

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (Mtec) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2553 รหัสโครงการ MT-B-53-MAC-47-202-G

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Steven M. Kurtz. UHMWPE Biomaterials Handbook. China: Elsevier Inc.; 2009.
- [2] Lykins MD, Evans MA. A comparison of extruded and molded UHMWPE. Trans 21st Soc Biomater 1995;18:385.
- [3] Panin S.V., Ivanona L.R., Komeinko Piriyaon S. Increasing wear resistance of UHMWPE by mechanical activation and chemical modification combined with addition of nanofiber. Mesomechanics 2009, Oxford, England. 2009
- [4] Q. Wang, J. Xu, W. Shen, W. Liu, An investigation of the friction and wear properties of nanometer Si3N4 filled PEEK. Wear, 196 (1996) 82–86.
- [5] Q. Wang, Q. Xue, W. Shen, J. Zhang, The friction and wear properties of nanometer ZrO-2filled polyetheretherketone. J. Appl. Polym. Sci., 69 135 (1998)–141
- [6] Z. Yang, B. Dong, Y. Huang, L. Liu, F.-Y. Yan, H.-L. Li, Enhanced wear resistance and micro-

hardness of polystyrene nanocomposites  
by carbon nanotubes. Mater. Chem.  
Phys.,

- [7] .H. B. Qiao, Q. Guo, A. G. Tian, G. L. Pan, L. B. Xu, A study on friction and wear characteristics of nanometer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PEEK composites under the dry sliding condition. Tribol. Int., (2007) 140 105–110
- [8] L. Costa, M.P. Luda, L. Trossarelli, E.M. Brach del Prever, M. Crova, and P. Gallinaro. Oxidation in orthopaedic UHMWPE sterilized by gamma-radiation and ethylene oxide, Biomaterials; 1998.
- [9] Stephen Spiegelberg. Analytical techniques for assessing the effect of radiation on UHMWPE, Cambridge polymer group, Inc, UK; 2001.
- [10] Nakanisi K. Infrakrasnye spektry i stroenie organicheskikh soedinenii (Infrared Spectra and the Structure of Organic Compounds), Mir, Moscow; 1965.
- [11] Gul R.Improved UHMWPE for use in total joint replacement. Ph.D. Dissertation.: Massachusetts Institute of Technology; Boston,USA ;1997.
- [12] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra PJ. Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history. Polymer ;1990.
- [13] Farrar DF, Brain AA. The microstructure of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements. Biomaterials ;1997.
- [14] C.M. Pooley and D. Tabor, Friction and Molecular Structure: the Behaviour of some Thermoplastics, Proc. Roy. Soc., London, Series A;1972.

## ประวัติผู้เขียน

**ชื่อ-สกุล** นายสุรศักดิ์ มะธิโตปะน้า  
**วัน เดือน ปีเกิด** 29 กรกฎาคม 2526  
**ที่อยู่** 96/11 หมู่ 5 ตำบลหนองระเวียง อำเภอพิมาย  
จังหวัดนครราชสีมา 30110  
**การศึกษา** ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
พ.ศ. 2549 สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล  
อีสาน นครราชสีมา  
**ประสบการณ์การทำงาน**  
พ.ศ. 2553 - ปัจจุบัน อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลอีสาน นครราชสีมา  
**เบอร์โทรศัพท์** 085-7713374  
**อีเมลล์** Surasak\_d@hotmail.com

