

อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของ
วัสดุ UHMWPE โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน

AN INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON MECHANICAL
PROPERTIES AND WEAR RESISTANCE IN HOT COMPRESSION
MOLDING PROCESS FOR UHMWPE

วิโรจน์ นัทรเกษ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

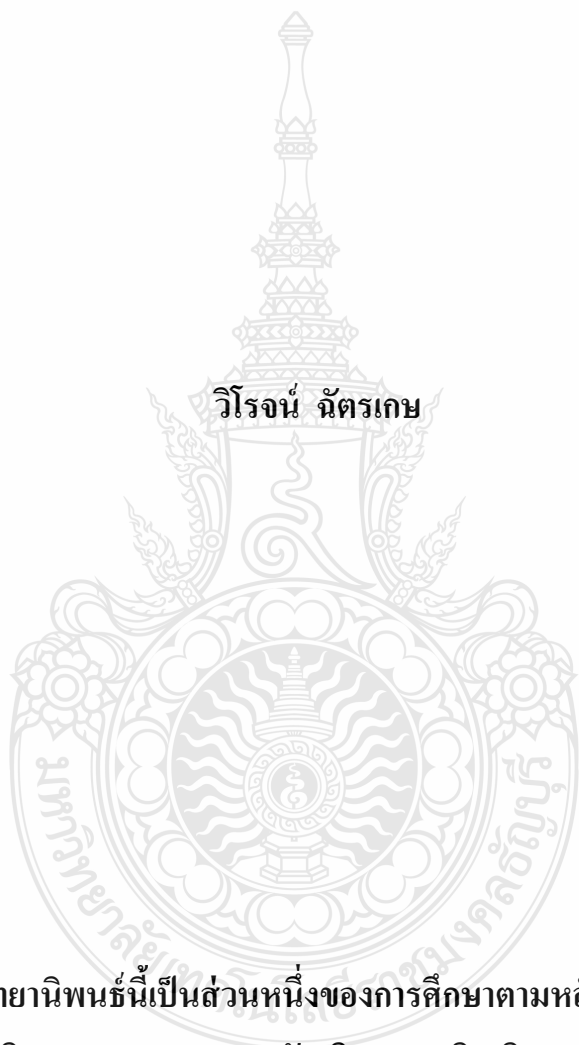
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอ
ของวัสดุ UHMWPE โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน
ชื่อ - นามสกุล	นายวิโรจน์ ฉัตรเกษ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

ผงพอลิเมอร์ UHMWPE บริสุทธิ์เป็นวัสดุที่ยากต่อการขึ้นรูปด้วยวิธีการเป่าขึ้นรูป หรือการฉีดขึ้นรูป เนื่องจากสมบัติของชนิดนี้ที่แสดงค่ามวลโมเลกุลต่ำ ความหนืดสูง และไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการหาสภาวะอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาดงอุณหภูมิ ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปร้อนผงพอลิเมอร์ UHMWPE และศึกษาอิทธิพลตัวแปรการอัดขึ้นรูปร้อนที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ UHMWPE

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ ผงพอลิเมอร์ UHMWPE บริสุทธิ์ เกรด SLL - 6 - 6020 ผงวัสดุถูกนำมาทำการอัดขึ้นรูปร้อนให้เป็นแผ่นขนาดกว้าง 160 มม. ยาว 80 มม. และหนา 10 มม. ตัวแปรการอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 - 210 °C แรงดัน 5 - 20 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 - 90 นาที และนำวัสดุที่ผ่านการขึ้นรูป มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมี จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้ ไปทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

จากการทดสอบพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดขึ้นรูปร้อนวัสดุ UHMWPE คือต้องใช้ อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 นาที วัสดุที่จากการขึ้นรูปจะมีอัตราการยืดตัวสูงสุด 460.49 % และอัตราการสึกหรอต่ำสุด 6.62×10^{-8} mm³/Nm เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแผ่น UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบว่า วัสดุทดลองแสดงค่าความเค้นแรงดึงสูงกว่าและอัตราการสึกหรอต่ำกว่า ซึ่งผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค แสดงให้เห็นว่าการเกิดเชื่อมโยงในสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลทำให้อนุภาค UHMWPE มีการเกาะยึดติดกันได้สมบูรณ์ดี

คำสำคัญ : UHMWPE สมบัติทางกล ความต้านทานการสึกหรอ อัดขึ้นรูปร้อน

Thesis Title	An Influence of Process Parameters on Mechanical Properties and Wear Resistance in Hot Compression Molding Process for UHMWPE
Name - Surname	Mr. Wirot Chudget
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Sirichai Tonsakul, Dr.-Ing.
Academic Year	2014

ABSTRACT

Pure Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE) powder is one of the material known as low formability in conjunction with blow forming and injection process due to its properties that has low molecular mass and high viscosity as well as non-flowable materials when the process temperature goes beyond melting point. Therefore, this research aims to develop the forming process which suitable for the UHMWPE material. It is also to study the parameters which dominate over the mechanical properties of UHMWPE's products.

The experimental was conducted by using pure UHMWPE powder, SLL - 6 - 6020 material. A compression molding process was used to produce a rectangular plate sized 160 x 80 x 10 millimeters. The process parameters such as temperature, pressure and holding interval were carried out by altering between 170 - 210 °C, 5 - 20 MPa and 30 - 90 minutes respectively. The formed plate were tested to investigate their physical mechanical and chemical properties. The tested results were compared with the commercial UHMWPE.

The experimental result shows that the optimal process parameters were the temperature of 190 °C, the pressure of 20 MPa and holding interval of 30 minutes. The formed plate had the highest elongation of 460.49 %, but has the lowest wear rate of $6.62 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. These properties were better than the properties of the commercial UHMWPE. The chemical and physical tests shows that the experimental products have more completion of connection in polymeric chain, as the result, ultimate tensile strength and wear rate properties were improved.

Keywords : UHMWPE, mechanical properties, wear resistance, hot compression molding

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยจากความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ชัยยะ ประณีตพลกรัง ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ คณะกรรมการสอบและ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาลดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ขอขอบคุณบุคลากร-คณาจารย์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์และสาขาวิศวกรรมเคมี ที่สนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ-คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะวิชาการจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

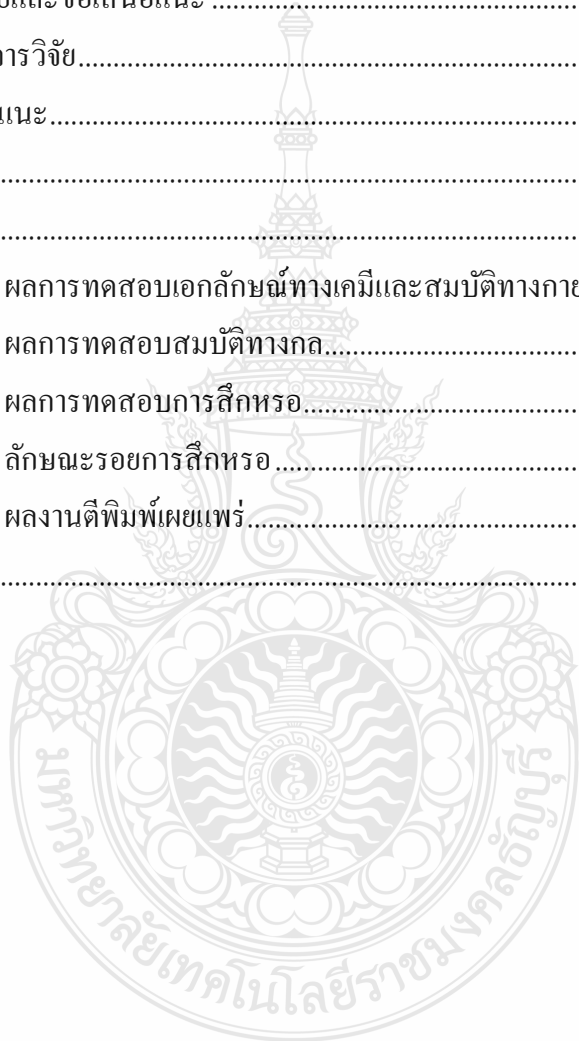
วิโรจน์ นัทรเกษ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความเข้าใจพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์.....	4
2.2 Ultra High Molecular Weight Polyethylene.....	11
2.3 กระบวนการขึ้นรูปก้อนวัสดุ UHMWPE.....	12
2.4 สมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์.....	13
2.5 สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์.....	14
2.6 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์.....	18
2.7 กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์.....	19
2.8 วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	25
3.2 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปร้อน.....	26
3.3 การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์.....	28
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี	40
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล.....	49
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกลไกการสึกหรอ	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	60
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ	66
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบสมบัติทางกล.....	73
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบการสึกหรอ.....	78
ภาคผนวก ง ลักษณะรอยการสึกหรอ.....	84
ภาคผนวก จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	114



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของ HDPE กับ UHMWPE.....	6
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	26
ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของ ชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ.....	44
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของแผ่นชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบ ที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	50



สารบัญรูป

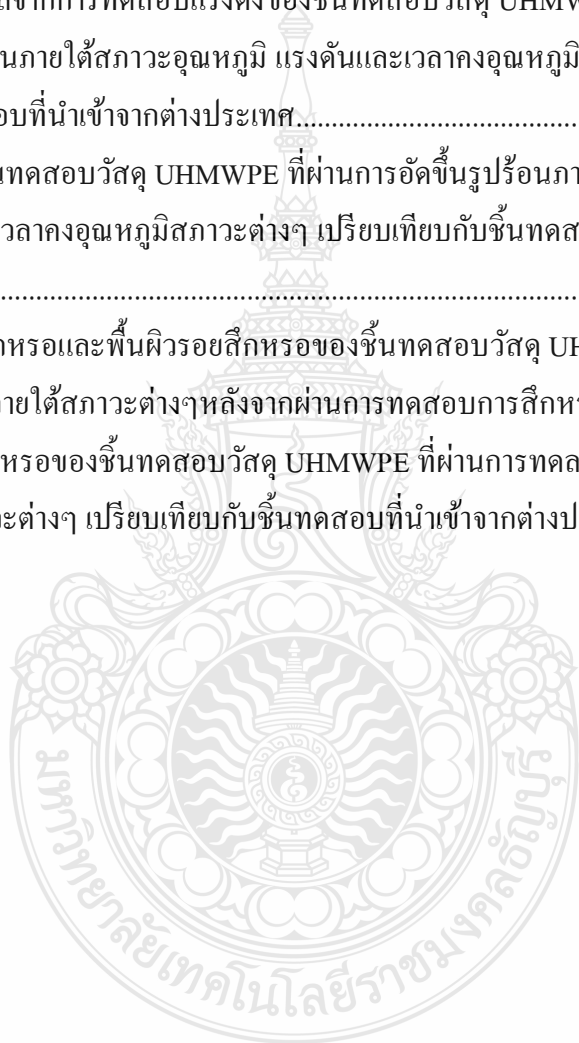
	หน้า
รูปที่ 2.1 ก) แผนภาพโครงสร้างโฮโมโพลีเมอร์และโคโพลีเมอร์ ข) แผนภาพโครงสร้างเชิงเส้นและแบบมีกิ่งก้านหรือสาขา.....	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโพลีเอทิลีน	5
รูปที่ 2.3 อัตราการสึกหรอของ UHMWPE และ HDPE ที่เปรียบเทียบจากการทดลองจำลองลักษณะของกระดูกสะโพก	7
รูปที่ 2.4 แผนภาพโครงสร้างทางเคมีเอทิลีนและโพลีเอทิลีน	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคจาก TEM ของ UHMWPE ซึ่งแสดงขอบเขตที่เป็นอสัณฐานและเป็นผลึก.....	9
รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ของวัสดุ UHMWPE.....	10
รูปที่ 2.7 กระบะรถบรรทุกที่บุหรือปูพื้นด้วย UHMWPE เป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้พลาสติกในอุตสาหกรรม.....	12
รูปที่ 2.8 แผนภาพหลักการเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Press) สำหรับการผลิตแผ่น UHMWPE	13
รูปที่ 2.9 เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ทางเคมี.....	14
รูปที่ 2.10 เครื่องทดสอบ DSC.....	15
รูปที่ 2.11 กราฟการวิเคราะห์ทางความร้อนของชิ้นทดสอบ UHMWPE- GUR 1050 Powder.....	16
รูปที่ 2.12 ก) ลักษณะรูปร่างผง UHMWPE ที่ได้จากการ SEM ข) ลักษณะพื้นผิวการแตกหักของก้อนชิ้นทดสอบ UHMWPE.....	17
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของคูโรมิเตอร์ (ก) Shore A และ(ข) Shore D.....	18
รูปที่ 2.14 ก) ลักษณะชิ้นทดสอบ ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....	19
รูปที่ 2.15 แผนภาพหลักการทดสอบการสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM G77.....	20
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน.....	24
รูปที่ 3.2 ผงวัสดุ UHMWPE เกรด SLL - 6 - 6020	25
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน	25
รูปที่ 3.4 กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน	27
รูปที่ 3.5 ลักษณะแผ่นชิ้นทดลองวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน	28
รูปที่ 3.6 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน.....	28

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 เครื่องอัดขึ้นรูป ยี่ห้อ Lab Tech Engineering.....	29
รูปที่ 3.8 เครื่องฟูลเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Frontier....	29
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบ โครงสร้างจุลภาค	30
รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510.....	31
รูปที่ 3.11 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบทางความร้อน	31
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี ยี่ห้อ Perkin Elmer DSC 7	32
รูปที่ 3.13 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นทดสอบพอลิเมอร์	33
รูปที่ 3.14 การทดสอบค่าความแข็ง.....	34
รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบสำหรับแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I.....	35
รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะการจับยึดชิ้นทดสอบ.....	36
รูปที่ 3.17 ลักษณะการฉีกขาดของชิ้นทดสอบ	36
รูปที่ 3.18 การเตรียมชิ้นทดสอบการสึกหรอ	37
รูปที่ 3.19 การทดสอบการสึกหรอ.....	38
รูปที่ 3.20 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ AND รุ่น HR-200.....	38
รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการวิเคราะห์การสึกหรอ (Dino-Lite Digital Microscope)	39
รูปที่ 3.22 แสดงตัวอย่างลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบ	39
รูปที่ 4.1 IR spectrum: ก) ผง UHMWPE บริสุทธิ์ ข) แผ่นวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจาก ต่างประเทศ.....	42
รูปที่ 4.2 เอกลักษณะทางเคมีของแผ่นชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 170 °C แรงดันระดับต่างๆและเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับ ชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	43
รูปที่ 4.3 เอกลักษณะทางเคมีของแผ่นชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 190 °C แรงดันระดับต่างๆและเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับ ชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	43
รูปที่ 4.4 เอกลักษณะทางเคมีของแผ่นชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 210 °C แรงดันระดับต่างๆและเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับ	

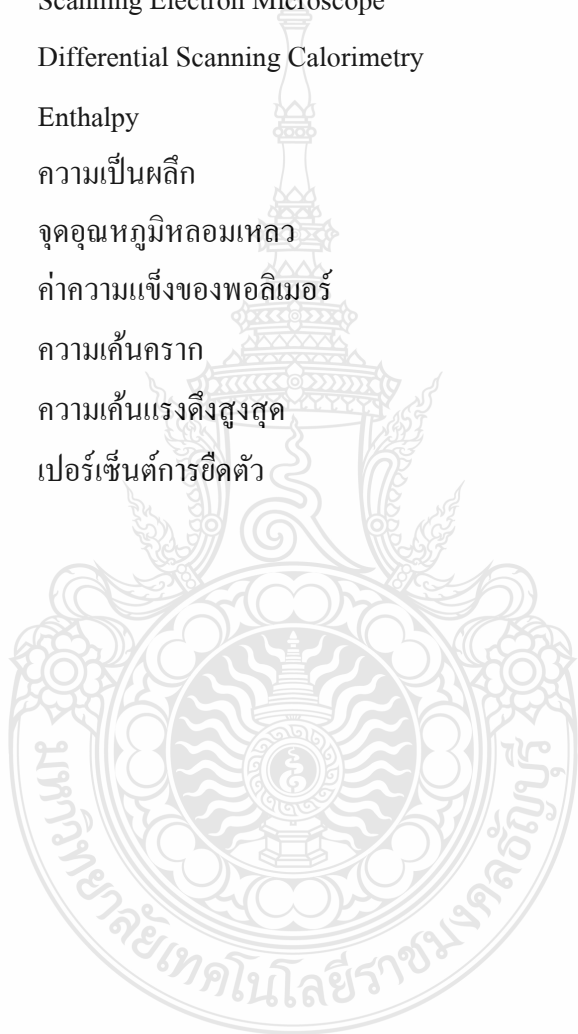
สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
ชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	44
รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับแผ่นชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	51
รูปที่ 4.6 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการ อัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิ 90 นาที เปรียบเทียบ กับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	53
รูปที่ 4.7 ความแข็งชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิ สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจาก ต่างประเทศ.....	54
รูปที่ 4.8 แสดงรอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัด ขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ	55
รูปที่ 4.9 อัตราการสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ.....	58



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene
Hot Compression Mold	การอัดขึ้นรูปร้อน
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
SEM	Scanning Electron Microscope
DSC	Differential Scanning Calorimetry
$\Delta H_{\text{endotherm}}$	Enthalpy
Crystalline	ความเป็นผลึก
T_m	จุดอุณหภูมิหลอมเหลว
Shore D	ค่าความแข็งของพอลิเมอร์
σ_Y	ความเค้นคราก
σ_{UTS}	ความเค้นแรงดึงสูงสุด
(%E)	เปอร์เซ็นต์การยืดตัว



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้วัสดุพอลิเมอร์ในชีวิตประจำวันและงานทางวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ สามารถพบได้จากผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทต่างๆที่ใช้ในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น ภาชนะบรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ งานสิ่งทอ การต่อเรือและทางการแพทย์ ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์นั้นมีสารประกอบไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นธาตุหลัก ยึดเกาะกันด้วยพันธะทางเคมี ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน [1] โดยผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้นสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติง ซึ่งเทอร์โมพลาสติกนั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่เทอร์โมเซตติงนั้น เมื่อผ่านการผลิตเป็นชิ้นงานแล้วจะไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [1]

ซึ่งได้มีการค้นคว้า วิจัยและพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกของพอลิเอทิลีน โดยมีชื่อเรียกว่า Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์เกรดนี้มีจุดเด่น คือ มีความต้านทานการสึกหรอ ทนต่อแรงกระแทก การกัดกร่อน ความลื่นไหลดี น้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นของโมเลกุลสูง [1-4] ซึ่งเหมาะสมกับงานทางวิศวกรรม โดยสามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปร้อนหรือรีดอัดขึ้นรูป (Hot Compression Molding or Ram Extrusion Process) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดังอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากวัสดุ UHMWPE มีความหนืดสูงและไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีทั่วไป อาทิเช่น การเป่าขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูปหรือการอัดรีดขึ้นรูปด้วยสกรู [3] ซึ่งในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ของวัสดุ UHMWPE ส่วนใหญ่ ยังต้องอาศัยการนำเข้าจากต่างประเทศ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตได้และยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อน อาทิเช่น สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดังอุณหภูมิในการขึ้นรูป หากมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับสิ่งเหล่านี้ อาจทำให้ได้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของการขึ้นรูปที่เป็นประโยชน์ต่อการผลิตแผ่นวัสดุ UHMWPE เพื่อเป็นแนวทางในสายการผลิตเชิงพาณิชย์ ซึ่งส่งผลดีกับอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ภายในประเทศเป็นอย่างมาก

ดังนั้นผู้วิจัยมีความประสงค์ที่จะทำการศึกษาระบบการอัดขึ้นรูปร้อนแผ่นวัสดุ UHMWPE เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปและดำเนินการทดสอบสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ โดยต้องการสภาวะการขึ้น

รูปที่ให้ผลการทดสอบสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการเลือกสถานะในการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งมีตัวแปรที่สามารถควบคุมได้อยู่ 3 ตัวแปร ประกอบด้วย สถานะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดังอุณหภูมิ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการผลิตและการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสถานะอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาดังอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นวัสดุ UHMWPE บริสุทธิ์ด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกลและการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE บริสุทธิ์และเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาอุณหภูมิและแรงดัน โดยกำหนดขอบเขตของโครงการตามรายละเอียดดังนี้

1) อุณหภูมิความร้อนที่ใช้ในการทดสอบอัดขึ้นรูปร้อนของวัสดุ UHMWPE อุณหภูมิที่ 170, 190, 210 °C

2) ระดับแรงดันที่ใช้อัดขึ้นรูปร้อนของวัสดุ UHMWPE อยู่ที่ 5, 10, 15, 20 MPa

3) เวลาดังอุณหภูมิในการอัดขึ้นรูปร้อนของวัสดุ UHMWPE อยู่ที่ 30, 60, 90 นาที

4) วัสดุ UHMWPE เกรด SLL-6-6020 ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Co., Ltd โดยกำหนดใช้ผง UHMWPE บริสุทธิ์ในการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน

1.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแผ่นขึ้นรูปทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย สมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและการสึกหรอ

- การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer)

- การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค DSC (Differential Scanning Calorimetry)

- การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

- การตรวจสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 1505

- การตรวจสอบค่าความแข็งของพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน ASTM D 2240-05
- การทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638-03 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic
- การทดสอบค่าความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีวงแหวน Block on Ring Testing ตามหลักการทดสอบ ASTM G77

1.4 สมมติฐานการวิจัย

เมื่อผงพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้รับอุณหภูมิความร้อนสูงกว่าจุดหลอมละลาย ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ไปมา และมีการบีบบังคับการเคลื่อนไหวภายใต้แรงกดอัดของแม่พิมพ์ โดยมีการคงอุณหภูมิไว้เพื่อปล่อยให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ แล้วการให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วด้วยการผ่านระบบหล่อเย็น เพื่อเป็นการปรับสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันและเวลาคงอุณหภูมิ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและการสึกหรอของแผ่นวัสดุ UHMWPE

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 การเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อนแผ่น UHMWPE และการวิเคราะห์ข้อมูลที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

1.5.2 สามารถเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานวัสดุ UHMWPE ได้ในงานอุตสาหกรรม

1.5.3 ผู้ทำวิจัยได้รับความรู้ในสาขาต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการวางแผน แก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน

1.5.4 ผู้ทำวิจัยได้รับความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนการทำงาน การเก็บข้อมูล หลักการวิเคราะห์ข้อมูล วิธีการสรุปผลการทดลองและหลักการนำเสนอผลงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเข้าใจพื้นฐานเบื้องต้นเกี่ยวกับพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยหลายๆ โมเลกุล (poly) ที่เรียกว่าเมอร์ (mer) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแต่ละเมอร์หรือที่เรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) ของพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบที่เหมือนกันเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจะเรียกว่า Homopolymer แต่ถ้าแต่ละส่วนหรือแต่ละโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันนั้นมีความแตกต่างกันจะเรียกว่า Copolymer ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก) โดยที่สัญลักษณ์ A, B คือ โมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน

โมโนเมอร์ของพอลิเมอร์สามารถที่จะจัดเรียงตัวกันเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ข) ซึ่งแนวโน้มของการเกิดการจัดเรียงตัวแบบกิ่งก้านสาขานี้ขึ้นอยู่กับ การควบคุมสภาวะของขบวนการสังเคราะห์ ดังนั้นสิ่งที่ควรจำและทำความเข้าใจก็คือ รูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก) และ 2.1 ข) ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างง่าย ๆ ของโครงสร้างพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น โคพอลิเมอร์มีความเป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างย่อยหรือ โมโนเมอร์ย่อยต่างชนิดกันตามชนิดธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไป แต่ในทางปฏิบัติในอุตสาหกรรมพอลิเอทิลีน รวมทั้ง UHMWPE จะเป็น โคพอลิเมอร์ที่เกิดร่วมกับโมโนเมอร์อื่นๆ (ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.1 ก) แผนภาพโครงสร้างโซโม่พอลิเมอร์และ โคพอลิเมอร์ ข) แผนภาพโครงสร้างเชิงเส้นและแบบมีกิ่งก้านหรือสาขา [3]

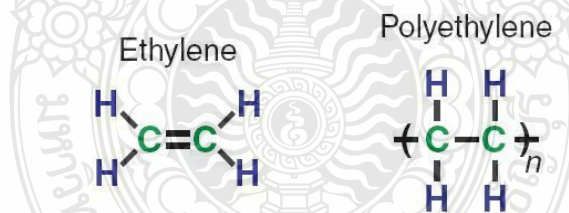
ในมาตรฐาน ISO 11542 ซึ่งเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสำหรับผลิตภัณฑ์ UHMWPE ระบุว่า “UHMWPE สามารถที่จะมีส่วนประกอบของโคพอลิเมอร์ได้มากถึง 50%” และยัง

ถือว่าเป็น UHMWPE แต่ในกรณีของ UHMWPE ที่จะนำมาใช้ฝังในร่างกายมนุษย์สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อนั้นจะต้องเป็นโฮโมโพลิเมอร์เท่านั้น

สมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัดของโพลิเมอร์ที่แตกต่างจากวัสดุอื่นๆ (เช่น โลหะชนิดต่างๆ และเซรามิก) คือ ขนาดโมเลกุล (Molecular size) ในกรณีที่เป็นโลหะผสมและเซรามิกองค์ประกอบย่อยที่เป็นส่วนประกอบคืออะตอมของธาตุโลหะชนิดต่างๆ (ตัวอย่างเช่น Co, Cr, Mo และอื่นๆ) หรืออาจจะเป็นพันธะโมเลกุลเล็กๆ เช่น Metal Carbides หรือ Oxides แต่สำหรับขนาดโมเลกุลของโพลิเมอร์อาจประกอบด้วยโมโนเมอร์หลายๆ ชนิดรวมกันมากกว่า 100,000 Monomer Units ที่ทำให้มวลโมเลกุล (Molecular Weights) สามารถปรับขนาดเพิ่มขึ้นเป็นล้านกรัมต่อโมล (10^6 กรัม/โมล) และนอกจากนี้รูปแบบการก่อตัวของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ย่อยๆ เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทำให้โพลิเมอร์มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.1.1 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ก่อตัวหรือสังเคราะห์จากแก๊ส Ethylene Monomer (C_2H_4) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28 สูตรเคมีโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีนคือ $-(C_2H_4)_n-$ โดยที่ n คือ Degree of Polymerization ซึ่งแผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีน (Ethylene) และพอลิเอทิลีน (Polyethylene) แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและพอลิเอทิลีน [3]

สำหรับ UHMWPE สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วย เอทิลีนมอนอเมอร์ประมาณ 200,000 หน่วยเรียงต่อกันซ้ำๆ หรือในอีกหนึ่งความหมาย สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE จะประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนมากถึง 400,000 อะตอม นอกจากนี้พอลิเอทิลีนยังสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด (LDPE, LLDPE, HDPE, UHMWPE) ตามขบวนการสังเคราะห์ ซึ่งพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดถูกสังเคราะห์ขึ้นมาด้วยขนาดของมวลโมเลกุลและรูปแบบการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ ภายในสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน สำหรับในส่วนของ LDPE and LLDPE จะหมายถึง Low-Density

Polyethylene และ Linear Low Density Polyethylene ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการจัดเรียงมอนอเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทีลีนเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นแบบกิ่งก้านสาขาและเป็นเส้นตรงตามลำดับ และนอกจากนี้มวลโมเลกุลของพอลิเอทีลีนแต่ละชนิดจะต่ำกว่า 50,000 กรัม/โมล

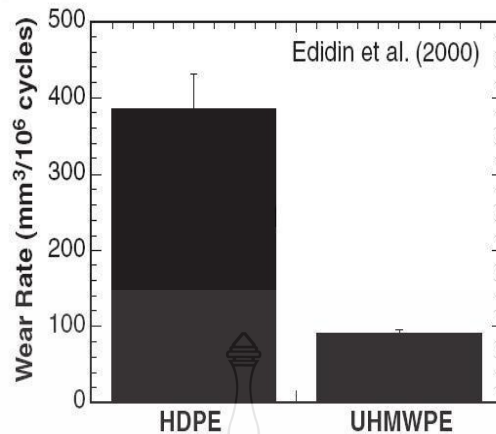
HDPE สายโซ่โมเลกุลจะเป็นเส้นตรงที่มีมวลโมเลกุลสูงถึง 200,000 กรัม/โมล สำหรับในส่วนของ UHMWPE เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทีลีนชนิดอื่นๆ พบว่า UHMWPE จะมีมวลโมเลกุลสูงประมาณ 6×10^6 กรัม/โมล แต่ในความเป็นจริงมวลโมเลกุลที่สูงมากๆ เช่นนี้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดาต่างๆ ไป แต่จะทำการวัดเปรียบเทียบกับอนุมานแทนด้วยค่า Intrinsic Viscosity (IV)

ในตารางที่ 2.1 เป็นตารางเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางกลของ HDPE และ UHMWPE ซึ่งแสดงให้เห็นว่า UHMWPE มีค่า Ultimate Strength และ Impact Strength สูงกว่า HDPE และนอกจากนี้ UHMWPE ยังมีสมบัติที่ดีทางด้าน Abrasion Resistant และ Wear Resistant สูงกว่า HDPE โดยอัตราการสึกหรอของ UHMWPE และ HDPE ที่ได้มีการศึกษารวบรวมเพื่อเปรียบเทียบและถือว่าเป็นข้อมูลที่ทันสมัยที่สุดที่ได้จากการทดลองจำลองลักษณะของกระดูกสะโพก (Edidin and Kurtz, 2000) พบว่าอัตราการสึกหรอ (The Volumetric Wear Rate) ของ HDPE สูงกว่า UHMWPE ประมาณ 4.3 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของ HDPE กับ UHMWPE [3]

Property	HDPE	UHMWPE
Molecular Weight (10^6 กรัม/โมล)	0.05-0.25	2-6
Melting Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	130-137	125-138
Poisson's Ratio	0.40	0.46
Specific Gravity	0.952-0.965	0.932-0.945
Tensile Modulus of Elasticity* (GPa)	0.4-4.0	0.8-1.6
Tensile Yield Strength* (MPa)	26-33	21-28
Tensile Ultimate Strength* (MPa)	22-31	39-48
Tensile Ultimate Elongation* (%)	10-1200	350-525
Impact Strength, Izod*(J/m of notch; 3.175 mm Thick Specimen)	21-214	>1070(No Break)
Degree of crystallinity (%)	60-80	39-75

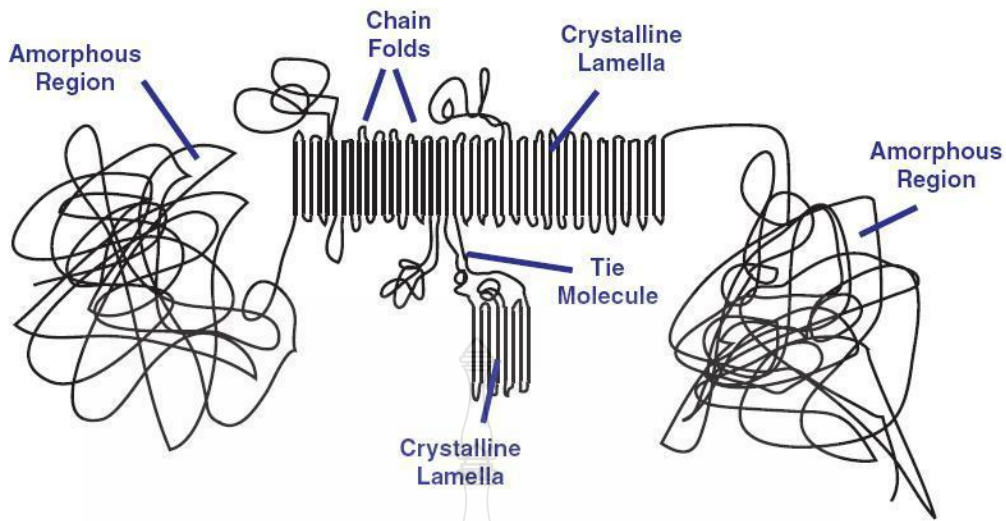
*การทดสอบภายใต้อุณหภูมิ $\leq 23^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.3 อัตราการสึกหรอของ UHMWPE และ HDPE ที่เปรียบเทียบจากการทดลองจำลองลักษณะของกระดูกสะโพก [3]

2.1.2 ความเป็นผลึก

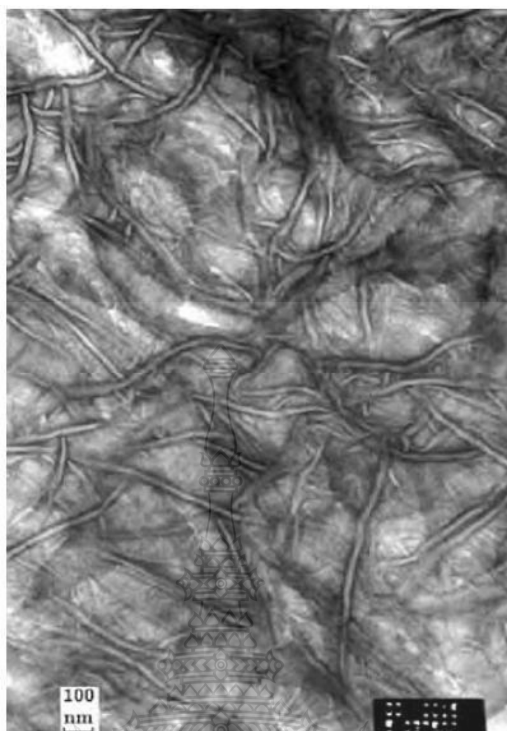
อีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถจินตนาการเห็นสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นเชือกหรือสายสร้อยที่พันกันยุ่งเหยิงคล้ายเส้นสปาเกตตี้ ซึ่งมีความยาวมากกว่าหนึ่งกิโลเมตร เนื่องจากสายโซ่จะไม่อยู่นิ่ง มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา และมีการดูดซับพลังงานความร้อนภายในตลอดเวลา ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE มีแนวโน้มที่จะมีการสับเปลี่ยนพันธะของ C-C และทำให้เกิดการพับสายโซ่การพับสายโซ่กลับไปกลับมาเช่นนี้ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Ordered) เฉพาะช่วงบริเวณที่มีการพับสายโซ่เป็นแผ่นนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและเรียกว่า Crystalline Lamella ซึ่งแผ่นลามลลาเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ในบริเวณที่เป็น Amorphous (Disordered) และสามารถที่จะเชื่อมต่อกับแผ่นลามลลาข้างเคียงได้ด้วย Tie Molecule ซึ่ง UHMWPE มีลักษณะรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภาพโครงสร้างทางเคมีเอทีลินและพอลิเอทีลิน [3]

Crystalline Lamella มีขนาดเล็กและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เนื่องจากผลึกแผ่นทำให้เกิดการหักเหแสงส่งผลให้ UHMWPE มีลักษณะเป็นสีขาว ขุ่นมัวที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูงเหนือจุดหลอมละลายของลามลลาประมาณ 137°C แสงสามารถผ่านแผ่นลามลลาของ UHMWPE ได้บ้างเล็กน้อย สำหรับลามลลาที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะมีขนาดความหนา 10-50 นาโนเมตร และความยาว 10-50 ไมโครเมตร (Kurtz et al. 1999) ระยะห่างระหว่างแผ่นลามลลาที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร (Bellare Schnablegger, and Cohen 1995)

รูปร่างผลึกของ UHMWPE สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงส่องผ่าน (TEM) ด้วยกำลังขยายสำหรับโพลิเมอร์ตั้งแต่ 16,000 เท่าขึ้นไป โดยการเตรียมชิ้นทดสอบ UHMWPE จะถูกตัดเป็นแผ่นบางๆ ที่เรียกว่า “Ultramicrotomed Slice” หลังจากนั้น Ultramicrotomed Slice ของ UHMWPE จะถูกนำไปย้อมสีด้วย Uranyl Acetate เพื่อปรับปรุงให้เห็นความแตกต่างในการทำ TEM ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งขบวนการย้อมสีทำให้บริเวณที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) กลายเป็นสีเทาในแผนภาพโครงสร้างจุลภาค สำหรับแผ่นลามลลา ซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจาก Uranyl Acetate ที่ทำให้เห็นความแตกต่างนั้น จะปรากฏเป็นเส้นสีขาวกับเส้นขอบสีดำจากภาพ TEM Micrograph ที่แสดงในรูปที่ 2.5 เป็นตัวอย่างองค์ประกอบตามธรรมชาติของ UHMWPE ที่เป็นการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นโครงข่ายของบริเวณที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานและผลึก (Crystalline)



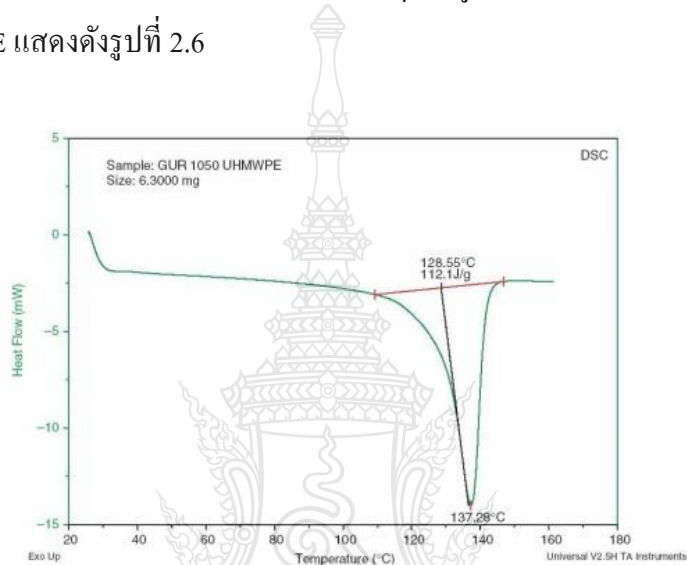
รูปที่ 2.5 โครงสร้างจุลภาคจาก TEM ของ UHMWPE ซึ่งแสดงขอบเขตที่เป็นอสัณฐานและเป็นผลึก [3]

2.1.3 การเปลี่ยนสถานะความร้อน

วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการจำแนกหรือทำให้เห็นความแตกต่างของลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ อุณหภูมิที่แตกต่างกันของสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เหล่านั้น ในที่นี้จะขอ ย้อนกล่าวไปถึงรูปแบบของสายโซ่โมเลกุล UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นเส้นสปายเก้ตตี้ที่ยาวและพันกัน ยู่เหย่งนั้น ทำให้สามารถจินตนาการได้ถึงารเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกลับไปกลับมา และเกิดการบิด งอเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน หรืออาจกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะต้อง เผชิญกับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน 3 ด้านหลักๆ คือ Glass Transition Temperature (T_g), Melting Point Temperature (T_m) และ Flow Temperature (T_f)

Glass Transition Temperature (T_g) คือ อุณหภูมิที่ต่ำที่สุดที่สายโซ่โมเลกุลของพอลิ เมอร์มีพฤติกรรมเปราะคล้ายกระจก ที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการ เปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนไม่เพียงพอที่จะเลื่อนผ่านสายโซ่อื่นได้และมีวิธีเดียวที่วัสดุจะ ตอบสนองต่อความเค้นทางกลคือ การยืดออกหรือแตกออกจากพันธะที่ประกอบกันเป็นสายโซ่ โมเลกุล ในกรณีของ UHMWPE, T_g จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่า T_g สายโซ่โพลิเมอร์บริเวณพื้นที่ที่เป็น Amorphous ภายในพอลิเมอร์จะเคลื่อนตัวได้มากขึ้น เมื่อใดที่อุณหภูมิของ UHMWPE เพิ่มขึ้นกว่า 60-90 °C ผลึกที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่เล็กกว่าผลึกในพอลิเมอร์จะเริ่มหลอมละลาย ซึ่งพฤติกรรมการหลอมละลายของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline Polymer) รวมทั้ง UHMWPE ถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดปริมาณของผลึกหรือที่เรียกว่าผลึก (Crystallinity) ด้วยการใช้ Differential Scanning Colorimeter (DSC) โดย DSC จะวัดปริมาณความร้อนจำเพาะที่จำเป็นต้องใช้ต่อการเพิ่มอุณหภูมิของพอลิเมอร์ ตัวอย่างของ DSC Data สำหรับ UHMWPE แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ของวัสดุ UHMWPE [3]

DSC Traces สำหรับ UHMWPE ประกอบด้วย 2 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งของเส้นโค้งเป็นจุดสูงสุดของอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 137 °C และสอดคล้องกับจุดที่เป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline Regions) ที่มีการหลอมละลาย ซึ่งอุณหภูมิหลอมละลายของ UHMWPE สะท้อนให้เห็นถึงความหนาของผลึกหรือความสมบูรณ์แบบของผลึก ความหนาแน่นและความสมบูรณ์ของผลึก UHMWPE ยิ่งมากมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิหลอมละลายสูงกว่าผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า

นอกจากนี้ บริเวณพื้นที่ด้านล่างภายใต้จุดหลอมละลายสูงสุด คือ สัดส่วนของความเป็นผลึกหรือปริมาณผลึกที่เรียกว่า Crystallinity นอกจากนี้ DSC ยังทำการวัดปริมาณพลังงานความร้อนสุทธิต่อหน่วยมวล (ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลง Enthalpy, ΔH) ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการหลอมละลายบริเวณที่เป็นผลึกภายในขั้นตอนสอบ โดยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง Enthalpy ของขั้นตอนสอบต่อความสมบูรณ์ของผลึก 100 % และคำนวณออกมาเป็นปริมาณผลึก สำหรับก้อน UHMWPE ส่วนใหญ่จะมีปริมาณผลึกประมาณ 50-55 %

ขณะที่อุณหภูมิของพอลิเมอร์ถึงผลึกถูกทำให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลาย พอลิเมอร์จะเกิดการไหลตัว (Flow Transition, T_f) และกลายเป็นของเหลว สำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า 500,000 กรัม/โมล สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมการไหลได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับ พอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า 500,000 กรัม/โมล สายโซ่โมเลกุลที่มีปริมาณมากกว่าและมีความซับซ้อนมากกว่าจะเป็นตัวป้องกันการไหล ส่งผลให้ UHMWPE ไม่แสดงพฤติกรรมการไหลหรืออาจกล่าวได้ว่า “ไม่มีจุดไหลตัว”

2.2 Ultra High Molecular Weight Polyethylene

UHMWPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทางฟิสิกส์และทางกลที่ดีชนิดหนึ่ง ที่มีความโดดเด่นที่สุดทางด้านความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี, ความลื่น, ด้านทานแรงกระแทกและด้านทานการสึกหรอจากการขัดสี ซึ่งสมบัติเหล่านี้ถูกค้นพบตั้งแต่ปี 1950 และถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ตัวอย่างเช่น ค้ำเข็มหรือกระสวยสำหรับเครื่องทอสิ่งทอต่างๆ ใช้เป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหินหรือพื้นกระบะรถบรรทุกดังแสดงในรูปที่ 2.7 และนอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ทำเป็นรังผึ้งหรือรางลำเลียงขวดในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ หรือใช้เป็นอุปกรณ์กันชนหรือวัสดุติดผนังกันชนสำหรับเรือและท่าเรือ จากตัวอย่างที่กล่าวมาทั้งหมด ประมาณร้อยละ 90 ของ UHMWPE ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม

นับตั้งแต่ปี 1962 เป็นต้นมา UHMWPE ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านสัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ โดยถูกใช้เป็นวัสดุหุ้มสัมผัสในข้อต่อเทียมต่างๆ ซึ่งในแต่ละปีทั่วโลกมีการผลิตและเปลี่ยนข้อต่อต่างๆ ประมาณ 1.4 ล้านชิ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม แม้ว่าการผ่าตัดเปลี่ยนข้อต่อต่างๆ เหล่านี้จะประสบความสำเร็จ แต่ก็ต้องมีการกลับมาเปลี่ยนใหม่เนื่องจาก UHMWPE ที่ฝังเข้าไปมีอายุการใช้งานจำกัด ซึ่งการสึกหรอและความเสียหายของชิ้นส่วน UHMWPE เป็นปัจจัยที่กำหนดหรือจำกัดอายุการใช้งาน

UHMWPE เป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบทางเคมีพื้นฐาน ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนเหมือนกับพอลิเอทิลีนทั่วไป ซึ่งพื้นฐานส่วนประกอบทางเคมีนี้ได้ทำให้เกิดความเข้าใจผิดเป็นอย่างมากในเรื่องของความซับซ้อนของการจัดเรียงโครงสร้างระดับโมเลกุลและโครงสร้างที่ใหญ่กว่าระดับโมเลกุล ในระดับโมเลกุลอะตอมของคาร์บอนสามารถที่จะบิดเป็นเกลียว, หมุนหรือพับเรียงตัวให้เป็นระเบียบภายใน Crystalline Regions ได้ แต่ในระดับที่ใหญ่กว่าโมเลกุลหรือที่เรียกว่า “Super Molecular Level” UHMWPE ซึ่งมีลักษณะเป็นผง (หรือที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือเรซิน หรือเกล็ดเล็กๆ (Flake)) และจะต้องถูกทำให้เป็นก้อนของแข็งด้วยอุณหภูมิและความดันสูงที่

เหมาะสม ดังนั้นระดับของความซับซ้อนของ Super Molecular Level แต่ละชั้นจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นภายใน UHMWPE จากขบวนการขึ้นรูปหรือการฉายรังสีเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เพิ่มความต้านทานการสึกหรอที่ผิวและทำให้ปราศจากเชื้อต่างๆ



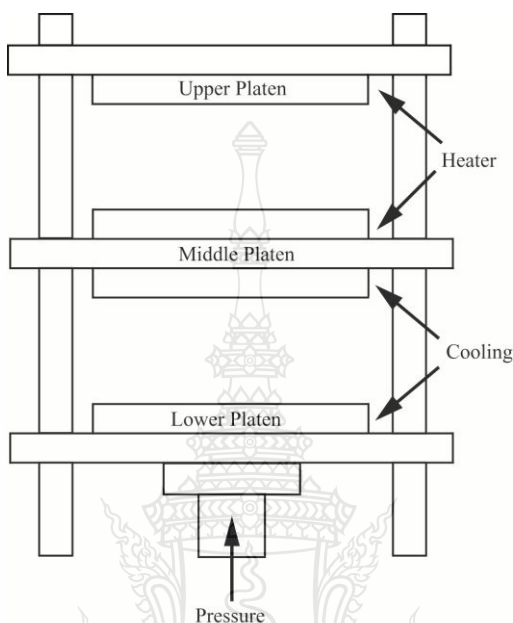
รูปที่ 2.7 กระบะบรรจรถูกที่บูหรือปูพื้นด้วย UHMWPE เป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้พลาสติกในอุตสาหกรรม [3]

2.3 กระบวนการขึ้นรูปก่อนวัสดุ UHMWPE

UHMWPE ที่ถูกผลิตขึ้นมาจากขบวนการ Polymerization นั้นมีลักษณะเป็นผง จะต้องถูกนำไปทำให้เป็นก้อนของแข็งภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม เนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดที่จุดหลอมละลายสูง (High Melt Viscosity) ดังนั้น UHMWPE จะไม่ไหลเหมือน Lower Molecular Weight Polyethylene เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย ด้วยเหตุผลนี้ กระบวนการผลิตต่างๆ ที่ใช้สำหรับการผลิตเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น Injection Molding, Screw Extrusion หรือ Blow Molding จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในทางปฏิบัติสำหรับ UHMWPE ดังนั้น กระบวนการผลิตสำหรับ UHMWPE จึงถูกแทนที่ด้วย Compression Molding และ Ram Extrusion [3]

สำหรับการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Compression Molding) เป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นงานพลาสติก ชนิดที่เป็นผง ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดขึ้นรูป ประกอบด้วยแท่นอัด (Plates) จำนวน 3 ชุด ซึ่งแท่นอัดส่วนที่อยู่ด้านล่าง (Lower Plates) และตรง

กลางสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ และแท่นอัดด้านบน(Upper Plates)จะถูกยึดติดกับที่ ซึ่งจะมีอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) จะติดอยู่ที่แท่นอัดด้านบนกับแท่นอัดตรงกลาง (Middle Plates) และระบบหล่อเย็น (Cooling) ต่อกับแท่นอัดส่วนด้านล่างกับแท่นตรงกลาง แสดงในรูปที่ 2.8 โดยใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปแผ่น (Sheet or Plate)



รูปที่ 2.8 แผนภาพหลักการเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding Press) สำหรับการผลิตแผ่น UHMWPE

2.4 สมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์

การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี ด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์ตรวจสอบสมบัติทางเคมีของ UHMWPE Powder เป็นวิธีการหนึ่งที่ต้องทำการตรวจสอบในระหว่างการผลิตเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่บางครั้งนักวิจัยก็มีความจำเป็นต้องทำการทดสอบความบริสุทธิ์และส่วนผสมของ UHMWPE Powder เป็นช่วงๆ เพื่อให้เกิดความมั่นใจสำหรับการนำไปใช้งาน ซึ่งมาตรฐาน ASTM 648 ได้วางแนวทางต่างๆ ไปที่สามารถนำไปใช้ได้สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของ UHMWPE Powder ที่ประกอบไปด้วย Trace Element Analysis และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการวัดโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) ของ UHMWPE ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้ง UHMWPE Powder และก้อนของแข็ง UHMWPE สำหรับในส่วนของ UHMWPE Powder จะทำการทดสอบโดยการใช้

Potassium Bromide (KBr) Pellet Technique การทำงานของเครื่อง FTIR จะมีกล้องจุลทรรศน์ติดมาด้วย ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการทดสอบโครงสร้างทางเคมีบนตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นทดสอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 การวิเคราะห์ทดสอบนี้ UHMWPE Powder จะถูกผสมรวมกับ KBr ในอัตราส่วน 1:20 หลังจากนั้นทำการอบแห้งเพื่อขจัดน้ำและความชื้นออกให้หมด จากนั้นของผสมระหว่าง UHMWPE Powder และ KBr จะถูกบดด้วยครกและเติมเข้าไปใน KBr Pellet Anvil ด้วยปริมาณที่พอเหมาะครอบคลุมฐานผิวของ Mold ทั้งหมดแล้วตามด้วยการกดอัดให้แน่น ถ้าการกดอัดหรือเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์ไม่ดี KBr Pellet จะโปร่งแสงหรือบางพื้นที่ที่มีลักษณะขุ่นมัวในบริเวณที่มี UHMWPE Powder อยู่ ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์ทดสอบออกมาไม่ถูกต้อง ข้อเสนอแนะอีกอย่างในการวิเคราะห์ทดสอบจะต้องทำการสแกนทดสอบอย่างน้อยที่สุด 32 ครั้ง ในโหมด Transmission ของ FTIR และ Background Spectrum ควรที่จะรวบรวมไว้ด้วยกันบน Pure KBr Pellet ซึ่ง Unusual Peaks ใดๆ ที่ปรากฏจะเป็นตัวบ่งบอกถึงชนิดของสิ่งปนเปื้อนหรือปฏิกิริยาที่เกิดจากการรวมตัวของธาตุต่างๆ กับออกซิเจน ซึ่งเทคนิคการวัดนี้เป็นการวัดในเชิงกึ่งปริมาณ

หลังจากที่ UHMWPE Powder ถูกขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็งหรือเก็บไว้ในรูปของแข็งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอาจเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย ในที่นี้การเสื่อมสภาพหรือการขาดออกจากกันของสายโซ่โมเลกุลที่มีสาเหตุมาจากความร้อนหรือการแปรรูปทางกลอาจเกิดขึ้นบ้างในบางเวลา ซึ่ง FTIR สามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่อยู่ในรูปของก้อนของแข็งได้เช่นกัน



รูปที่ 2.9 เครื่องวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี [3]

2.5 สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์

สมบัติทางกายภาพของ UHMWPE ที่สำคัญ คือลักษณะรูปร่างทางกายภาพทั้งในระดับมหภาคและจุลภาค นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางด้านความร้อนและมวลโมเลกุล ซึ่งรายละเอียดของเทคนิคการทดสอบต่างๆ จะแยกอธิบายเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

2.5.1 การทดสอบทางความร้อน ด้วยเทคนิค DSC

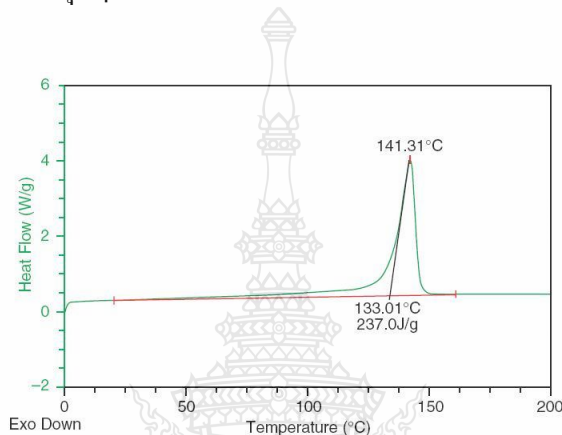
เป็นเทคนิคการทดสอบพื้นฐานทั่วไปสำหรับ UHMWPE ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางความร้อน จุดหลอมละลายและปริมาณความเป็นผลึกตามที่ได้กล่าวถึงไปแล้วอย่างคร่าวๆในหัวข้อที่ 2.3 ซึ่ง Glass Transition ของ UHMWPE จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ -160 °C และนักวิจัยส่วนใหญ่จะไม่ทำการทดสอบสมบัตินี้ สำหรับรูปภาพของเครื่อง DSC นี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.10 ตัวเครื่องประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับถ่วงน้ำหนักอัตโนมัติ ทำให้สามารถทดสอบชิ้นงานได้ต่อเนื่องหลายๆ ชิ้นในกรณีที่ต้องการทดสอบอย่างต่อเนื่อง ในการทดสอบ UHMWPE น้ำหนักของชิ้นทดสอบต่ำสุดประมาณ 5-10 มิลลิกรัม โดยชิ้นทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนักด้วย Accurate Microbalance หลังจากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกปิดผนึกไว้ในภาชนะสำหรับวางชิ้นงานที่เป็นอนุกรม ซึ่งภาชนะสำหรับวางชิ้นงานจะวางคู่กับภาชนะเปล่า โดยที่ภาชนะทั้งสองจะมีขดลวดให้ความร้อน ในการให้ความร้อนนั้น โดยปกติจะให้ความร้อนในอัตรา 10 °C /min. จากช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 200 °C ในขณะที่ให้ความร้อน อัตราการเปลี่ยนแปลงของความร้อนจะแสดงที่จอภาพของเครื่อง ตัวอย่าง DSC Trace ของชิ้นทดสอบ UHMWPE- GUR 1050 Powder มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11 ที่แสดงให้เห็นปฏิกิริยาการดูดซับความร้อนขณะหลอมละลายที่อุณหภูมิ 141 °C ปฏิกิริยาการดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมของอุณหภูมิจากในช่วง 20 to 160 °C ($\Delta H_{\text{endotherm}}$) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิการหลอมละลายของ UHMWPE บริสุทธิ์ ($\Delta H_f = 291$ จูล/กรัม) หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหา Degree of Crystallinity ซึ่งค่าที่ได้คือ $X = 81\%$ ตามสมการ

$$\%X = \frac{\Delta H_{\text{endotherm}}}{\Delta H_f} \% \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.10 เครื่องทดสอบ DSC [3]

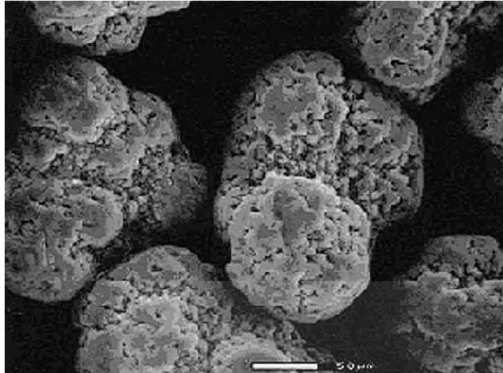
สำหรับขั้นตอนการขึ้นรูป UHMWPE ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็ง อุณหภูมิหลอมละลายและปริมาณความเป็นผลึกจะมีค่าต่ำลง โดยทั่วไปจะอยู่ที่ 140°C และ 60 % ตามลำดับ สำหรับ DSC Trace ของ UHMWPE ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11 และนอกจากนี้ปริมาณความเป็นผลึกของขั้นตอนที่ผ่านการฉายรังสีจะลดต่ำลงไปอีก ถ้าหากขั้นตอนการให้ความร้อนด้วยการ Annealing หลังจากผ่านการฉายรังสี ดังนั้นการทดสอบด้วย DSC เทคนิคจะต้องทำการทดสอบทุกๆ ขั้นตอนของการผลิตหรือการเตรียมขึ้นรูป



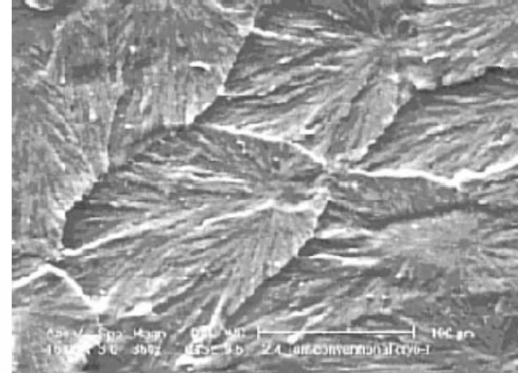
รูปที่ 2.11 กราฟการวิเคราะห์ทางความร้อนของขั้นตอน UHMWPE- GUR 1050 Powder [3]

2.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM

เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผง UHMWPE ก่อนทำการขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็ง ซึ่งผง UHMWPE จะถูกโปรยลงบนผิวหน้าของเทปกาวคาร์บอนสองหน้าที่ติดบนแผ่นวางขั้นตอนและทำการเคลือบผิวหน้าผง UHMWPE ด้วยทองคำ หรือคาร์บอน หลังจากนั้นจึงนำขั้นตอนที่ต้องการตรวจสอบเข้า SEM Chamber รูปร่างของผง UHMWPE ที่ได้จากการตรวจสอบด้วย SEM มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12 a) นอกจากนี้ SEM ยังสามารถใช้ตรวจสอบก้อนของแข็ง UHMWPE ที่มีเม็ดเกรนขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 นาโนเมตร ที่อยู่ภายในดังตัวอย่างที่แสดงในรูป 2.12 b) สำหรับในส่วนของการเตรียมขั้นตอนที่จะนำมาทดสอบ ขั้นตอนจะต้องผ่านการแช่แข็งในไนโตรเจนเหลวและหักชิ้นงานออกจากกัน เพื่อให้สามารถมองเห็นเกล็ดหรือเม็ดเกรนที่อยู่ภายในได้ชัดเจน สำหรับในบริเวณที่เป็นช่องว่างในชิ้นงานที่เกิดจากการเตรียมชิ้นงาน ไม่สามารถมองเห็นได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น



ก)



ข)

รูปที่ 2.12 ก) ลักษณะรูปร่างผง UHMWPE ที่ได้จากการ SEM ข) ลักษณะพื้นผิวการแตกหักของก้อนชิ้นทดสอบ UHMWPE [3]

2.5.3 การทดสอบความหนาแน่น

เป็นการวิเคราะห์ความหนาแน่นของ UHMWPE จะสัมพันธ์กับความเป็นผลึกและรูพรุนต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น และนอกจากนี้สิ่งหนึ่งที่มีผลต่อความเที่ยงตรงของเทคนิคการวัดความหนาแน่นจะเกี่ยวข้องกับการใช้ Density Gradient ตามที่มีการอธิบายไว้ในมาตรฐาน ASTM D1505-99e1 โดยเทคนิคการวัดนี้ Vertical Cylindrical Tube ถูกเติมด้วยของเหลวที่สามารถผสมเข้ากันได้ 2 ชนิด หรือมากกว่า 2 ชนิดที่มีช่องว่างของความหนาอยู่ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่ง Vertical Cylindrical Tube นี้จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เพราะความหนาแน่นของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลที่ได้จากการผสมของเหลวทำให้ค่าความหนาแน่นที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นเส้นตรงตามความสูงต่ำของค่าความหนาแน่นที่จุดสูงสุดของช่องสำหรับการวัดที่อยู่บน Vertical Cylindrical Tube ซึ่ง Glass Floats ของความหนาแน่นที่ถูกต้องจะแทนที่ด้วยตำแหน่งบนสุดของช่องสำหรับการวัดที่อยู่บน Vertical Cylindrical Tube หลังจากนั้นจะลดต่ำลงสู่ตำแหน่งสูงสุดที่อยู่บนช่องสำหรับการวัดความหนาแน่นที่เท่ากับระดับของของเหลว ซึ่งระดับของของเหลวที่ลอยอยู่นี้จะใช้สำหรับการสอบเทียบค่าความหนาแน่นก่อนทำการวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน ความหนาแน่นของชิ้นงานที่ทำการทดสอบสามารถหาได้จากการแทนที่ของระดับของเหลวที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับระดับของของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบสำหรับ UHMWPE โดยทั่วไปของเหลวที่ใช้คือน้ำผสมกับเอทานอลที่มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.72-1 กรัม/โมล ซึ่งวัสดุที่ต้องการทดสอบสามารถทำการทดสอบได้ด้วยเทคนิคการแทนที่ด้วยน้ำ โดยชิ้นทดสอบจะต้องถูกชั่งน้ำหนักในอากาศด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวในการวิเคราะห์ค่อนข้างสูง

หลังจากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกแขวนในเครื่องชั่งและจมนลงในของเหลวที่วางอยู่ในเครื่องชั่งเช่นกัน ทำให้น้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ได้มีค่าน้อยกว่าการชั่งชิ้นทดสอบในอากาศ หลังจากนั้นจึงนำน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในอากาศและน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ชั่งในน้ำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่น

2.6 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์

สมบัติทางกลของวัสดุเป็นสมบัติพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการนำวัสดุไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องรับภาระหรือรับแรงทางกลต่างๆ ดังนั้นการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิจัยพัฒนาวัสดุก่อนที่จะมีการนำวัสดุไปประยุกต์ใช้งานจริง ซึ่งวิธีการทดสอบสมบัติทางกลที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวิธีการทดสอบที่มีการนำมาใช้โดยทั่วไปสำหรับการวิจัยพัฒนา UHMWPE ชนิดใหม่

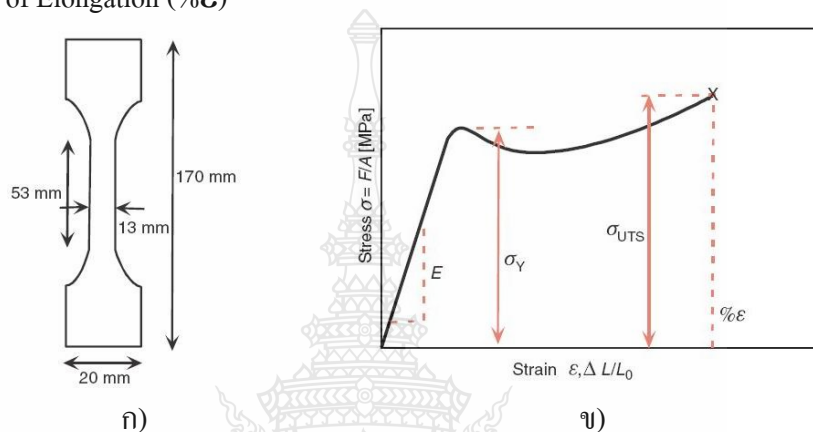
2.6.1 การทดสอบความแข็ง เป็นการตรวจสอบค่าความแข็งหรือต้านทานรอยขีดข่วน การเสียดสีและการเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับเครื่องทดสอบคูโรมิเตอร์ ที่ใช้ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบ Shore A และ แบบ Shore D ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด โดยทั่วไป Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่า ในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของคูโรมิเตอร์ (ก) Shore A และ(ข) Shore D [5]

2.6.2 การทดสอบแรงดึง เป็นวิธีการทดสอบสมบัติทางกลที่มีการนำมาใช้ค่อนข้างแพร่หลายสำหรับ UHMWPE และได้มีการอธิบายรายละเอียดเทคนิคการทดสอบไว้ในมาตรฐาน ASTM D638 และรูปร่างของชิ้นทดสอบมีลักษณะคล้ายคัมเบล ที่ได้จากการอัดขึ้นรูป การตัดเดือนขึ้นรูปหรือป้อนขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ก) หลังจากนั้นจึงทำการดึงชิ้นทดสอบให้แยกออกจากกันด้วย

ความเร็วของการดึงคงที่ สำหรับในส่วนของมาตรฐานการทดสอบอื่นๆ ขนาดของชิ้นทดสอบจะมีลักษณะเป็นคัมเบลเช่นกัน แต่อาจมีขนาดของชิ้นทดสอบที่แตกต่างกัน เมื่อทำการทดสอบแรงดึงต้องเฝ้าติดตาม บันทึกผลแรงดึง (F) อัตราการยืดตัวของวัสดุ (ΔL) และทำการแปลงกลับเป็นค่า Engineering Stress และ Strain ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ข) ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามารถนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่า Young's Modulus (E), The Yield Stress (σ_Y), Ultimate Tensile Stress (σ_{UTS}) และ Percentage of Elongation (% ϵ)

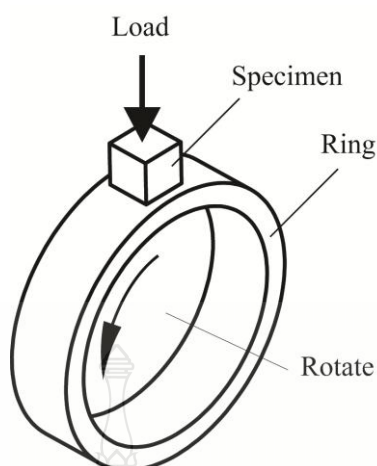


รูปที่ 2.14 ก) ลักษณะชิ้นทดสอบ ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด [6]

2.7 กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์

กลไกการสึกหรอเป็นศาสตร์หรือเทคโนโลยีแขนงหนึ่งที่อยู่เบื้องหลังการเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของวัสดุที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ ในการศึกษาทางด้านการสึกหรอ ประกอบด้วยทฤษฎีการเสียดทาน การหล่อลื่นและการสึกหรอ ซึ่งกลไกการสึกหรอเกิดจากการเคลื่อนที่หรือเลื่อนสไลด์ออกของเนื้อวัสดุจากพื้นผิวของแข็งที่ถูกกระทำด้วยพื้นผิวของแข็งอื่น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของวัสดุและก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ออกของเนื้อวัสดุหรือการสูญเสียเนื้อวัสดุจากบริเวณพื้นผิวของวัสดุด้วยแรงกระทำทางกล ส่งผลต่อมวลหรือน้ำหนักของวัสดุลดลง ดังนั้นการทดสอบการสึกหรอ จึงเป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบของวัสดุแต่ละชนิด เพื่อนำมาเปรียบเทียบสำหรับการเลือกใช้งาน อาทิเช่น การออกแบบชิ้นส่วนจักรกล แบตเตอรี่ เคลือบผิวและการหล่อลื่น เป็นต้น [3]

สำหรับการวิเคราะห์การสึกหรอของวัสดุ UHMWPE ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการเสียดทานและการสึกหรอเท่านั้น เนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำและสามารถหล่อลื่นได้ในตัว ซึ่งมีวิธีการทดสอบการสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์ได้ตามมาตรฐาน ASTM G77 ดังรูปที่ 2.15 โดยทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยวิธีวงแหวน (Block on Ring) ภายใต้สภาวะแบบแห้ง



รูปที่ 2.15 แผนภาพหลักการทดสอบการสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM G77

เพื่อหาอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบของวัสดุ สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบการสึกหรอ ให้ได้ขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร พร้อมทั้งทำการปรับพื้นผิวชิ้นทดสอบให้เรียบและบันทึกรูปภาพพื้นผิวก่อนการทดสอบและทำการชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอแล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้ง กำหนดความเร็วของการเสียดทาน (เมตร/วินาที) แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ (นิวตัน) และระยะเวลาทดสอบ (นาฬิกา) หรือระยะทาง (กิโลเมตร) หลังจากผ่านการทดสอบแล้ว ทำการบันทึกพื้นผิวหรือรอยการสึกหรอของชิ้นทดสอบและชั่งน้ำหนักที่สูญเสียไปด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 มิลลิกรัม เพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบและนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น (Wear rate) ในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดขึ้นทดสอบและระยะทางทำการทดสอบดังสมการต่อไปนี้ [23-24]

$$\text{Wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nm} \quad (2.2)$$

โดยกำหนด Wear rate = อัตราการสึกหรอ (mm^3/Nm)

V_{loss} = ปริมาตรที่สูญเสีย (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

N = แรงกดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ (นิวตัน)

d = ระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ (เมตร)

ซึ่งค่า V_{loss} ได้จากสมการ

$$V_{\text{loss}} = V_o - V_f \quad (2.3)$$

โดยกำหนดค่า V_o = ปริมาตรชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ
 V_f = ปริมาตรชิ้นทดสอบหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากปริมาตร (V) ของชิ้นทดสอบได้จากสมการ

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.4)$$

ดังนั้น สมการอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ คือ

$$\text{Wear rate} = \frac{(m_o - m_f)}{\rho N d} \times 1000 \quad (2.5)$$

โดยกำหนด Wear rate = อัตราการสึกหรอ หน่วย mm^3/Nm

m_o = มวลชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ (กรัม)

m_f = มวลชิ้นทดสอบหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ (กรัม)

ρ = ค่าความถ่วงจำเพาะของชิ้นทดสอบ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

N = แรงกดชิ้นทดสอบขณะทดสอบการสึกหรอ (นิวตัน)

d = ระยะทางที่ทำการทดสอบการสึกหรอ (เมตร)

หมายเหตุ 1 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร = 0.001 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร = 0.000001 กรัม/ลูกบาศก์มิลลิเมตร

2.8 วรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sangeeta Hambir, J P Jog, 1999 [2] ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปของวัสดุพอลิเอทิลีนมวลโมเลกุลสูงด้วยกรรมวิธีซินเตอร์ริง ซึ่ง UHMWPE เป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีความทนทานต่อแรงเสียดทานสูง ความต้านทานต่อการขีดถูที่ดีและทนต่อสารเคมีที่ดี ฯลฯ โดยนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม อาทิเช่น อุตสาหกรรมงานสิ่งทอ การต่อเรือและทางชีวการแพทย์ เป็นต้น สำหรับวัสดุ UHMWPE มีลักษณะเป็นเม็ดผงพอลิเมอร์ จึงสามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการซินเตอร์ริงภายใต้แรงดันและนำไปซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมละลาย เนื่องจากผง UHMWPE มีความหนาแน่นสูง จึงทำให้ผงวัสดุมีความหนืดสูงและไม่ไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูง สำหรับการทดลองได้เลือกใช้ผงวัสดุ UHMWPE 2 เกรด ได้แก่ Pylene Uital 1900 และ Stamylyan UH 120 เพื่อทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ อุณหภูมิการซินเตอร์ริงและการพัฒนาค่าความแข็งแรง

J.J. Wu, C.P. Buckle และ J.J. O'Conner [7] ได้ทำการศึกษากลไกความสมบูรณ์ของการอัดขึ้นรูปผง UHMWPE บริสุทธิ์ เกรด 1900H ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 145-200 °C แรงดัน 8-32 MPa

และเวลาคงอุณหภูมิ 15-90 นาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิหลอมละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลต่ออัตราการยึดตัวและปริมาณความเป็นผลึกของวัสดุพอลิเมอร์

Shibo Wang และ Shirong Ge [8] ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบของแรงดันแม่พิมพ์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE ทำการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปภายใต้สภาวะแรงดัน 3 ระดับ ที่แรงดัน 10, 15 และ 20 MPa เพื่อการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อรอยขีดข่วนและกลไกการสึกหรอ พบว่า เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น มีผลต่ออัตราการสึกหรอของก้อนวัสดุ UHMWPE ลดลง

M. Peltzer, J.R. Wagner, A. Jimenez, 2005 [9] ได้ทำการศึกษากระบวนการขึ้นรูปเพื่อวิเคราะห์ความเสถียรภาพสมบัติทางกลของวัสดุ UHMWPE ที่มีการผสมสารตัวเติมธรรมชาติ สำหรับการทดลองได้มีการกำหนดเงื่อนไขในการขึ้นรูป ซึ่งประกอบด้วย การใช้ผงวัสดุ UHMWPE 100 % และการผสมสารตัวเติม a-Tocopherol ในอัตราส่วน 0.1 %, 0.3 % และ Irganox 1076 อัตราส่วน 1 % สำหรับการทดลองขึ้นรูปมี 2 กรรมวิธี คือ การฉีดขึ้นรูปและอัดขึ้นรูป ซึ่งขนาดชิ้นทดลองมีความกว้าง 16.5 ซม. ยาว 18 ซม. และหนา 4 ซม. เพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วย ความต้านทานแรงดึง ค่ายังมอดูลัส (Young's Modulus) เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดนิกขาด (Elongation at Break %) ค่าความแข็ง Shore D ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปีและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เป็นต้น สามารถสรุปผลการตรวจสอบได้ดังนี้

- 1.) ค่าความต้านทานแรงดึงได้มากที่สุด คือ การขึ้นรูปด้วยการฉีดผง UHMWPE 100 %
- 2.) สำหรับค่าความแข็งแบบ Shore D มีผลการวัดความแข็งที่ใกล้เคียงกันมากทั้งสองกรรมวิธี โดยมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 61-64 Shore D
- 3.) ค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบชาร์ปีได้มากที่สุด คือ การอัดขึ้นรูปด้วย UHMWPE Powder (99.7 %) +Tocopherol (0.3 %)

Weston Wood, Wei-Hong Zhong [10] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE นาโนคอมโพสิตกับผงคาร์บอนนาโน วัสดุที่นำมาทำการทดลองคือ UHMWPE เกรด GUR 1020 ของบริษัท Ticona มีความหนาแน่นของโมเลกุลประมาณ 3×10^6 กรัม/โมล ผงนาโนคาร์บอนเกรด HHT ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100-200 นาโนเมตร ความยาว 30-100 ไมโครเมตร จากผู้ผลิต Pyrograf Products, OH, USA โดยการอัดขึ้นรูปเพื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ทางความร้อน(TGA) ความต้านทานการสึกหรอและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ UHMWPE 100% ที่มีลักษณะคล้ายกันสายริบบิ้นยาว แต่ชิ้นทดสอบ UHMWPE+CNFs พบว่า มีลักษณะ โครงสร้างคล้ายกับสายริบบิ้นสั้นๆและเกล็ดเล็ก

F. Li, K. Hu, J. Li, B. Zhao. 2001 [11] ได้ทำการศึกษาการเสียดทานและความต้านทานการสึกหรอของ PTFE โดยการผสม ZnO ที่มีขนาดอนุภาค 50 นาโนเมตร ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการทดสอบการเสียดทานด้วยวงแหวน โดยใช้วัสดุสแตนเลสเป็นวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้ในการเสียดสี โดยกำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 200 นิวตัน ความเร็วของการเสียดสีเท่ากับ 0.431 เมตร/วินาที จากผลการตรวจสอบ พบว่า ปริมาณการผสม ZnO จำนวน 15 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ $13 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$

W. G. Sawyer, K. D. Freudenberg, P. Bhimaraj, L. S. Schadler. 2003 [12] ได้ทำการศึกษาการสึกหรอของ PTFE โดยการผสม Al_2O_3 ที่มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร ซึ่งทำการทดสอบโดยวิธีการ Reciprocating Tribometer โดยใช้วัสดุสแตนเลส (Stainless Steel) เป็นวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้ในการเสียดสี ซึ่งกำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 260 นิวตัน ความเร็วของการเสียดสีเท่ากับ 50 มิลลิเมตร/วินาที ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการผสม Al_2O_3 จำนวน 20 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ $1.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$

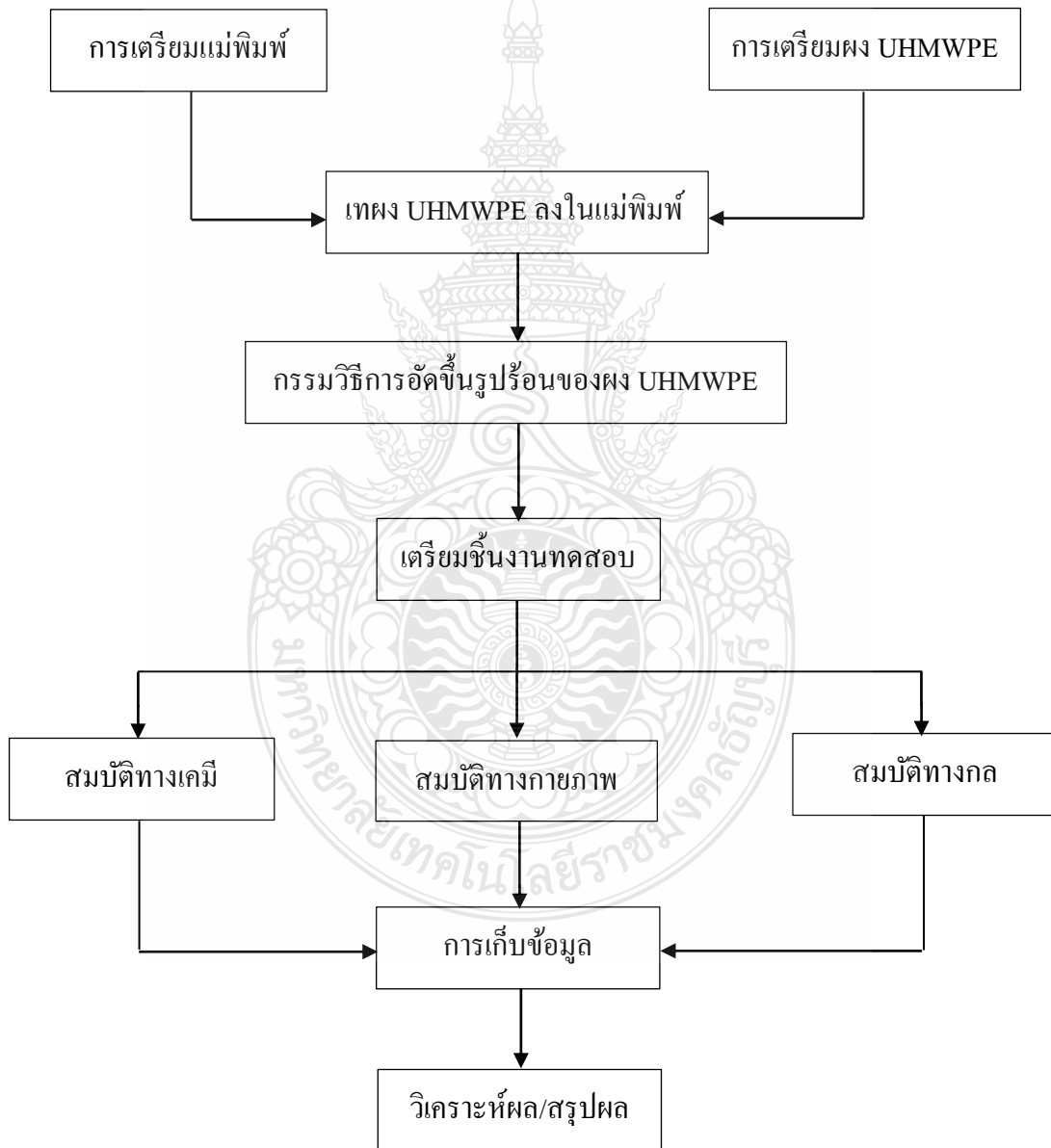
M. Z. Rong, M. Q. Zhang, G. Shi, Q. L. Ji, B. Wetzel, K. Friedrich. 2003 [13] ได้ทำการศึกษาการสึกหรอของอีพ็อกซีโดยการผสมอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่มีขนาดอนุภาค 3.8 นาโนเมตร ซึ่งทำการทดสอบ โดยวิธีการทดสอบเสียดทานด้วยวงแหวน โดยใช้วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุคู่สัมผัสที่ใช้ในการเสียดสีกำหนดแรงที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 1 MPa ความเร็วของการเสียดสีเท่ากับ 1 เมตร/วินาที ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการผสม Al_2O_3 จำนวน 1.6 % มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด โดยมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ $8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ทดสอบวิเคราะห์จุดหลอมเหลว ความร้อนจำเพาะ การเปลี่ยนสถานะและสภาวะเป็นผลึก

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการทดลองขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปจากผงวัสดุ UHMWPE หลายเกรดและพอลิเมอร์ประเภทอื่นๆ โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบของสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและกลไกการสึกหรอ ซึ่งมีวิธีการทดสอบและตรวจสอบแตกต่างกัน เพื่อเป็นการวัดค่าหรือชี้วัดความสามารถของขึ้นรูปทดสอบตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต่างๆ เนื่องจากมีการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นผู้วิจัยได้นำวิธีการอัดขึ้นรูปแผ่น UHMWPE และการตรวจสอบตามหลักมาตรฐานต่างๆ มาเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลทดสอบ เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ถึงขีดความสามารถของขึ้นรูปทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่น UHMWPE และเปรียบเทียบกับขึ้นรูปที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้ศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปรีนอนของผง UHMWPE บริสุทธิ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปและทำการตรวจสอบสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

3.1 วัสดุ อุปกรณ์และเครื่องมือ

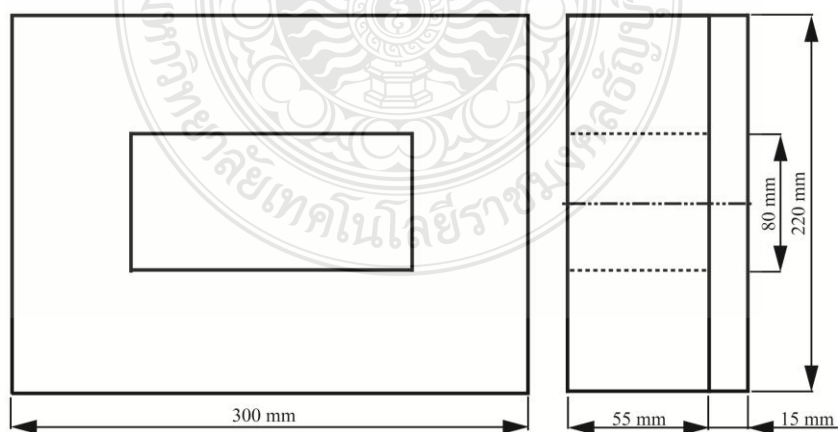
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

1) ผง UHMWPE บริสุทธิ์เกรด SLL-6-6020 ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Corporation Limited จากสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีมวลโมเลกุล เท่ากับ 6.5×10^6 กรัม/โมล ขนาดอนุภาคเท่ากับ 80-100 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผงวัสดุ UHMWPE เกรด SLL - 6 - 6020

2) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน ทำจากเหล็กแม่พิมพ์ เกรด SKD11 โดยมีขนาดชิ้นงาน ความกว้าง 160 มม. ความยาว 80 มม. และความสูง 10 มม. ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน

3.1.2 เครื่องมือทดสอบ

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

เครื่องมือ	ยี่ห้อ / รุ่น
1. Hot Compression Machine	-
2. Compression Molding	Lab Tech Engineering
3. Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR	Perkin Elmer / Frontier
4. Scanning Electron Microscope: SEM	JEOL / JSM-6510
5. Differential Scanning Calorimetry: DSC	Perkin Elmer DSC7
6. Hardness Tester (Durometer Shore D)	Teclock / GS-702G type D
7. Tensile Tester	-
8. Wear Tester	IE-Wear
9. เครื่องอัดขึ้นทดสอบ	Perkin Elmer
10. Analytical Balances	AND / HR-200
11. Analytical Balances	Mettler Toledo / AB204S
12. กล้องจุลทรรศน์	Dino-lite Digital Microscope

3.1.3 สถานที่ทำการทดลอง

1) ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

2) ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

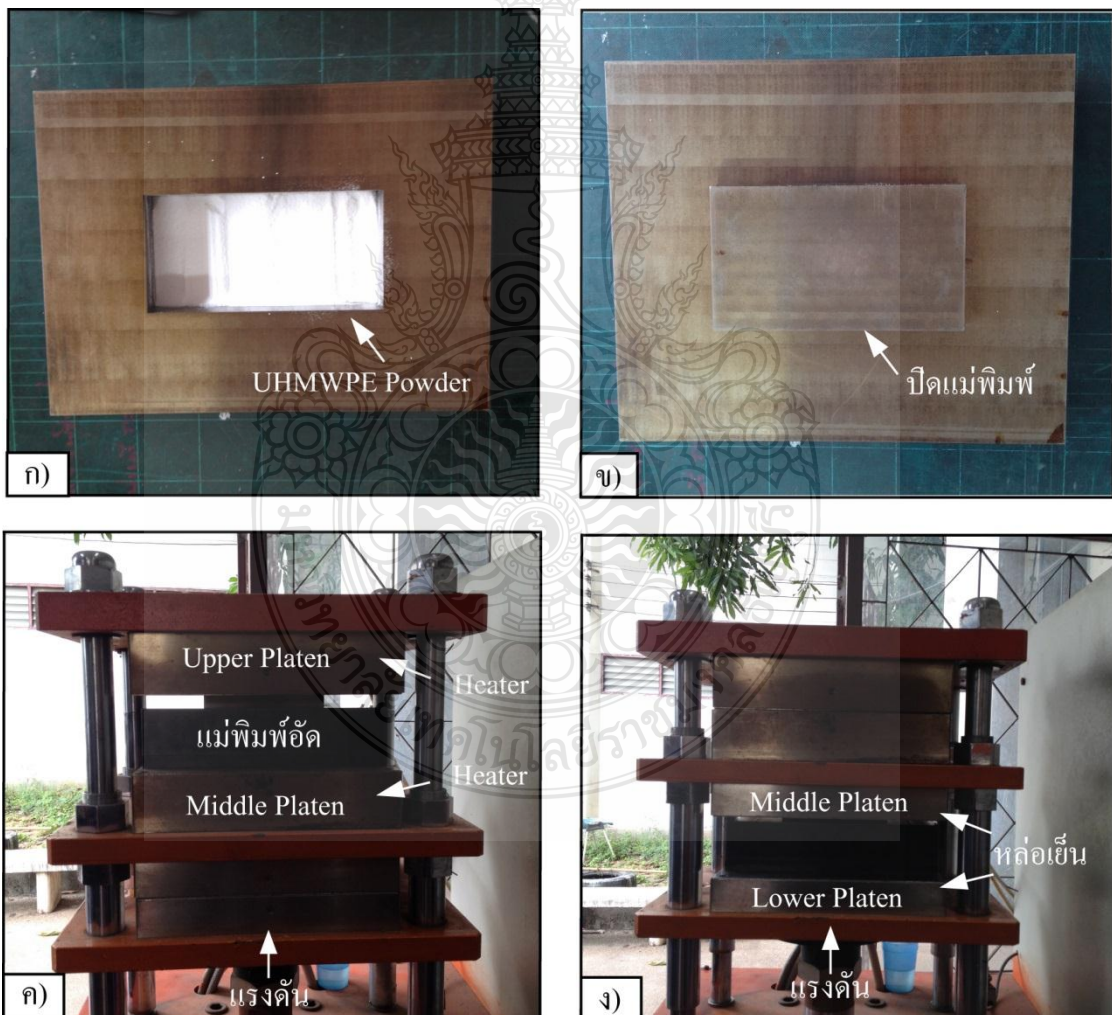
3.2 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปร้อน

1) วางปีกเกอร์บนเครื่องชั่งและรีเซ็ตค่าให้เป็นศูนย์ หลังจากนั้นเทผง UHMWPE บริสุทธิ์ลงบนปีกเกอร์ โดยชั่งน้ำหนักของผง UHMWPE บริสุทธิ์อยู่ที่ประมาณ 120 กรัม

2) ทำการประกอบแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อนขั้นสูงให้แน่นแล้ว เทผง UHMWPE บริสุทธิ์ลง (ตามลูกศร) ในเบ้าแม่พิมพ์และเลื่อนพันทันลงมากดผง UHMWPE บริสุทธิ์ ในส่วนของเบ้าแม่พิมพ์ก่อนใช้ค้อนยางเคาะพันทันเบาๆ แล้วนำแม่พิมพ์ไปอัดขึ้นรูป ดังรูปที่ 3.4 (ก-ข)

3) เปิดเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน เลื่อนแท่นพิมพ์ส่วนที่เป็น Upper Platen กับ Middle Platen ปรับตั้งค่าอุณหภูมิและแรงดันสำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน เมื่ออุณหภูมิความร้อนได้ตามเงื่อนไข นำแม่พิมพ์ขึ้นวางบนแท่นพิมพ์ของเครื่องแล้ว ทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.4 ค) การอัดขึ้นรูปร้อน

4) เมื่อเวลาคงอุณหภูมิตอบตามเงื่อนไขแล้ว ทำการเลื่อนแท่นพิมพ์ส่วนที่เป็น Middle Platen ลง เพื่อนำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องพร้อมก็นำแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปมาวางบนแท่นพิมพ์ส่วนที่เป็น Lower Platen กับ Middle Platen ทำการอัดแม่พิมพ์และเปิดระบบน้ำหล่อเย็น ดังรูปที่ 3.4 ง) ทำการเช็คอุณหภูมิโดยให้อุณหภูมิแม่พิมพ์อยู่ที่ประมาณ 20-25 °C ให้นำแม่พิมพ์ออกจากเครื่องอัดขึ้นรูปเพื่อทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และทำความสะอาดแม่พิมพ์ทั้งส่วนของพื้นที่และเบ้าแม่พิมพ์ก่อนขึ้นรูปใหม่อีกครั้ง โดยขั้นตอนที่ผ่านการอัดขึ้นรูปมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 3.5 ลักษณะแผ่นขึ้นทดลองวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

3.3 การทดสอบวัสดุพอลิเมอร์

3.3.1 การทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี

การเตรียมชิ้นทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี เริ่มจากการตัดชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ ให้เป็นเศษเล็กๆ แล้วนำไปเทลงบนแผ่นอลูมิเนียมหนา 0.2 มม. ทำการประกบด้วยแผ่นเหล็กหนา 5 มม. หลังจากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปใหม่ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป ตามรูปที่ 3.7

โดยปรับค่าอุณหภูมิที่ 200 °C เวลาคงอุณหภูมิ 4 นาที เวลาหล่อเย็น 5 นาที หลังจากนั้นทำการตัดชิ้นทดสอบขนาด 2×4×0.03 ซม. หรือให้ความหนาเท่ากับแผ่นฟิล์ม

สำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเครื่องฟูลเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Frontier ดังรูปที่ 3.8 โดยเลือกใช้ช่วงความถี่ที่ 650-4000 แล้ววิเคราะห์หาสเปกตรัมสัญญาณการสั่นของจุดพีคต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกราฟ แล้วทำการบันทึกผลค่า IR-Spectrum ดังแสดงรูปที่ ก-1 - ก-3 (ภาคผนวก ก) เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่มีผลต่อการเชื่อมสภาพของวัสดุ UHMWPE



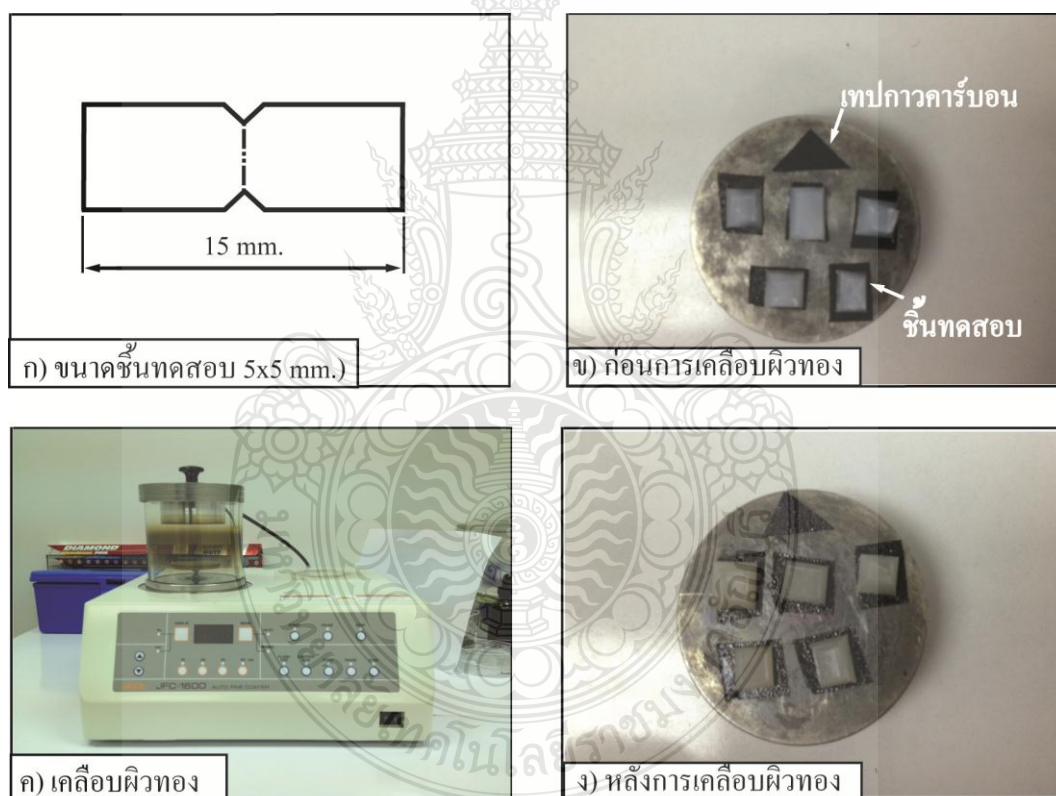
รูปที่ 3.7 เครื่องอัดขึ้นรูป ยี่ห้อ Lab Tech Engineering



รูปที่ 3.8 เครื่องฟูลเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Frontier

3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆซึ่งสามารถเตรียมชิ้นทดสอบได้ โดยการตัดชิ้นงานขนาด 5×15×5 มม. ดังรูปที่ 3.9 (ก) นำไปแช่ในโตรเจนเหลวนาน 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการหักชิ้นงานตัวอย่าง เนื่องจากพื้นผิวหรือบริเวณแตกหักของชิ้นทดสอบพอลิเมอร์นั้นจะไม่นำไฟฟ้า จึงทำการเคลือบผิวด้วยแพลทินัม ทำการติดคาร์บอนเทปสองหน้าบนสท๊ป (ตามลูกศร) แล้ววางชิ้นทดสอบบนคาร์บอนเทป (ตามลูกศร) ดังรูปที่ 3.9 (ข) หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปเคลือบผิวด้วยเครื่องเคลือบผิวชิ้นงาน JEOL JFC-1600 Auto fine Coater ดังรูปที่ 3.9 (ค) ซึ่งชิ้นทดสอบที่ผ่านการเคลือบผิวแล้ว จะมีพื้นผิวเป็นสีทอง ดังรูปที่ 3.9 (ง)



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและกลไกการเกิดความเสียหายของก้อนวัสดุ UHMWPE ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยายสูง โดยการตั้งค่าศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 50X 300X 500X และ 1000X ในการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

การเตรียมชิ้นทดสอบด้วยการตัดชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป ร้อนให้มีน้ำหนัก 5-9 มิลลิกรัม แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียดและนำไปใส่ ในถาดอลูมิเนียม พร้อมทำการปิดผนึกชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นงาน ยี่ห้อ Perkin Elmer ดังรูปที่ 3.11 (ก-ง)



ก) Analytical Balances



ข) เครื่องอัดขึ้นทดสอบ

รูปที่ 3.11 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบทางความร้อน



ค) Pan Aluminums



ง) ชั้นทดสอบทางความร้อน

รูปที่ 3.11 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเตรียมชั้นทดสอบทางความร้อน (ต่อ)

สำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วย ดังรูปที่ 3.12 โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จากช่วงอุณหภูมิ $0\text{-}210\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการไหลไนโตรเจน 20 มิลลิลิตร/นาที หลังจากนั้นนำ ชั้นทดสอบที่ปิดผนึกไว้เข้าเครื่องทดสอบทางความร้อน เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับ พลังงานความร้อนขณะหลอมละลาย (enthalpy, $\Delta H_{\text{endotherm}}$) ของชั้นทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐาน สำหรับวัสดุ UHMWPE ซึ่งมีค่า $\Delta H = 291$ จูล/กรัม หลังจากนั้นบันทึกค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ Melting Enthalpy (Heat of Fusion, ΔH_f) จำนวนหาร้อยละของปริมาณความเป็นผลึก (% Crystallinity) ได้จากสมการที่ 2.1 ดังแสดงผลการทดสอบในตารางที่ ก-1 (ภาคผนวก ก)



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี ยี่ห้อ Perkin Elmer DSC7

3.3.4 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นเป็นการวัดค่าความถ่วงจำเพาะของพลาสติก สามารถหาได้จากค่าการแทนที่ของระดับของเหลวที่เกิดขึ้นด้วยการชั่งน้ำหนักได้ เพื่อต้องการทราบค่าความหนาแน่นของก้อนวัสดุ UHMWPE สามารถดำเนินการทดสอบได้ตามขั้นตอนดังนี้

1) นำบีกเกอร์มาวางบนแท่นเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ AND รุ่น HR-200 ทำการเติมของเหลวหรือน้ำมันลงในบีกเกอร์ประมาณ 50~70 มิลลิลิตร และแขวนตะแกรงสำหรับวางชิ้นทดสอบลงในบีกเกอร์ แล้วรีเซ็ตค่าน้ำหนัก

2) นำชิ้นทดสอบจุ่มลงไปใต้น้ำในตะแกรง (ตามลูกศร) ดังรูปที่ 3.13 แล้วทำการอ่านค่าน้ำหนักที่แสดงบนจอและบันทึกผล ดังแสดงในตารางที่ ก-2 (ภาคผนวก ก) เพื่อนำค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ไปคำนวณหาอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ หลังจากดำเนินการทดสอบการสึกหรอโดยแทนค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ (ρ) ในสมการที่ 2.4



รูปที่ 3.13 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นทดสอบพอลิเมอร์

3.3.5 การทดสอบค่าความแข็ง

การตรวจสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบคูโรมิเตอร์ แบบสเกลดี (Shore D) ยี่ห้อ Teclock รุ่น GS-702G Type D ดังรูปที่ 3.14 (ก) สำหรับการทดสอบค่าความแข็งและการเก็บข้อมูลมีวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

- 1) การปรับค่าให้เป็นศูนย์ หรือหมุนเข็มสีแดงให้ตรงกับตำแหน่งเลขศูนย์ โดยวางขึ้นทดสอบตามแนวราบบนผิวเรียบของบนแท่น
- 2) ทำการกดหัวเข็มลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของหัวเข็ม (ถึงจุด Stop Ring) เสร็จแล้วยกคันโยกลงช้าๆ จนเข็มสีดำหยุดนิ่ง โดยทำการกดค้างไว้ประมาณ 10 วินาที
- 3) หลังจากนั้นยกคันโยกขึ้นแล้วอ่านค่าได้จากเข็มสีแดงบนหน้าปัดคูโรมิเตอร์ ตามลูกศร ดังรูปที่ 3.14 โดยเลือกจุดในการวัด 30 จุด แล้วบันทึกผลค่าความแข็ง ดังแสดงในตารางที่ ข-1 (ภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.14 การทดสอบค่าความแข็ง

3.3.6 การทดสอบค่าแรงดึง

การตรวจสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา สำหรับการเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง โดยทำการกัดชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ให้มีลักษณะคล้ายกับดัมเบลหรือให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I ซึ่งชิ้นทดสอบมีความหนา ≤ 7 มม. ดังรูปที่ 3.15 โดยใช้เครื่องมือวัดถึงในการกัดขึ้นรูป สำหรับการทดสอบแรงดึง เริ่มจากการเปิดเครื่องทดสอบแรงดึงและเครื่องคอมพิวเตอร์แล้ว ทำการจับยึดชิ้นทดสอบกับหัวจับขึ้นทดสอบ ดังรูปที่ 3.16

ทำการเลือกโหลด 5 กิโลนิวตัน ตั้งชื่อชิ้นทดสอบ (Name) ปรับค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ในการดึง (50 มม./นาที) ป้อนค่าขนาดความหนา ความกว้างและความสูง (มม.) ที่ได้จากการวัดขนาดของชิ้นทดสอบแล้ว ทำการตั้งระยะหัวจับขึ้นทดสอบตามมาตรฐานกำหนด หลังจากนั้นจึงทำการดึงชิ้นทดสอบให้ขาดออกจากกันด้วยความเร็วของการดึงคงที่ จากนั้นทำการบันทึกผลของแรงดึง ดังแสดงในตารางที่ ข-2 (ภาคผนวก ก) แล้วทำการวิเคราะห์ค่าความเค้นคราก Yield Strength (MPa) ความเค้นแรงดึงสูงสุด Ultimate Tensile Strength (MPa) และค่าความยืดตัวที่จุดขาด (% Elongation at Break)



รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบสำหรับแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I [12]



รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะการจับยึดชิ้นทดสอบ



ก) Imported Bulk UHMWPE



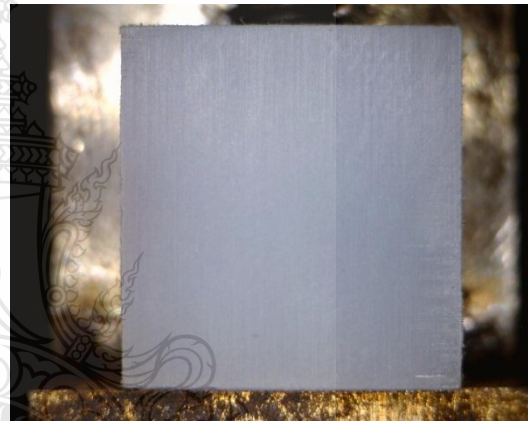
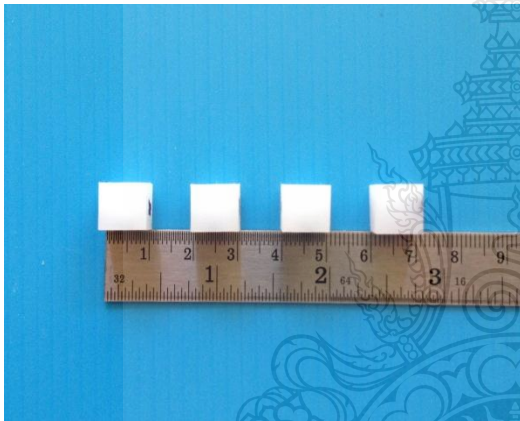
ข) Experimental Formed Bulk

รูปที่ 3.17 ลักษณะการพิกขนาดของชิ้นทดสอบ

3.3.7 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีวงแหวน ตามหลักมาตรฐาน ASTM G77 ภายใต้สภาวะแบบแห้ง สามารถเตรียมชิ้นทดสอบและดำเนินการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

1) ทำการตัดชิ้นทดลองให้ขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ $10 \times 10 \times 10$ ลูกบาศก์ มิลลิเมตร และปรับพื้นผิวชิ้นทดสอบให้ได้ระนาบพร้อมกับถ่ายภาพพื้นผิวก่อนการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การสึกหรอ (การวิเคราะห์รอยการสึกหรอโดยซอฟต์แวร์ Ricono) ดังรูปที่ 3.18 (ก-ข) หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ดังรูปที่ 3.20 โดยทำการบันทึกค่าน้ำหนักก่อนการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ ค-1 (ภาคผนวก ค) และรูปภาพชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ ข

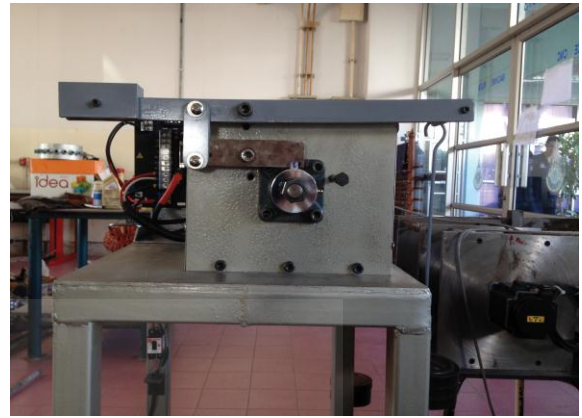
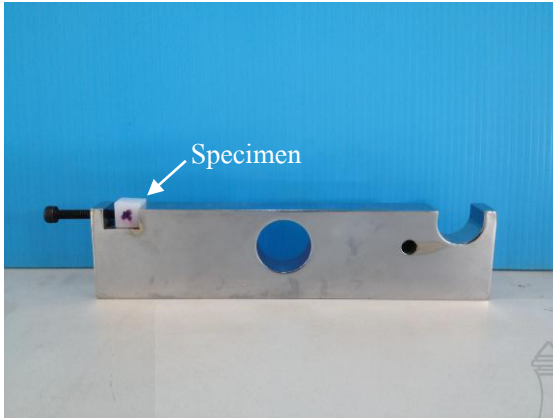


ก) Specimen $10 \times 10 \times 10$ มม.³

ข) ปรับพื้นผิวก่อนทดสอบ

รูปที่ 3.18 การเตรียมชิ้นทดสอบการสึกหรอ

2) ทำการจับยึดชิ้นทดสอบด้วยฟิกเจอร์ หลังจากนั้นนำไปประกอบกับเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Waer1 ดังรูปที่ 3.19 (ก-ข) โดยกำหนดสภาวะการทดสอบแบบแห้ง ด้วยความเร็วของการเสียดทาน 0.3 เมตร/วินาที แรงกดบนชิ้นทดสอบ 150 นิวตัน และวงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า (Bearing Steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 62 ± 0.02 มม. ความหยาบพื้นผิววงแหวน 0.2 ไมโครเมตร ทำการเปิดเครื่องทดสอบให้ทำการหมุนเสียดสีกับชิ้นทดสอบเป็นระยะเวลา 555 นาที หรือคิดเป็นระยะทาง 10.0 กิโลเมตร แล้วทำการทดสอบ ดังรูปที่ 3.19 (ข)



ก) อุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบการสึกหรอ

ข) เครื่องทดสอบการสึกหรอ

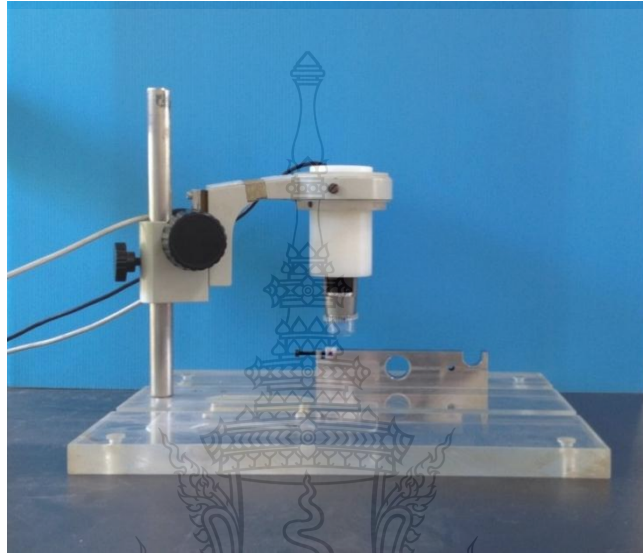
รูปที่ 3.19 การทดสอบการสึกหรอ

3) หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอครบระยะทาง 10.0 กิโลเมตร ให้นำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบการสึกหรอและทำการชั่งน้ำหนักที่สูญเสียบนของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม ดังรูปที่ 3.20 แล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่สูญเสียบนตารางที่ ค-1 (ภาคผนวก ค)



รูปที่ 3.20 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ AND รุ่น HR-200

4) ทำการบันทึกภาพร่องรอยการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังรูปที่ 3.21 ดังแสดงในตารางที่ ง-1 (ภาคผนวก ง) หลังจากนั้นนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นทดสอบ เพื่อคำนวณหาอัตราการสึกหรอ ในหน่วยของปริมาณที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดชิ้นทดสอบและระยะทางการทดสอบ ดังสมการที่ 2.2



รูปที่ 3.21 กล้องจุลทรรศน์สำหรับการวิเคราะห์การสึกหรอ (Dino-Lite Digital Microscope)



รูปที่ 3.22 แสดงตัวอย่างลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

จากการดำเนินงานวิจัยเพื่อหาสภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการอัดขึ้นรูปรีออนแผ่น จากผง UHMWPE บริสุทธิ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางกลดีที่สุดและความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุด หลังจากดำเนินการทดลองขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปรีออน (Hot Compression Mold) ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีผลการทดสอบต่างๆ ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี

เอกลักษณ์ทางเคมี ด้วยเทคนิค FTIR

จากการศึกษาค้นคว้าสืบค้นข้อมูล IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่า มีการแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ $2891-2844\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1472 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ bending ในสายโซ่พอลิเมอร์ และที่ $690-900\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งอยู่นอกกระนาบของสายโซ่พอลิเมอร์ [25]

เมื่อกล่าวถึงการวิเคราะห์ทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีของพอลิเมอร์ด้วย IR Spectrum พบว่า สามารถนำไปเชื่อมโยงถึงการศึกษากการเสื่อมสภาพหรือการสลายตัวของพอลิเมอร์ (Degradation of Polymer) ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ประกอบด้วย อุณหภูมิ แสงรังสี และสารเติมแต่งบางชนิด ถ้าพอลิเมอร์ได้รับปัจจัยเหล่านี้เข้าไปแล้ว จะทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น

จากการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบ IR Spectrum ของชิ้นงานตัวอย่าง UHMWPE กับ IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่า การเสื่อมสภาพของ UHMWPE ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพีคแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานดังต่อไปนี้ [26-27]

1. พีคที่ $2000-2600\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$) ที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์
2. พีคที่ $1850-1700\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์

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

4. ที่ 910 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ terminal vinyl ($-\text{CH}=\text{CH}_2-$) ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ และการถูกตัดภายในสายโซ่พอลิเมอร์

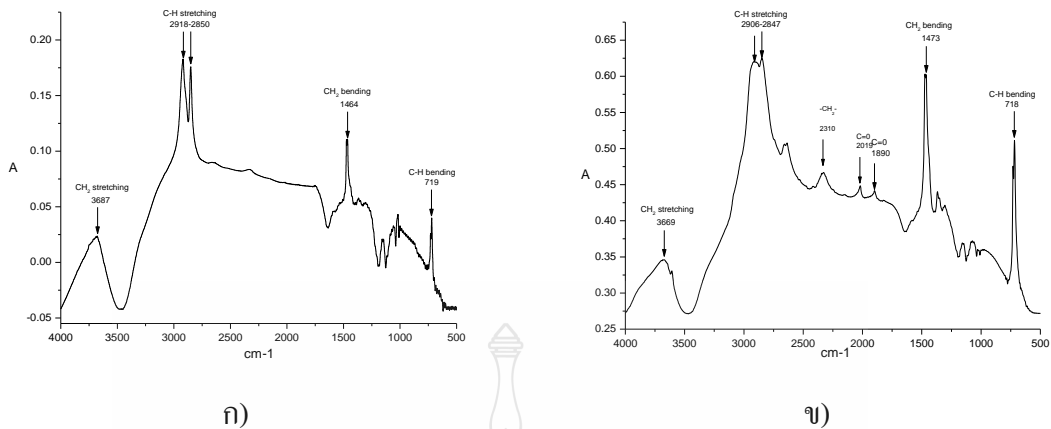
สำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของก้อนขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ด้วยเครื่องฟูลเรียทราฟอรัมอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Frontier ของสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยทำการเปรียบเทียบกับก้อนขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและผง UHMWPE บริสุทธิ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ผงบริสุทธิ์ UHMWPE

ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของผง UHMWPE บริสุทธิ์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดผสมกับเม็ดเล็กๆ และมีสีขาวปุ่นสำหรับรายละเอียดผลการวิเคราะห์ IR Spectrum ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3687 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ stretching, ที่ $2918-2850\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่ 1464 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ bending และที่ 719 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สอดคล้องตรงกับ IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE [14-15]

2) ก้อนขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

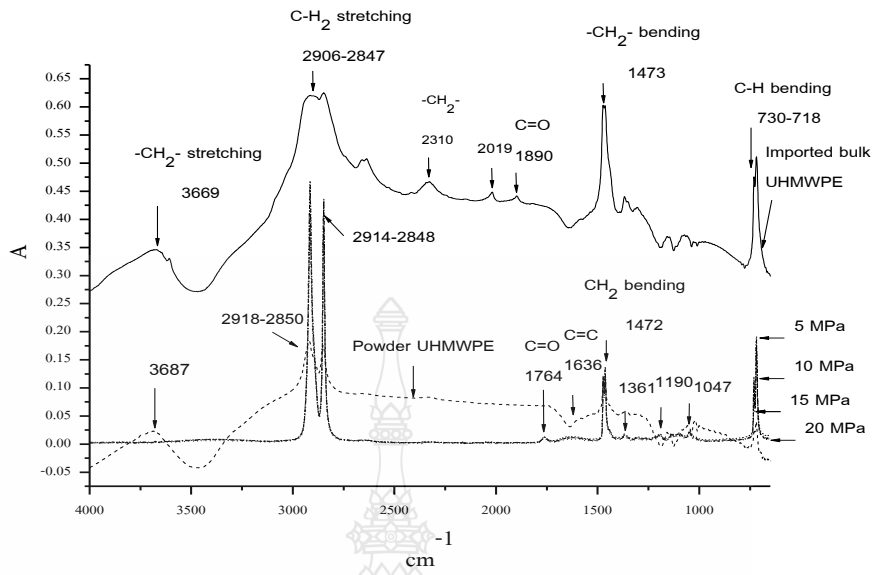
สำหรับก้อนขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มีลักษณะเป็นแบบแผ่น ขนาดความกว้าง 15 ม.ม. ความยาว 52 ม.ม. และความหนา 10 ม.ม. จากกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 4.0 g/mol ผิวมันวาวและสีขาวปุ่นเข้ม สำหรับรายละเอียดผลการวิเคราะห์ IR Spectrum ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3669 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ stretching, ที่ $2906-2847\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่ $2310, 2019\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$) ที่เกิดการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และที่ 1855 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1473 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ bending, และที่ $730-718\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งอยู่นอกกระนาบของสายโซ่พอลิเมอร์ [14]



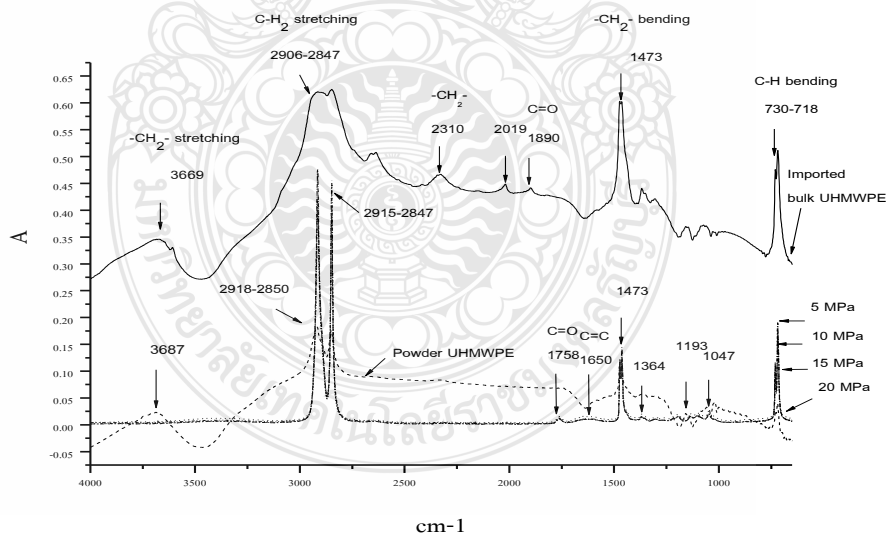
รูปที่ 4.1 IR spectrum: ก) ผง UHMWPE บริษัทที่ ข) วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

3) ก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน

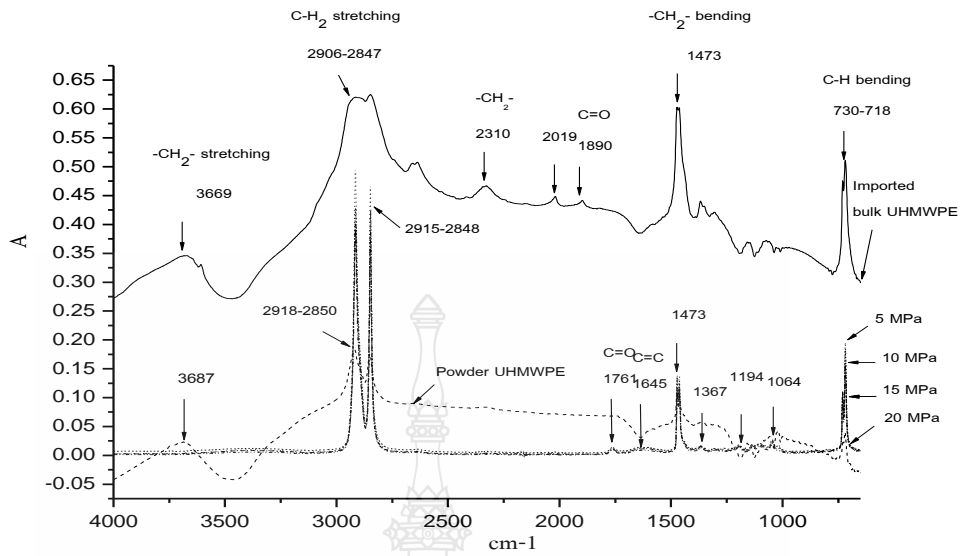
ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของก้อนชิ้นทดลองที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิความร้อน 170, 190 และ 210 °C ระดับแรงดันที่ 5, 10, 15 และ 20 MPa และระยะเวลาคงอุณหภูมิ 30, 60 และ 90 นาที จากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี พบว่า ชิ้นทดสอบส่วนใหญ่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 2914–2848 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ C–H stretching, ที่ 1758-1764 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของชิ้นทดสอบ จึงทำให้ค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง, ที่ 1616-1654 เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งแสดงการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ [15], ที่ 1464-1473 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ bending, ที่ 730–717 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ C–H bending และที่เกิดการดูดพลังงานขึ้นเพิ่มเติมเล็กน้อยที่ 1361, 1190, 1047 cm^{-1} แต่ไม่มีสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$ stretching) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับผลงานวิจัยของ F.S. Senator Et.al ที่การทดลองอัดขึ้นรูปชิ้นงานภายใต้สภาวะแรงดัน 75 MPa อุณหภูมิ 160°C และเวลาคงอุณหภูมิ 50 นาที ที่แสดงผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของวัสดุ UHMWPE พบว่า การดูดกลืนพลังงานคล้ายกัน เนื่องจากเป็นชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติม ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [16] และพบว่า ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amanda L. Forster, al.et ที่ศึกษาความเสถียรของเส้นใย UHMWPE เนื่องจากพบการดูดกลืนพลังงานที่ 1713, 1737 cm^{-1} เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ [19]



รูปที่ 4.2 เอกลักษณะทางเคมีของก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 170°C แรงดันระดับต่างๆและเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับชิ้น ทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



รูปที่ 4.3 เอกลักษณะทางเคมีของก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 190°C แรงดันระดับต่างๆและเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับชิ้น ทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



รูปที่ 4.4 เอกลักษณะทางเคมีของก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 210°C แรงดันระดับต่างๆและเวลาดองอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับชิ้น ทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของชิ้นทดสอบ วัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ -stretching	C-H stretching	-CH ₂ -bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
Imported bulk UHMWPE	3669	2906-2847	1473	730-718	1855	—	Peak 2310-2019 เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1855 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
UHMWPE Powder	3687	2918-2850	1464	719	—	—	—
170-5-30		2915-2848	1472	730-718	1761	1647	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1647 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-10-30		2914-2848	1472	730-718	1764	1636	Peak 1764 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทราสเปกตรัมของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ -stretching	C-H stretching	-CH ₂ -bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
170-15-30		2915-2848	1472	730-718	1761	1618	Peak 1764 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-20-30		2915-2848	1472	730-718	1764	1647	Peak 1764 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1647 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-5-30		2914-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-10-30		2915-2847	1473	730-718	1758	1654	Peak 1758 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1654 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-15-30		2915-2848	1473	730-718	1758	1654	Peak 1758 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1654 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-20-30		2914-2848	1472	730-718	1761	1648	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1648 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-5-30		2914-2848	1472	730-718	1764	1636	Peak 1764 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-10-30		2915-2848	1472	730-718	1764	1647	Peak 1764 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1647 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-15-30		2915-2848	1472	730-718	1761	1623	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1623 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทราสเปกตรัมของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
210-20-30		2914-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-5-60		2915-2848	1473	730-718	1758	1636	Peak 1758 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-10-60		2914-2847	1472	730-718	1761	1618	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-15-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-20-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-5-60		2915-2848	1473	730-718	1758	1636	Peak 1758 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-10-60		2914-2847	1472	730-718	1761	1618	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-15-60		2915-2848	1472	730-718	1758	1636	Peak 1758 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-20-60		2914-2848	1472	730-717	1761	1616	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1616 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทราสเปกตรัมของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
210-5-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1619	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1619 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-10-60		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-15-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1636	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-20-60		2914-2847	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-5-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-10-90		2914-2847	1472	730-718	1761	1617	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1616 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-15-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1636	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-20-90		2914-2847	1472	730-718	1762	1616	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1616 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-5-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทราสเปกตรัมของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
190-10-90		2915-2848	1472	730-718	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1654 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-15-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-20-90		2915-2848	1472	730-718	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-5-90		2914-2847	1472	730-718	1761	1617	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-10-90		2914-2848	1472	730-718	1761	1618	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-15-90		2914-2848	1472	730-717	1761	1637	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-20-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล

การศึกษาวินิจฉัยสมบัติทางกายภาพของวัสดุก้อน UHMWPE ที่ประกอบด้วยการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ความหนาแน่น และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค DSC

สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ PERKIN ELMER รุ่น DSC 7 ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 0-210 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) 10 °C/min, ค่า Enthalpy มาตรฐานสำหรับวัสดุ UHMWPE มีค่า $\Delta H = 291\text{J/g}$ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทดสอบมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 210°C แรงดัน 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ซึ่งมีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 40.08% รองลงมาคือ สภาวะอุณหภูมิ 170°C แรงดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 39.52% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบว่า มีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.51% ซึ่งมีปริมาณความเป็นผลึกน้อยกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ อยู่ 13.43%

4.2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบความหนาแน่นด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ AND รุ่น HR-200 ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา พบว่า ก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิต่างๆ มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.9532-1.0549 g/cm³ และส่วนใหญ่มีความหนาแน่นสูงกว่าก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.0048 g/cm³ ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.2

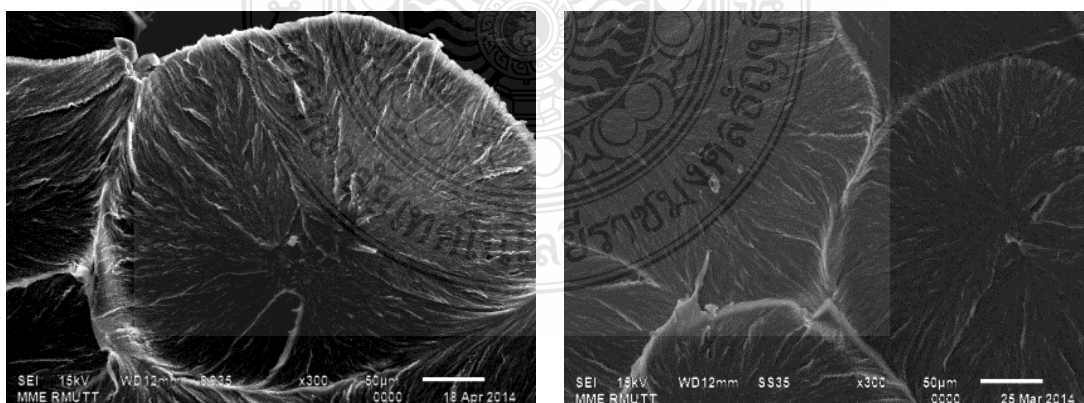
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

Sample / Forming condition	Degree of crystallinity, χ (%)	Density, ρ (g/cm ³)		Yield Strength, σ_y (MPa)		Ultimate Strength, σ_u (MPa)		Elongation, ϵ (MPa)		Hardness (Shore D)	
		Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
Imported bulk UHMWPE	53.51	1.0048	0.0034	13.2	1.92	17.1	4.32	436.4	15.5	60.60	1.04
170-5-30	39.52	1.0253	0.0177	18.6	1.62	25.7	0.33	488.7	29.9	53.57	0.73
170-10-30	36.65	1.0125	0.0303	18.6	5.00	25.4	4.86	523.4	11.2	52.10	1.09
170-15-30	35.01	1.0259	0.0434	19.3	4.62	24.9	4.52	492.1	12.0	51.87	1.11
170-20-30	36.01	0.9965	0.0129	18.5	1.55	24.4	2.21	495.9	29.7	51.53	1.50
190-5-30	36.50	1.0059	0.0060	14.9	2.82	21.3	2.58	489.9	26.0	51.77	1.01
190-10-30	37.71	1.0023	0.0111	19.4	5.78	23.1	4.91	431.2	73.9	52.20	1.71
190-15-30	36.43	0.9891	0.0108	16.2	2.50	22.3	3.13	516.5	20.9	51.53	0.90
190-20-30	37.56	1.0027	0.0117	19.1	6.42	23.7	6.12	460.5	26.1	51.57	1.68
210-5-30	37.75	0.9802	0.0127	16.4	1.40	24.0	1.64	504.9	21.9	52.23	0.97
210-10-30	37.68	1.0190	0.0149	16.2	5.69	19.9	4.84	422.8	78.2	51.90	1.24
210-15-30	36.43	1.0009	0.0208	13.6	2.80	16.8	3.00	482.3	10.7	51.67	0.84
210-20-30	40.08	0.9857	0.0385	19.5	3.60	24.5	3.96	436.4	84.9	51.60	1.77
170-5-60	36.93	0.9532	0.0432	16.1	1.85	23.6	1.53	486.7	12.5	53.40	0.86
170-10-60	35.94	1.0549	0.0037	16.9	3.06	21.0	4.76	460.3	29.7	51.23	1.17
170-15-60	37.83	1.0182	0.0123	19.6	0.15	25.7	0.40	494.9	17.0	50.87	1.31
170-20-60	36.17	0.9800	0.0095	19.2	5.51	22.3	1.73	383.5	116	51.27	1.31
190-5-60	36.71	1.0039	0.0183	16.5	1.53	21.5	1.49	514.7	9.9	52.70	0.75
190-10-60	37.69	1.0171	0.0228	15.6	0.17	19.7	0.57	511.4	17.1	51.13	0.94
190-15-60	36.93	1.0393	0.0133	16.6	2.42	23.3	0.71	491.8	10.2	52.27	1.14
190-20-60	37.18	1.0170	0.0401	17.8	3.16	21.9	4.25	448.3	46.9	50.67	1.06
210-5-60	36.48	0.9728	0.0108	15.3	3.00	22.6	4.09	467.9	42.6	53.70	0.84
210-10-60	35.23	1.0065	0.0079	14.1	2.16	21.5	1.62	499.0	22.3	53.23	1.28
210-15-60	37.07	0.9958	0.0219	19.6	4.19	25.2	4.49	438.5	63.1	53.13	1.20
210-20-60	38.18	0.9958	0.0234	18.5	8.18	23.1	5.74	438.2	60.4	52.83	1.37
170-5-90	36.97	1.0108	0.0060	19.5	1.32	25.9	1.33	492.9	33.9	52.13	0.57
170-10-90	37.24	1.0203	0.0190	14.7	1.61	19.2	2.86	475.2	21.7	52.30	1.15
170-15-90	37.07	0.9955	0.0228	17.7	1.47	23.5	1.75	481.6	29.1	51.43	0.90
170-20-90	36.89	0.9809	0.0413	9.67	3.12	17.1	3.47	495.5	24.8	51.13	1.57
190-5-90	37.67	1.0053	0.0081	17.8	2.80	21.9	3.71	526.2	14.2	52.33	0.96
190-10-90	36.02	1.0188	0.0093	17.4	4.56	22.0	4.54	508.4	13.1	51.50	0.97
190-15-90	36.60	0.9955	0.0159	16.0	1.96	23.8	0.66	497.4	10.2	52.20	1.06
190-20-90	36.79	0.9896	0.0176	14.6	0.35	18.1	0.41	482.9	9.83	51.50	1.50
210-5-90	37.96	0.9717	0.0183	11.3	0.26	17.1	0.69	456.1	10.2	53.63	0.72
210-10-90	36.73	0.9884	0.0232	16.3	1.10	22.0	1.55	457.0	33.9	51.93	1.08
210-15-90	38.60	0.9809	0.0679	9.73	4.23	18.2	3.09	496.2	25.0	53.43	1.25
210-20-90	36.99	0.9801	0.0074	14.3	0.58	21.6	1.42	499.2	14.7	52.67	1.09

4.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

สำหรับในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510 ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งหมดมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or Flake Pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่เกิดจากการเชื่อมต่อประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆและผงละเอียด ซึ่งถูกกดอัดด้วยแรงดันของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนให้เกิดการเชื่อมติดกันภายใต้อุณหภูมิความร้อน แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ และทำให้เกิดการยื่นตัวทันทีในระหว่างการอัดขึ้นรูปภายในแม่พิมพ์ ที่ผ่านระบบหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 3 ลิตร/นาทิจ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเชื่อมต่อประสานของผงอนุภาค UHMWPE เปรียบเทียบกับสมบัติของ UHMWPE ที่ไม่มีจุดไหลตัวและหลอมละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พบว่า มีลักษณะคล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดสาหร่าย [17-18]

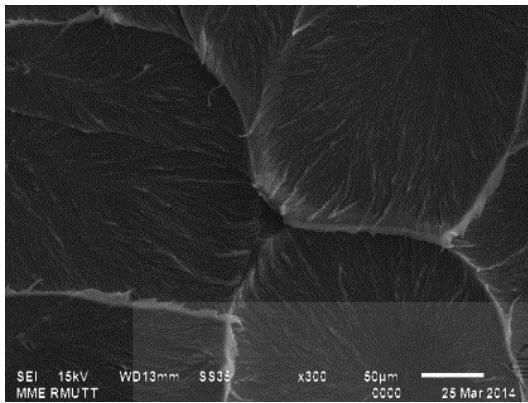
เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบว่า ชิ้นทดสอบมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบแผ่น ซึ่งคล้ายกันและพบช่องว่างที่เกิดภายในโครงสร้างของการเกาะยึด (ลูกศรสีขาว) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ง) ก้อนชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ



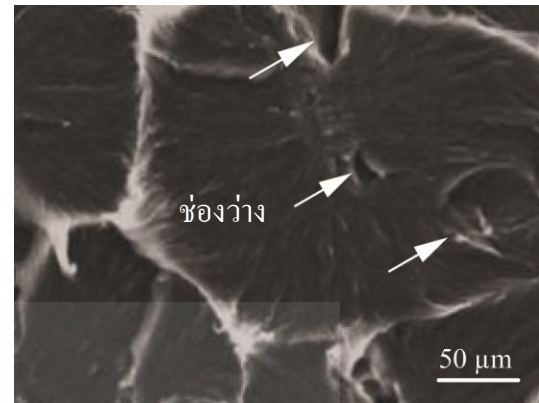
ก) 170 °C-15 MPa-60 นาที

ข) 90 °C-15 MPa-30 นาที

รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ



ค) 210 °C-20 MPa-90 นาที



ง) Imported Bulk UHMWPE

รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)

4.2.4 การวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึง

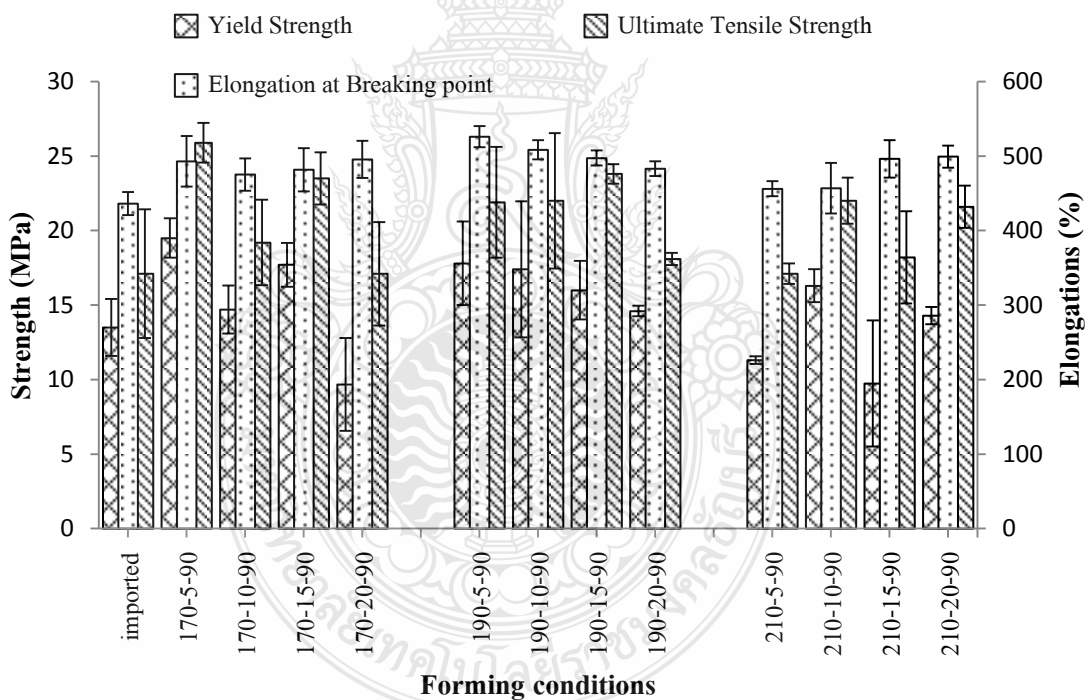
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ณ ห้องปฏิบัติการโทรโบลอยอุตสาหกรรมการผลิต หน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา พบว่า ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีค่าความเค้นคราก (Yield Strength) ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด (Elongation at Breaking Point) ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ ดังกราฟผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลให้เห็นว่าสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนที่ต่างกันมีผลทำให้ได้สมบัติทางกลต่างกัน โดยชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 90 นาที มีค่าความเค้นคราก 17.80 ± 3.96 MPa ความเค้นแรงดึงสูงสุด 21.92 ± 5.24 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด คือ $526.68 \pm 20.01\%$ สำหรับชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีค่าเท่ากับ 13.50 ± 1.62 MPa 17.06 ± 4.32 MPa และ $436.41 \pm 15.50\%$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าทดสอบแรงดึงต่ำกว่าถึง 24.16, 22.17 และ 17.14% ตามลำดับ

4.2.5 การวิเคราะห์ความแข็ง

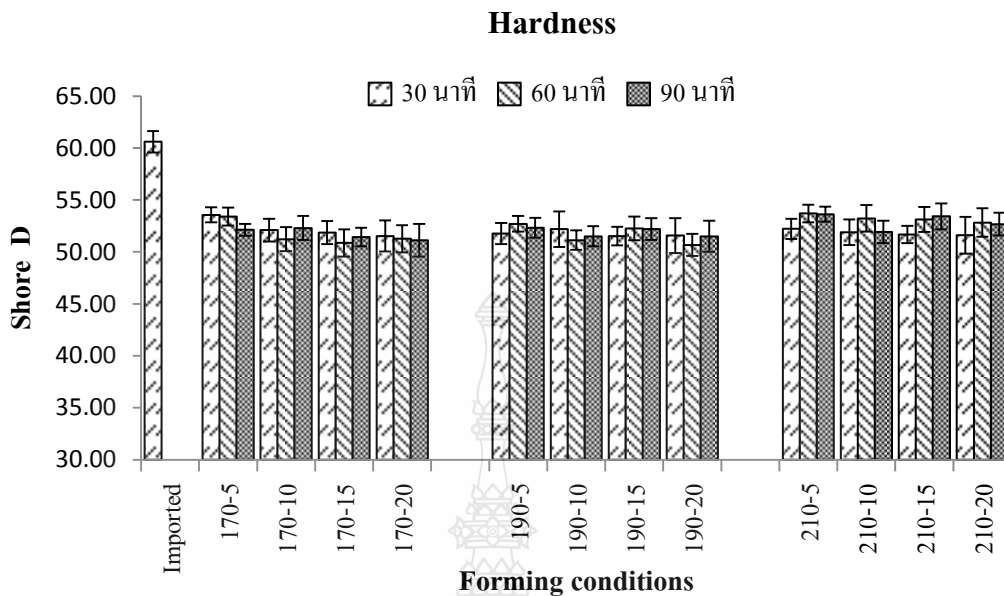
สำหรับการวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งคูโรมิเตอร์ ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D สำหรับชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิต่างๆ พบว่า มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน

อยู่ในช่วง 52-54 Shore D โดยมีสภาวะอุณหภูมิ 210°C แรงดัน 5 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 นาที มีความแข็งสูงสุดคือ 54 Shore D ซึ่งมีค่าความแข็งต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ อยู่ 7 Shore D ดังกราฟการวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบค่าความแข็งที่แสดงในรูปที่ 4.7

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลเอกลักษณะทางเคมี IR Spectrum และปริมาณความเป็นผลึก พบว่า ชิ้นทดสอบที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกต่ำและค่าความแข็งลดลง ส่งผลทำให้มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค พบว่า ชิ้นทดสอบที่มีการเกิด Cross-Link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลทำให้การเชื่อมต่อประสานหรือมีการหลอมละลายรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันหรืออนุภาค UHMWPE มีการเกาะยึดติดกันได้สมบูรณ์ดี ส่งผลทำให้ชิ้นทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและความเหนียวสูง [14-15] ดังรายละเอียดการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพกับสมบัติทางกลที่แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดงอุณหภูมิ 90 นาที เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



รูปที่ 4.7 ความแข็งขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิสถานะต่างๆ เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

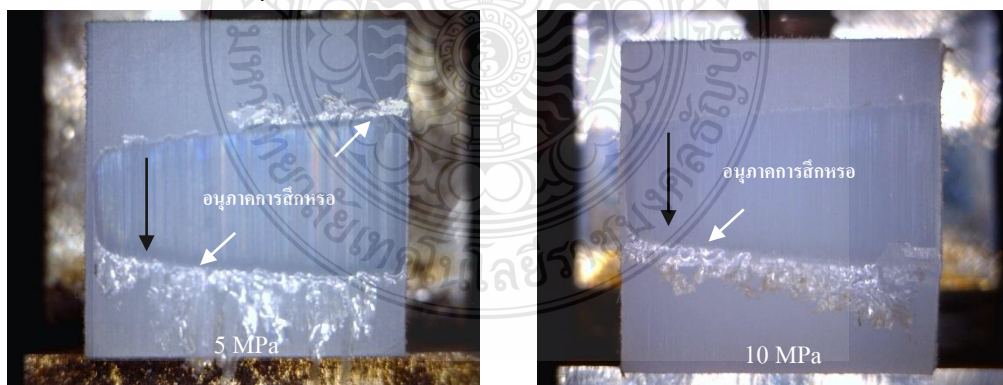
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกลไกการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอของขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ตามหลักมาตรฐาน ASTM G77 ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ณ ห้องปฏิบัติการ ไทโรโบลียอุตสาหกรรมการผลิต หน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน นครราชสีมา หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอของขึ้นทดสอบด้วยระยะทางการทดสอบ 10 กิโลเมตร หรือคิดเป็นระยะเวลา 555 นาที พบว่า ขึ้นทดสอบทั้งหมดแสดงอนุภาคการสึกหรอ (Wear Debris) สะสมตัวอยู่บริเวณขอบรอยสึกหรอ (ลูกครีสีขาว) ตามทิศทางการไถล (ลูกครีสีดำ) ของวงแหวนวัสดุคู่สัมผัส โดยขึ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีขนาดพื้นที่ รอยสึกหรอและปริมาณการสะสมตัวของอนุภาคการสึกหรอมากที่สุด ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.8 และ ตารางที่ ง-1 (ภาคผนวก ง) และนอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความหยาบพื้นผิว ของรอยสึกหรอ พบว่า บริเวณพื้นผิวของรอยสึกหรอยังปรากฏพื้นผิวที่มีลักษณะหยาบและบาง บริเวณมีลักษณะเป็นร่องที่เกิดจากการไถครูดเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ ส่งผลให้สามารถสันนิษฐาน รูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ได้ว่า เป็นการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ที่เกิดจากการ ถ้ายโอนเนื้อพอลิเมอร์ไปยังพื้นผิววงแหวนคู่สัมผัสและเกิดการเกาะยึดติดแน่นบนพื้นผิววงแหวนที่

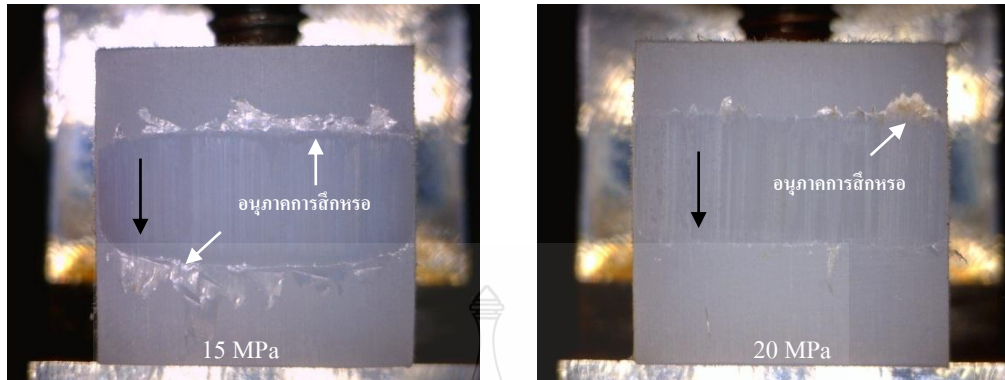
เรียกว่า การถ่ายโอนเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์ (Polymer Transfer Film) ที่มีลักษณะเป็นชั้นเยื่อที่มีความบางมากและเหนียวบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส โดยชั้นเยื่อบางๆของพอลิเมอร์สามารถช่วยลดการสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์หลังช่วงเวลาเริ่มต้นเกิดการสึกหรอ [29] และเมื่อชั้นทดสอบผ่านการทดสอบด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ชั้นเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์เกิดการสะสมตัวจนมีความหนาเพิ่มขึ้นและเนียนจืดพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่เกิดการเกาะยึดประสานติดกันออกจากชั้นทดสอบ ส่งผลให้พื้นผิวชั้นทดสอบบางบริเวณเกิดเป็นรอยหยาบขรุขระ และในช่วงเวลาเดียวกันนี้บางบริเวณของพื้นผิววงแหวนเกิดการสะสมตัวของเนื้อพอลิเมอร์ที่ฉีกออกมาจากชั้นทดสอบก่อตัวเป็นก้อนนูน (Lumpy) ยึดเกาะติดแน่นและยื่น โผล่พ้นออกมาจากพื้นผิววงแหวนทำให้เกิดการไถครูดลงไปเนื้อพอลิเมอร์ในระหว่างที่มีการไถลสัมผัสของวงแหวนกับชั้นทดสอบส่งผลให้เกิดเป็นร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ [30] ดังลักษณะที่ปรากฏในรูปที่ 4.8 และตารางที่ ง-1 (ภาคผนวก ง)



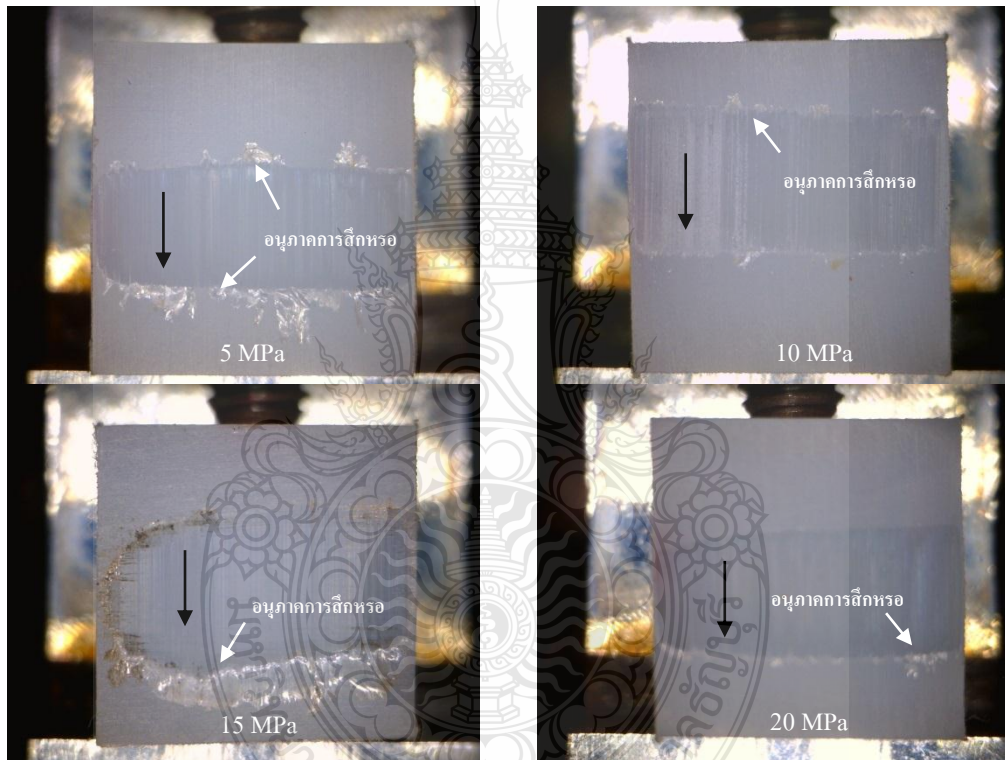
ก) ชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



ข) อัศจรรย์รูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดองอุณหภูมิ 30 นาที
รูปที่ 4.8 แสดงรอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัศจรรย์รูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ

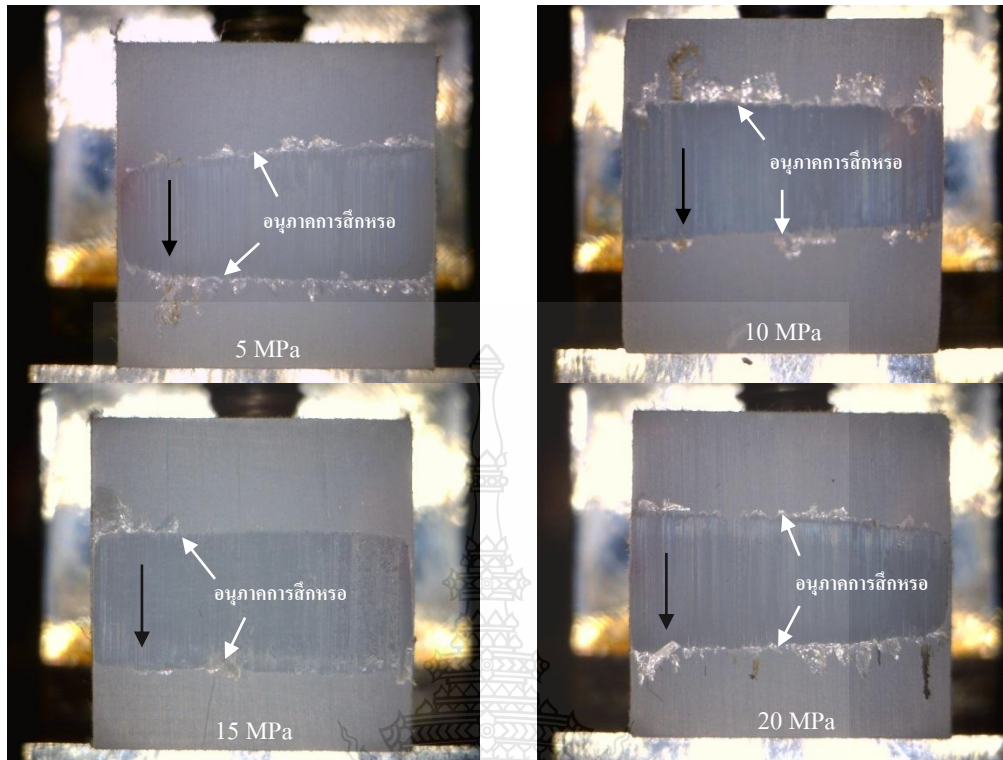


ข) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดึงอุณหภูมิ 30 นาที



ค) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดึงอุณหภูมิ 30 นาที

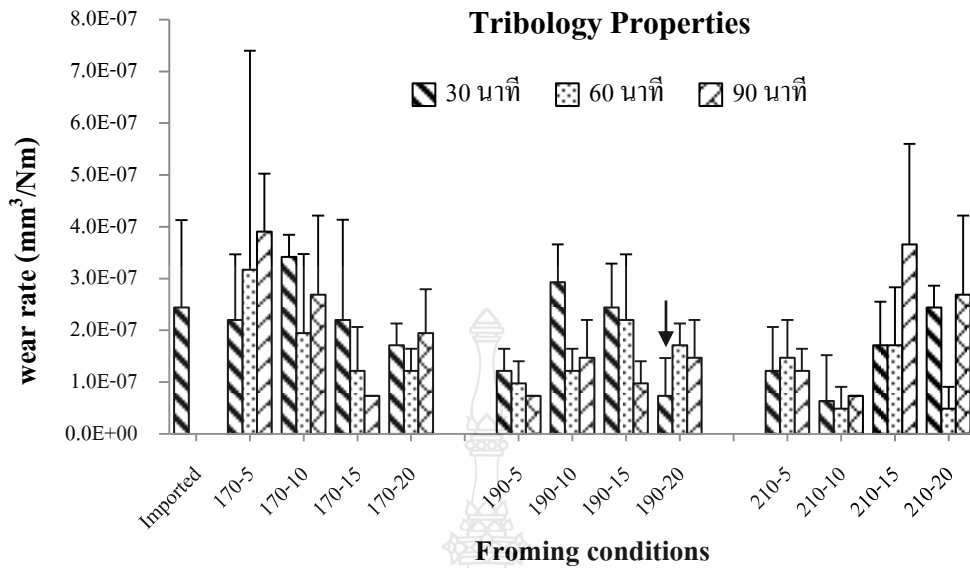
รูปที่ 4.8 แสดงรอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ (ต่อ)



ง) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 210 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดังอุณหภูมิ 30 นาที
รูปที่ 4.8 แสดงรอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ (ต่อ)

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE และ UHMWPE Composite [30-33] อนุภาคการสึกหรอที่ปรากฏนี้เกิดขึ้นจากการพฤติกรรมถ่ายโอนเนื้อพอลิเมอร์ (Polymer Transfer) และการสลายตัว (Degradation) ของพอลิเมอร์ที่มีสาเหตุมาจากการแตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ (การล้าตัวของพอลิเมอร์ (Polymer Fatigue) หรือ การขัดถูที่เกิดจากการตัดเฉือนระดับไมโครของจุดปลายความหยาบพื้นผิวของพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัส (Abrasive Micro Cutting of Roller Counterface Asperity)) แล้วเกิดการสะสมตัวบริเวณขอบรอยสึกหรอตามทิศทางการไหลของลูกกลิ้งคู่สัมผัสจากการทดสอบการสึกหรอ

แต่เมื่อทำการวิเคราะห์สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดังอุณหภูมิต่างๆที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูป พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ 190 °C มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าสภาวะอุณหภูมิกวามร้อนอื่นๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.9



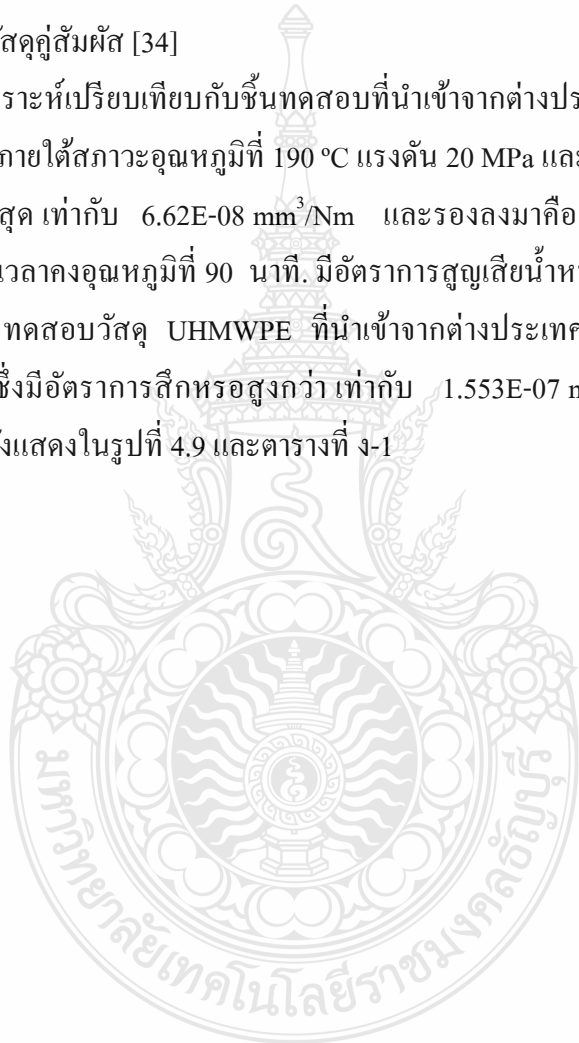
รูปที่ 4.9 อัตราการสึกหรอและความหยาบผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที พบการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 1648 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของหมู่ vinyl (C=C) ที่ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีอัตราการสึกหรอต่ำสุด ซึ่งพีคเหล่านี้ไม่ปรากฏในพจนานุกรม UHMWPE บริสุทธิ์และวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และนอกจากนี้ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ยังพบพีคที่ 2310 cm^{-1} และ 2019 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$) ที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ และพบพีคที่ 1855 cm^{-1} ที่เป็นสัญญาณการสันของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ทำการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำ จะมีค่าความแข็งแรงลดลงตาม แต่จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูง ส่งผลให้วัสดุพอลิเมอร์มีความเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคมีการหลอมละลายรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันหรืออนุภาค UHMWPE มีการเกาะยึดติดกันได้สมบูรณ์ดีและความหนาแน่นของวัสดุ UHMWPE ที่สูงยังส่งผลทำให้มีอัตราการสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับ

แนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujee K. Sinha [34] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์ที่มีค่า Ultimate Tensile Strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-Crystalline Microstructure) เพราะค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ จะหมายถึง ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไถลมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นบางๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส [34]

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิที่ 30 นาที มีอัตราการสึกหรอต่ำสุด เท่ากับ $6.62E-08 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ และรองลงมาคือ สภาวะอุณหภูมิที่ 190 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิที่ 90 นาที. มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักต่ำสุด เท่ากับ $6.63E-08 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ซึ่งก่อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีอัตราการสึกหรอเท่ากับ $2.21E-07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ซึ่งมีอัตราการสึกหรอสูงกว่า เท่ากับ $1.553E-07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ และ $1.552E-07 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ ง-1



บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

จากการดำเนินงานวิจัยเพื่อหาสภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิที่เหมาะสม สำหรับการอัดขึ้นรูปรีออนแผ่น จากผง UHMWPE บริสุทธิ์ โดยพิจารณาจากสมบัติทางกลดีที่สุดและความต้านทานการสึกหรอต่ำที่สุด หลังจากดำเนินการทดลองขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปรีออน (Hot Compression Mold) ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีผลการทดสอบต่างๆ ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี

เอกลักษณ์ทางเคมี ด้วยเทคนิค FTIR

จากการศึกษาค้นคว้าสืบค้นข้อมูล IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่า มีการแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ $2891-2844\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1472 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ bending ในสายโซ่พอลิเมอร์ และที่ $690-900\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งงออยู่นอกระนาบของสายโซ่พอลิเมอร์ [25]

เมื่อกล่าวถึงการวิเคราะห์ทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีของพอลิเมอร์ด้วย IR Spectrum พบว่า สามารถนำไปเชื่อมโยงถึงการศึกษากการเสื่อมสภาพหรือการสลายตัวของพอลิเมอร์ (Degradation of Polymer) ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ประกอบด้วย อุณหภูมิ แสงรังสี และสารเติมแต่งบางชนิด ถ้าพอลิเมอร์ได้รับปัจจัยเหล่านี้เข้าไปแล้ว จะทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น

จากการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบ IR Spectrum ของชิ้นงานตัวอย่าง UHMWPE กับ IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่า การเสื่อมสภาพของ UHMWPE ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพีคแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานดังต่อไปนี้ [26-27]

1. พีคที่ $2000-2600\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$) ที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์
2. พีคที่ $1850-1700\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์

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

4. ที่ 910 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ terminal vinyl ($-\text{CH}=\text{CH}_2-$) ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ และการถูกตัดภายในสายโซ่พอลิเมอร์

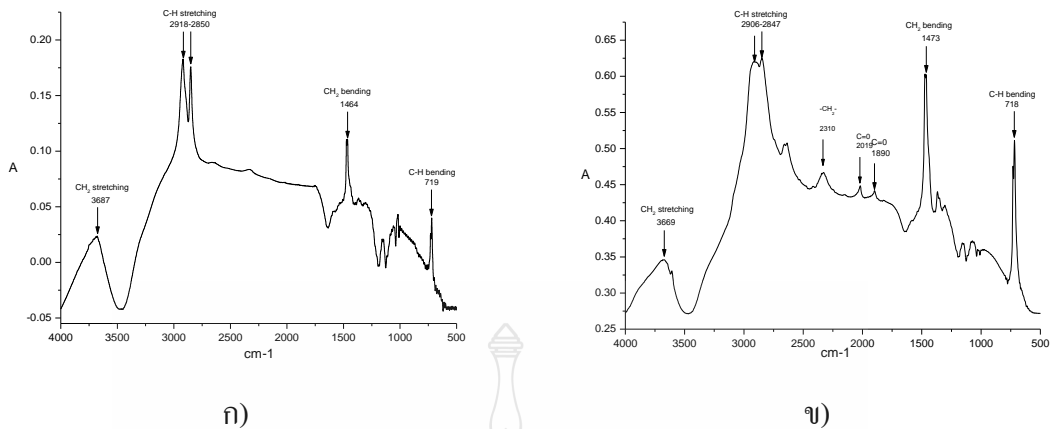
สำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของก้อนขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ด้วยเครื่องฟูลเรียทรานฟอรัมอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Frontier ของสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยทำการเปรียบเทียบกับขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและผง UHMWPE บริสุทธิ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ผงบริสุทธิ์ UHMWPE

ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของผง UHMWPE บริสุทธิ์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดผสมกับเม็ดเล็กๆ และมีสีขาวปุ่นสำหรับรายละเอียดผลการวิเคราะห์ IR Spectrum ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3687 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ stretching, ที่ $2918-2850\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่ 1464 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ bending และที่ 719 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สอดคล้องตรงกับ IR Spectrum มาตรฐานของ UHMWPE [14-15]

2) แผ่นขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

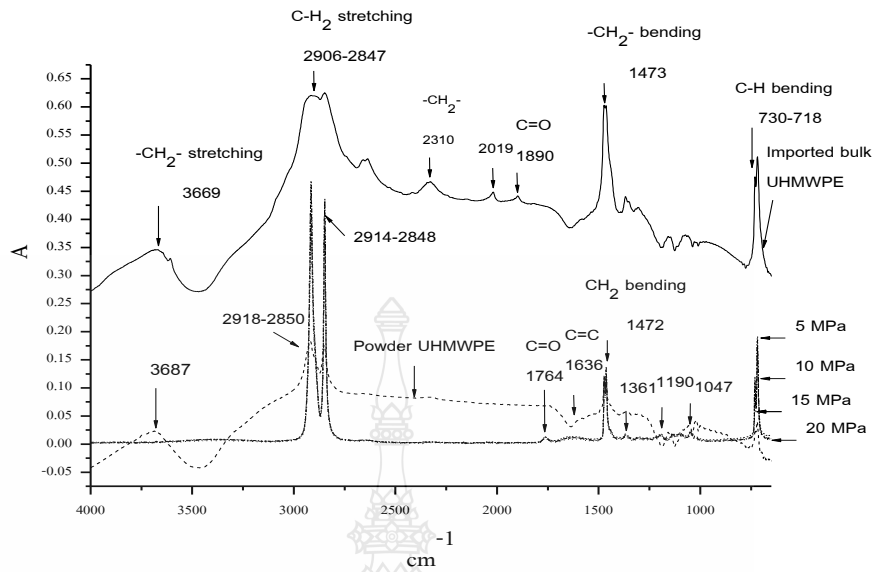
สำหรับแผ่นขึ้นทศสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้มีลักษณะเป็นแบบแผ่น ขนาดความกว้าง 15 มม. ความยาว 52 มม. และความหนา 10 มม. จากกระบวนการอัดขึ้นรูปรีออน มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 4.0 กรัม/โมล ผิวมันวาวและสีขาวปุ่นเข้ม สำหรับรายละเอียดผลการวิเคราะห์ IR Spectrum ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3669 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ stretching, ที่ $2906-284\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่ 2310, 2019 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$) ที่เกิดการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และที่ 1855 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl ($\text{C}=\text{O}$) ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1473 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ $-\text{CH}_2-$ bending, และที่ $730-718\text{ cm}^{-1}$ เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งอยู่นอกกระนาบของสายโซ่พอลิเมอร์ [14]



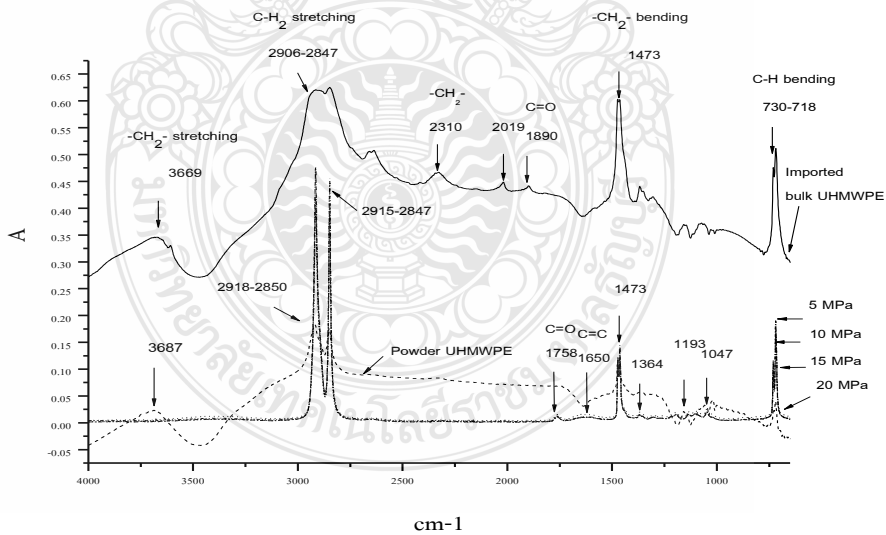
รูปที่ 4.1 IR Spectrum: ก) ผง UHMWPE บริสุทธิ์ ข) แผ่นวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

3) แผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน

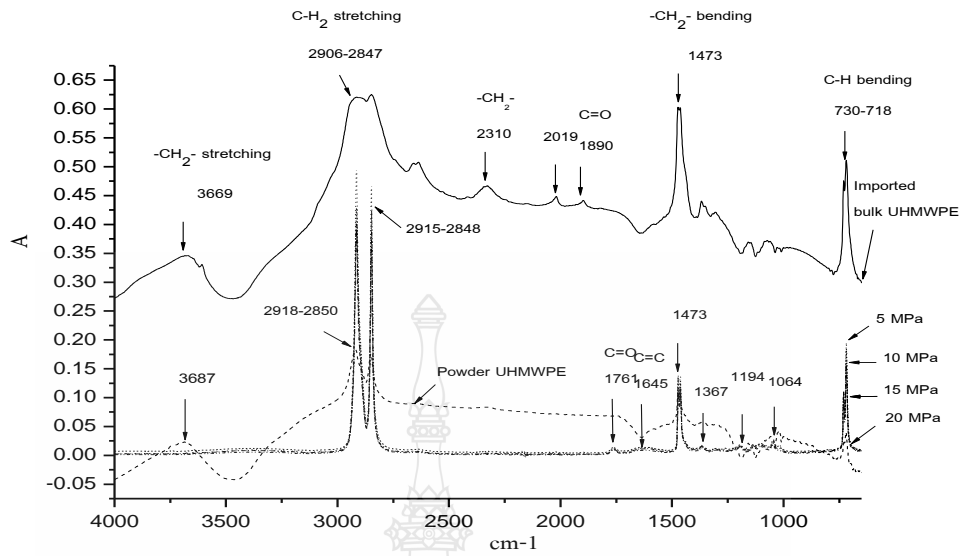
ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของก้อนขึ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิความร้อน 170, 190 และ 210 °C ระดับแรงดันที่ 5, 10, 15 และ 20 MPa และระยะเวลาคงอุณหภูมิ 30, 60 และ 90 นาที จากการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี พบว่า ขึ้นทดสอบส่วนใหญ่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 2914-2848 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่ 1758-1764 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของขึ้นทดสอบ จึงทำให้ค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง, ที่ 1616-1654 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl (C=C) ซึ่งแสดงการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ [15], ที่ 1464-1473 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ -CH₂- bending, ที่ 730-717 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending และที่เกิดการดูดพลังงานขึ้นเพิ่มเล็กน้อยที่ 1361, 1190, 1047 cm^{-1} แต่ไม่มีสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene (-CH₂-stretching) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับผลงานวิจัยของ F.S. Senator Et.al ที่การทดลองอัดขึ้นรูปขึ้นงานภายใต้สภาวะแรงดัน 75 MPa อุณหภูมิ 160 °C และเวลาคงอุณหภูมิ 50 นาที ที่แสดงผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของวัสดุ UHMWPE พบว่า การดูดกลืนพลังงานคล้ายกัน เนื่องจากเป็นขึ้นทดสอบที่ไม่ได้ผสมสารตัวเติม ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับ UHMWPE ผสมอลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) [16] และพบว่า ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amanda L. Forster, al.et ที่ศึกษาความเสถียรของเส้นใย UHMWPE เนื่องจากพบการดูดกลืนพลังงานที่ 1713, 1737 cm^{-1} เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ [19]



รูปที่ 4.2 เอกลักษณ์ทางเคมีของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 170 °C แรงดันระดับต่างๆและเวลาลงอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับขึ้น ทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



รูปที่ 4.3 เอกลักษณ์ทางเคมีของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 190 °C แรงดันระดับต่างๆและเวลาลงอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับขึ้น ทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



รูปที่ 4.4 เอกลักษณ์ทางเคมีของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ อุณหภูมิ 210 °C แรงดันระดับต่างๆและเวลาดังอุณหภูมิ 30 นาที เปรียบเทียบกับชิ้น ทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของขึ้นทดสอบ วัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
Imported bulk UHMWPE	3669	2906-2847	1473	730-718	1855	—	Peak 2310-2019 เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1855 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
UHMWPE Powder	3687	2918-2850	1464	719	—	—	—
170-5-30		2915-2848	1472	730-718	1761	1647	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1647 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-10-30		2914-2848	1472	730-718	1764	1636	Peak 1764 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินฟราเรดของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
170-15-30		2915-2848	1472	730-718	1761	1618	Peak 1764 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-20-30		2915-2848	1472	730-718	1764	1647	Peak 1764 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1647 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-5-30		2914-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-10-30		2915-2847	1473	730-718	1758	1654	Peak 1758 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1654 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-15-30		2915-2848	1473	730-718	1758	1654	Peak 1758 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1654 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-20-30		2914-2848	1472	730-718	1761	1648	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1648 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-5-30		2914-2848	1472	730-718	1764	1636	Peak 1764 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-10-30		2915-2848	1472	730-718	1764	1647	Peak 1764 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1647 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-15-30		2915-2848	1472	730-718	1761	1623	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1623 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินฟราเรดของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm^{-1})						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
210-20-30		2914-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-5-60		2915-2848	1473	730-718	1758	1636	Peak 1758 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-10-60		2914-2847	1472	730-718	1761	1618	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-15-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-20-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-5-60		2915-2848	1473	730-718	1758	1636	Peak 1758 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-10-60		2914-2847	1472	730-718	1761	1618	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-15-60		2915-2848	1472	730-718	1758	1636	Peak 1758 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-20-60		2914-2848	1472	730-717	1761	1616	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1616 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินฟราเรดของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
210-5-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1619	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1619 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-10-60		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-15-60		2915-2848	1472	730-718	1761	1636	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-20-60		2914-2847	1472	730-718	1761	1637	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-5-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-10-90		2914-2847	1472	730-718	1761	1617	Peak 1761 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1616 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-15-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1636	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1636 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
170-20-90		2914-2847	1472	730-718	1762	1616	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1616 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-5-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของอินทราสเปกตรัมของวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ (ต่อ)

Sample / Forming condition	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm ⁻¹)						หมายเหตุ
	-CH ₂ - stretching	C-H stretching	-CH ₂ - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
190-10-90		2915-2848	1472	730-718	1762	1617	Peak 1762 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1654 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-15-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
190-20-90		2915-2848	1472	730-718	1762	1617	Peak 1762 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-5-90		2914-2847	1472	730-718	1761	1617	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-10-90		2914-2848	1472	730-718	1761	1618	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1618 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-15-90		2914-2848	1472	730-717	1761	1637	Peak 1761 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
210-20-90		2914-2848	1472	730-717	1762	1617	Peak 1762 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1617 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล

การศึกษาวินิจฉัยสมบัติทางกายภาพของวัสดุอ่อน UHMWPE ที่ประกอบด้วยการศึกษาวินิจฉัยปริมาณความเป็นผลึก (Degree of Crystallinity) ความหนาแน่น และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค DSC

สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ยี่ห้อ PERKIN ELMER รุ่น DSC 7 ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 0-210 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating Rate) 10 °C/min, ค่า Enthalpy มาตรฐานสำหรับวัสดุ UHMWPE มีค่า $\Delta H = 291$ จูล/กรัม ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทดสอบมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยแผ่นชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะอุณหภูมิ 210 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาดังอุณหภูมิ 30 นาที ซึ่งมีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 40.08 % รองลงมาคือ สภาวะอุณหภูมิ 170 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาดังอุณหภูมิ 30 นาที มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 39.52 % เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบว่า มีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.51 % ซึ่งมีปริมาณความเป็นผลึกน้อยกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศอยู่ 13.43 %

4.2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบความหนาแน่นด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ AND รุ่น HR-200 ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา พบว่า แผ่นชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดังอุณหภูมิต่างๆ มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.9532-1.0549 g/cm³ และส่วนใหญ่มีความหนาแน่นสูงกว่าแผ่นชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.0048 g/cm³ ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.2

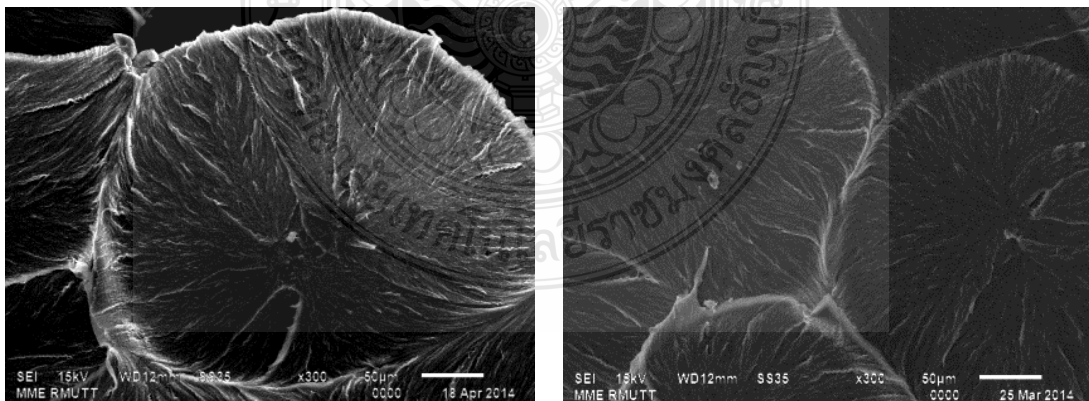
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

Sample / Forming condition	Degree of crystallinity, χ (%)	Density, ρ (g/cm ³)		Yield Strength, σ_y (MPa)		Ultimate Strength, σ_u (MPa)		Elongation, ϵ (MPa)		Hardness (Shore D)	
		Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
Imported bulk UHMWPE	53.51	1.0048	0.0034	13.2	1.92	17.1	4.32	436.4	15.5	60.60	1.04
170-5-30	39.52	1.0253	0.0177	18.6	1.62	25.7	0.33	488.7	29.9	53.57	0.73
170-10-30	36.65	1.0125	0.0303	18.6	5.00	25.4	4.86	523.4	11.2	52.10	1.09
170-15-30	35.01	1.0259	0.0434	19.3	4.62	24.9	4.52	492.1	12.0	51.87	1.11
170-20-30	36.01	0.9965	0.0129	18.5	1.55	24.4	2.21	495.9	29.7	51.53	1.50
190-5-30	36.50	1.0059	0.0060	14.9	2.82	21.3	2.58	489.9	26.0	51.77	1.01
190-10-30	37.71	1.0023	0.0111	19.4	5.78	23.1	4.91	431.2	73.9	52.20	1.71
190-15-30	36.43	0.9891	0.0108	16.2	2.50	22.3	3.13	516.5	20.9	51.53	0.90
190-20-30	37.56	1.0027	0.0117	19.1	6.42	23.7	6.12	460.5	26.1	51.57	1.68
210-5-30	37.75	0.9802	0.0127	16.4	1.40	24.0	1.64	504.9	21.9	52.23	0.97
210-10-30	37.68	1.0190	0.0149	16.2	5.69	19.9	4.84	422.8	78.2	51.90	1.24
210-15-30	36.43	1.0009	0.0208	13.6	2.80	16.8	3.00	482.3	10.7	51.67	0.84
210-20-30	40.08	0.9857	0.0385	19.5	3.60	24.5	3.96	436.4	84.9	51.60	1.77
170-5-60	36.93	0.9532	0.0432	16.1	1.85	23.6	1.53	486.7	12.5	53.40	0.86
170-10-60	35.94	1.0549	0.0037	16.9	3.06	21.0	4.76	460.3	29.7	51.23	1.17
170-15-60	37.83	1.0182	0.0123	19.6	0.15	25.7	0.40	494.9	17.0	50.87	1.31
170-20-60	36.17	0.9800	0.0095	19.2	5.51	22.3	1.73	383.5	116	51.27	1.31
190-5-60	36.71	1.0039	0.0183	16.5	1.53	21.5	1.49	514.7	9.9	52.70	0.75
190-10-60	37.69	1.0171	0.0228	15.6	0.17	19.7	0.57	511.4	17.1	51.13	0.94
190-15-60	36.93	1.0393	0.0133	16.6	2.42	23.3	0.71	491.8	10.2	52.27	1.14
190-20-60	37.18	1.0170	0.0401	17.8	3.16	21.9	4.25	448.3	46.9	50.67	1.06
210-5-60	36.48	0.9728	0.0108	15.3	3.00	22.6	4.09	467.9	42.6	53.70	0.84
210-10-60	35.23	1.0065	0.0079	14.1	2.16	21.5	1.62	499.0	22.3	53.23	1.28
210-15-60	37.07	0.9958	0.0219	19.6	4.19	25.2	4.49	438.5	63.1	53.13	1.20
210-20-60	38.18	0.9958	0.0234	18.5	8.18	23.1	5.74	438.2	60.4	52.83	1.37
170-5-90	36.97	1.0108	0.0060	19.5	1.32	25.9	1.33	492.9	33.9	52.13	0.57
170-10-90	37.24	1.0203	0.0190	14.7	1.61	19.2	2.86	475.2	21.7	52.30	1.15
170-15-90	37.07	0.9955	0.0228	17.7	1.47	23.5	1.75	481.6	29.1	51.43	0.90
170-20-90	36.89	0.9809	0.0413	9.67	3.12	17.1	3.47	495.5	24.8	51.13	1.57
190-5-90	37.67	1.0053	0.0081	17.8	2.80	21.9	3.71	526.2	14.2	52.33	0.96
190-10-90	36.02	1.0188	0.0093	17.4	4.56	22.0	4.54	508.4	13.1	51.50	0.97
190-15-90	36.60	0.9955	0.0159	16.0	1.96	23.8	0.66	497.4	10.2	52.20	1.06
190-20-90	36.79	0.9896	0.0176	14.6	0.35	18.1	0.41	482.9	9.83	51.50	1.50
210-5-90	37.96	0.9717	0.0183	11.3	0.26	17.1	0.69	456.1	10.2	53.63	0.72
210-10-90	36.73	0.9884	0.0232	16.3	1.10	22.0	1.55	457.0	33.9	51.93	1.08
210-15-90	38.60	0.9809	0.0679	9.73	4.23	18.2	3.09	496.2	25.0	53.43	1.25
210-20-90	36.99	0.9801	0.0074	14.3	0.58	21.6	1.42	499.2	14.7	52.67	1.09

4.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

สำหรับในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510 ของภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งหมดมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or Flake Pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ที่เกิดจากการเชื่อมต่อประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆและผงละเอียด ซึ่งถูกกดอัดด้วยแรงดันของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนให้เกิดการเชื่อมติดกันภายใต้อุณหภูมิความร้อน แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ และทำให้เกิดการยื่นตัวทันทีในระหว่างการอัดขึ้นรูปภายในแม่พิมพ์ ที่ผ่านระบบหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 25 °C อัตราการไหล 3 ลิตร/นาที เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเชื่อมต่อประสานของผงอนุภาค UHMWPE เปรียบเทียบกับสมบัติของ UHMWPE ที่ไม่มีจุดไหลตัวและหลอมละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พบว่า มีลักษณะคล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดสาคู [17-18]

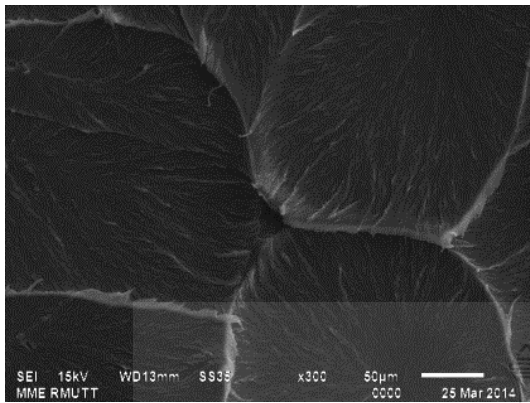
เมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ พบว่า ชิ้นทดสอบมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบแผ่น ซึ่งคล้ายกันและพบช่องว่างที่เกิดภายในโครงสร้างของการเกาะยึด (ลูกศรสีขาว) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ง) ก้อนชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ



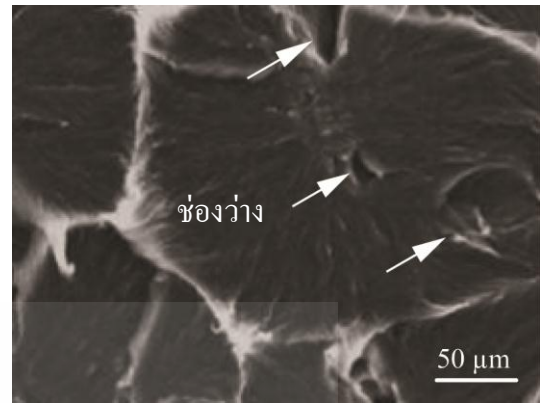
ก) 170 °C-15 MPa-60 นาที

ข) 90 °C-15 MPa-30 นาที

รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับแผ่นชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ



ค) 210 °C-20 MPa-90 นาที



ง) Imported Bulk UHMWPE

รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับก้อนชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)

4.2.4 การวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึง

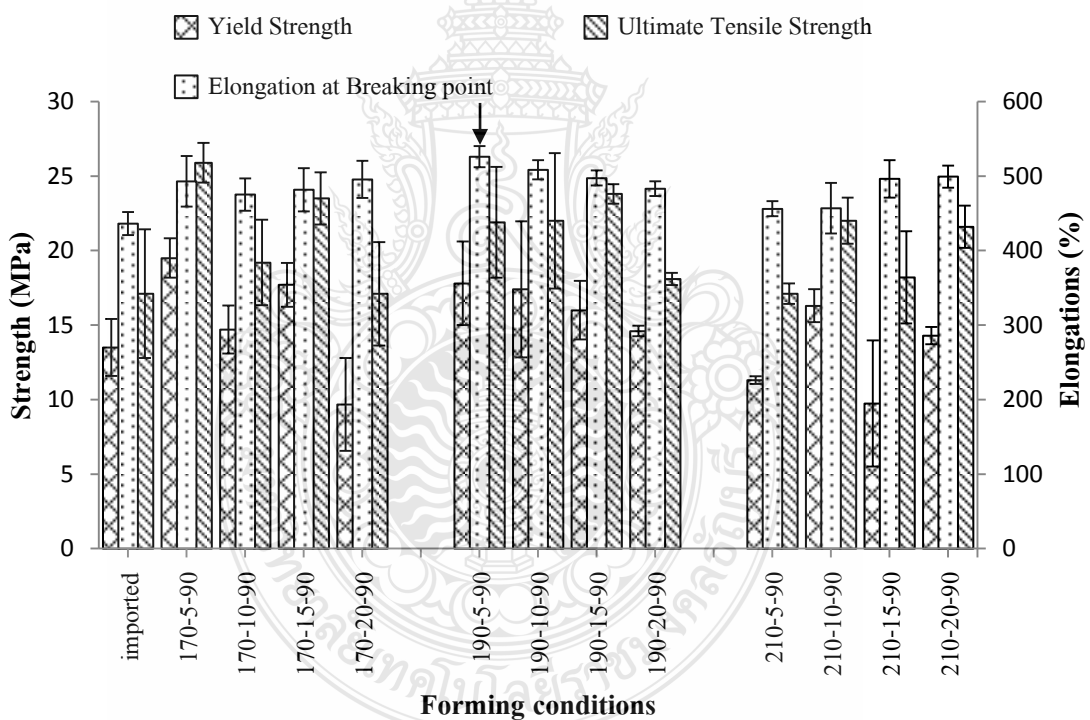
จากการวิเคราะห์สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ณ ห้องปฏิบัติการโทรโพลีอูตสาหกรรมการผลิต หน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พบว่า ชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีค่าความเค้นคราก (Yield Strength) ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด (Elongation at Breaking Point) ซึ่งมีค่าสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ ดังกราฟผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงผลให้เห็นว่าสภาวะการอัดขึ้นรูปร้อนที่ต่างกันมีผลทำให้ได้สมบัติทางกลต่างกัน โดยชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 90 นาที (ลูกศรสีดำ) มีค่าความเค้นคราก 17.80 ± 3.96 MPa ความเค้นแรงดึงสูงสุด 21.92 ± 5.24 MPa และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดคือ 526.68 ± 20.01 % สำหรับชิ้นทดสอบแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีค่าเท่ากับ 13.50 ± 1.62 MPa 17.06 ± 4.32 MPa และ 436.41 ± 15.50 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าทดสอบแรงดึงต่ำกว่าถึง 24.16, 22.17 และ 17.14 % ตามลำดับ

4.2.5 การวิเคราะห์ความแข็ง

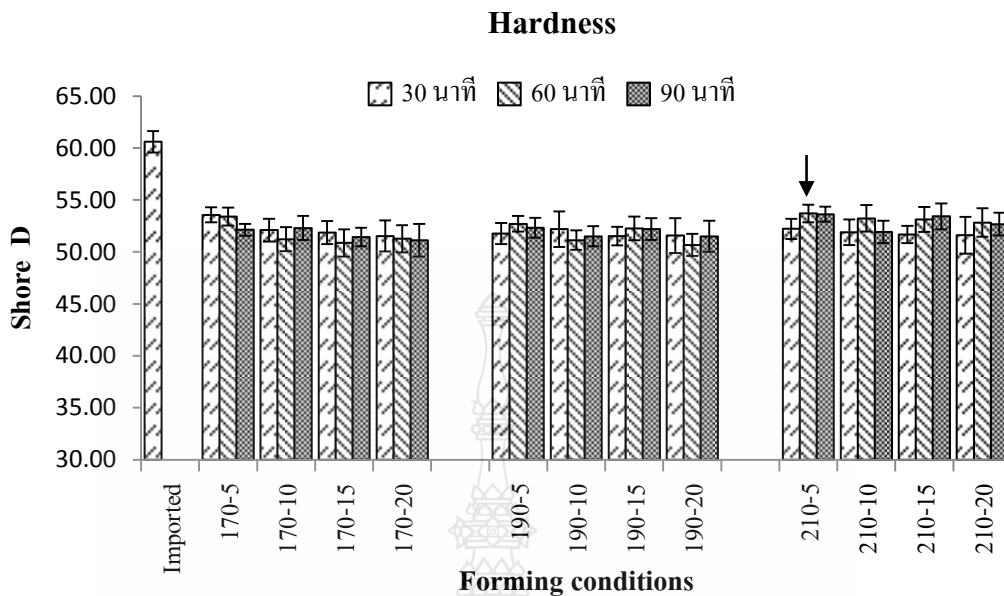
สำหรับการวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งคูโรมิเตอร์ ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D สำหรับชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนในสภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาคงอุณหภูมิต่างๆ พบว่า มีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน

อยู่ในช่วง 52-54 Shore D โดยมีสภาวะอุณหภูมิ 210 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาดองอุณหภูมิ 60 นาที มีความแข็งสูงสุดคือ 54 Shore D ซึ่งมีค่าความแข็งต่ำกว่าชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ อยู่ที่ 7 Shore D ดังกราฟการวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบค่าความแข็งที่แสดงในรูปที่ 4.7

เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลเอกลักษณะทางเคมี IR Spectrum และปริมาณความเป็นผลึก พบว่า ชั้นทดสอบที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกต่ำและค่าความแข็งลดลง ส่งผลทำให้มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาค พบว่า ชั้นทดสอบที่มีการเกิด Cross-Link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลทำให้การเชื่อมต่อประสานหรือมีการหลอมละลายรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันหรืออนุภาค UHMWPE มีการเกาะยึดติดกันได้สมบูรณ์ดี ส่งผลทำให้ชั้นทดสอบมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวและความเหนียวสูง [14-15] ดังรายละเอียดการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพกับสมบัติทางกลที่แสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดองอุณหภูมิ 90 นาที เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ



รูปที่ 4.7 ความแข็งชนทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดองอุณหภูมิสถานะต่างๆ เปรียบเทียบกับชนทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

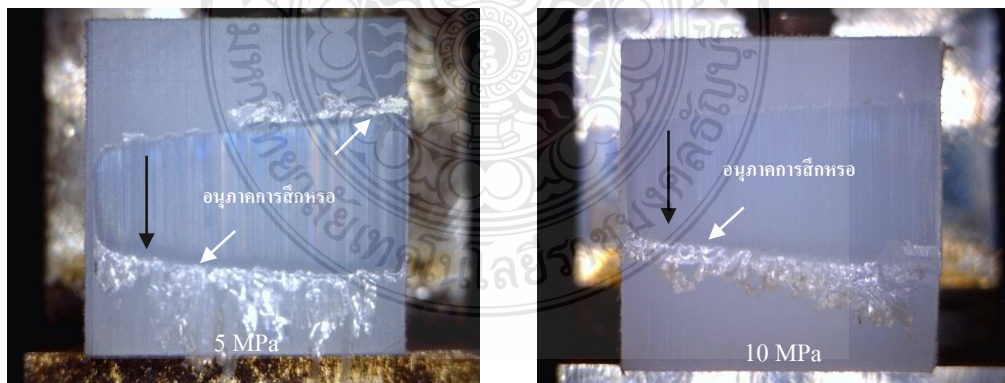
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกลไกการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ตามหลักมาตรฐาน ASTM G77 ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ณ ห้องปฏิบัติการไทโรโบลียอุตสาหกรรมการผลิต หน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน นครราชสีมา หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบด้วยระยะทางการทดสอบ 10 กิโลเมตร หรือคิดเป็นระยะเวลา 555 นาที พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดแสดงอนุภาคการสึกหรอ (Wear Debris) สะสมตัวอยู่บริเวณขอบรอยสึกหรอ (ลูกครีสีขาว) ตามทิศทางการไถล (ลูกครีสีดำ) ของวงแหวนวัสดุคู่สัมผัส โดยชิ้นทดสอบวัสดุแผ่น UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ มีขนาดพื้นที่รอยสึกหรอและปริมาณการสะสมตัวของอนุภาคการสึกหรอมากที่สุด ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.8 และตารางที่ ง-1 (ภาคผนวก ง) และนอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความหยาบพื้นผิวของรอยสึกหรอ พบว่า บริเวณพื้นผิวของรอยสึกหรอยังปรากฏพื้นผิวที่มีลักษณะหยาบและบาง บริเวณมีลักษณะเป็นร่องที่เกิดจากการไถครูดเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ ส่งผลให้สามารถสันนิษฐานรูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ได้ว่าเป็นการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear) ที่เกิดจากการถ่ายโอนเนื้อพอลิเมอร์ไปยังพื้นผิววงแหวนคู่สัมผัสและเกิดการเกาะยึดติดแน่นบนพื้นผิววงแหวนที่

เรียกว่า การถ่ายโอนเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์ (Polymer Transfer Film) ที่มีลักษณะเป็นชั้นเยื่อที่มีความบางมากและเหนียวบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส โดยชั้นเยื่อบางๆของพอลิเมอร์สามารถช่วยลดการสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์หลังช่วงเวลาเริ่มต้นเกิดการสึกหรอ [29] และเมื่อชั้นทดสอบผ่านการทดสอบด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ชั้นเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์เกิดการสะสมตัวจนมีความหนาเพิ่มขึ้นและเนียนจึ๊กพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่เกิดการเกาะยึดประสานติดกันออกจากชั้นทดสอบ ส่งผลให้พื้นผิวชั้นทดสอบบางบริเวณเกิดเป็นรอยหยาบขรุขระ และในช่วงเวลาเดียวกันนี้บางบริเวณของพื้นผิววงแหวนเกิดการสะสมตัวของเนื้อพอลิเมอร์ที่ฉีกออกมาจากชั้นทดสอบก่อตัวเป็นก้อนนูน (Lumpy) ยึดเกาะติดแน่นและยื่น โผล่พ้นออกมาจากพื้นผิววงแหวนทำให้เกิดการไถครูดลงไปเนื้อพอลิเมอร์ในระหว่างที่มีการไถลสัมผัสของวงแหวนกับชั้นทดสอบส่งผลให้เกิดเป็นร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ [30] ดังลักษณะที่ปรากฏในรูปที่ 4.8 และตารางที่ ง-1 (ภาคผนวก ง)

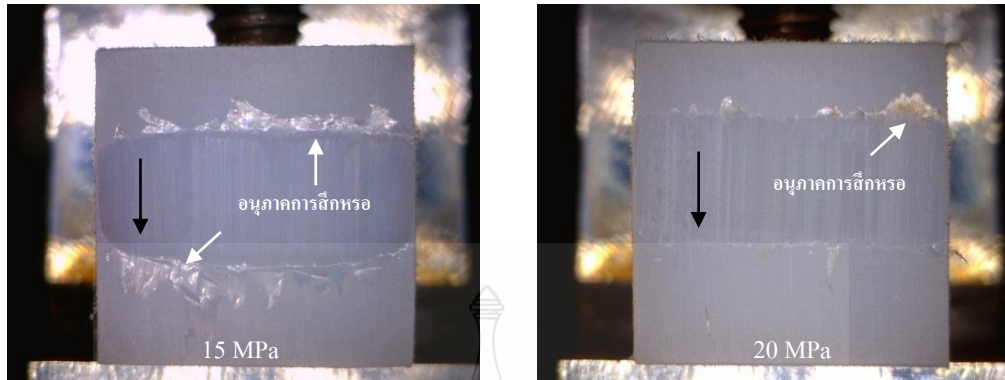


ก) ชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

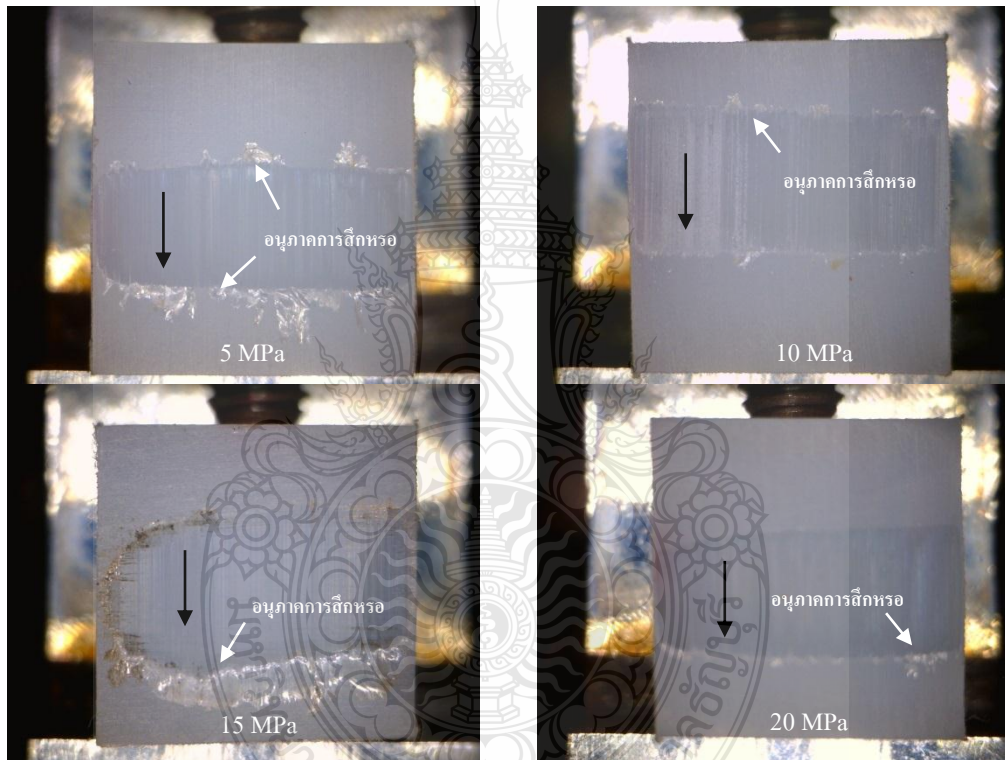


ข) อัศจรรย์รูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที

รูปที่ 4.8 แสดงรอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัศจรรย์รูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ

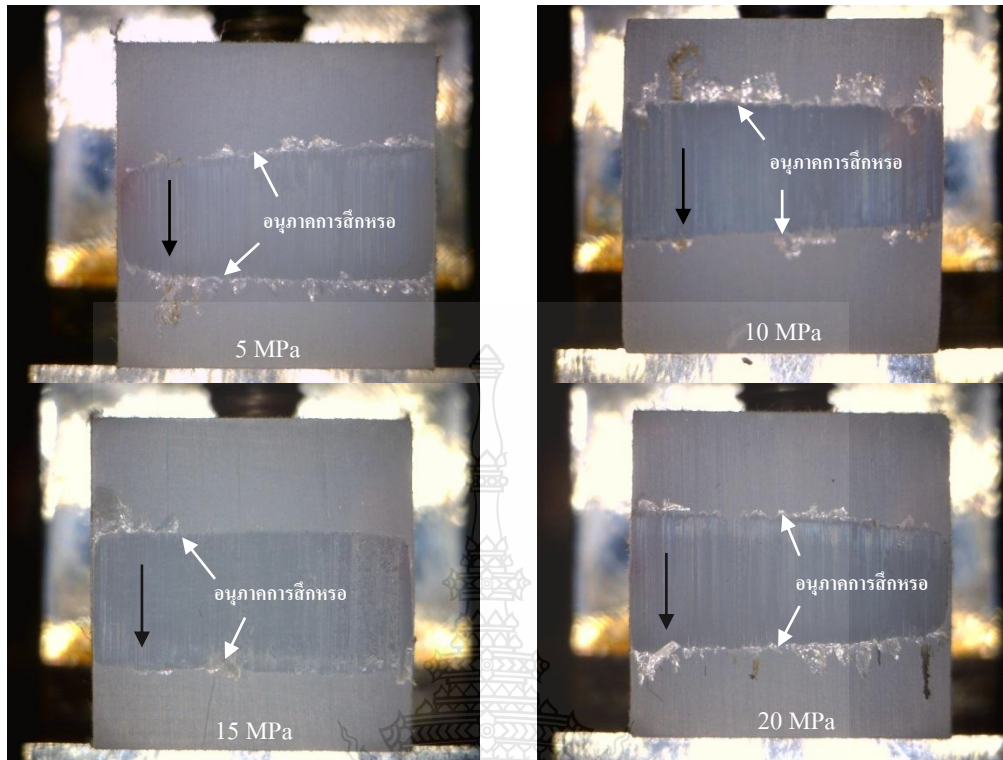


ข) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดึงอุณหภูมิ 30 นาที



ค) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดึงอุณหภูมิ 30 นาที

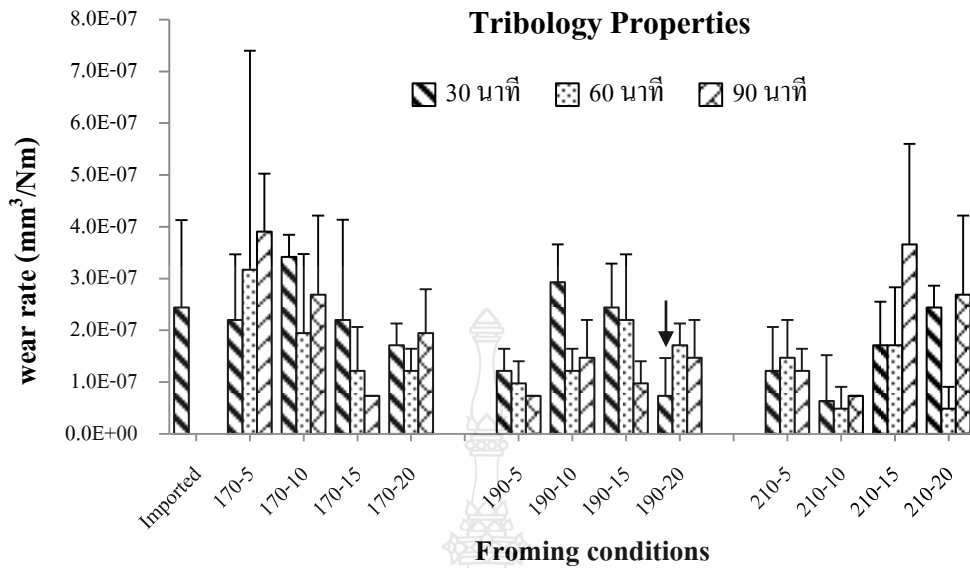
รูปที่ 4.8 แสดงรอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ (ต่อ)



ง) อัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 210 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดังอุณหภูมิ 30 นาที
รูปที่ 4.8 แสดงรอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ (ต่อ)

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE และ UHMWPE Composite [30-33] อนุภาคการสึกหรอที่ปรากฏนี้เกิดขึ้นจากการพฤติกรรมถ่ายโอนเนื้อพอลิเมอร์ (Polymer Transfer) และการสลายตัว (Degradation) ของพอลิเมอร์ที่มีสาเหตุมาจากการแตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ (การล้าตัวของพอลิเมอร์ (Polymer Fatigue) หรือ การขจัดที่ เกิดจากการตัดเฉือนระดับไมโครของจุดปลายความหยาบพื้นผิวของพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัส (Abrasive Micro Cutting of Roller Counterface Asperity) แล้วเกิดการสะสมตัวบริเวณขอบรอยสึกหรอตามทิศทางการไหลของลูกกลิ้งคู่สัมผัสจากการทดสอบการสึกหรอ

แต่เมื่อทำการวิเคราะห์สภาวะอุณหภูมิ แรงดันและเวลาดังอุณหภูมิต่างๆที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูป พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ 190 °C มีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าสภาวะอุณหภูมิกวมนอื่นๆ ที่แสดงในรูปที่ 4.9



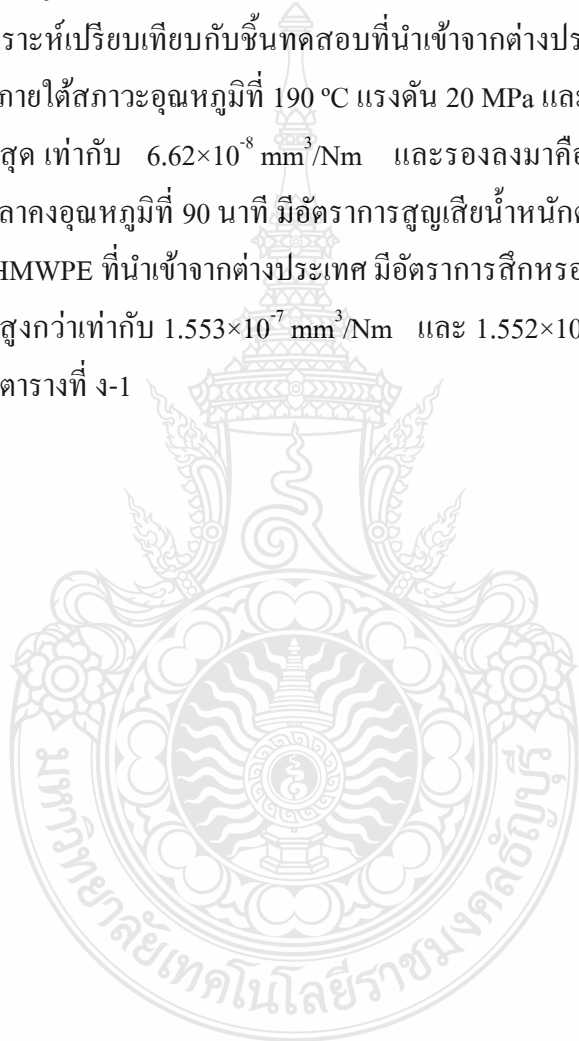
รูปที่ 4.9 อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR Spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 นาที พบการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 1648 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของหมู่ vinyl (C=C) ที่ส่งผลให้ชิ้นทดสอบมีอัตราการสึกหรอต่ำสุด ซึ่งพีคเหล่านี้ไม่ปรากฏในพจนานุกรม UHMWPE บริสุทธิ์และแผ่นวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ และนอกจากนี้ชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ยังพบพีคที่ 2310 cm^{-1} และ 2019 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$) ที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ และพบพีคที่ 1855 cm^{-1} ที่เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ทำการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำ จะมีค่าความแข็งลดลงตาม แต่จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวสูง ส่งผลให้วัสดุพอลิเมอร์มีความเหนียวเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโครงสร้างจุลภาคมีการหลอมละลายรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันหรืออนุภาค UHMWPE มีการเกาะยึดติดกัน ได้สมบูรณ์ดีและความหนาแน่นของวัสดุ UHMWPE ที่สูงยังส่งผลทำให้มีอัตราการสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha [34] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์

ที่มีค่า Ultimate Tensile Strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอ สูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-Crystalline Microstructure) เพราะค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ จะหมายถึงค่าความเค้นเหนือนที่เกิดขึ้นจากการไถลมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นบางๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส [34]

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาดงอุณหภูมิที่ 30 นาที มีอัตราการสึกหรอต่ำสุด เท่ากับ $6.62 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ และรองลงมาคือ สภาวะอุณหภูมิที่ 190 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาดงอุณหภูมิที่ 90 นาที มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักต่ำสุดที่ $6.63 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ซึ่งชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีอัตราการสึกหรอเท่ากับ $2.21 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ซึ่งมีอัตราการสึกหรอสูงกว่าเท่ากับ $1.553 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ และ $1.552 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และตารางที่ ง-1



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของก้อนวัสดุ UHMWPE จากการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Compression Molding Process) ภายใต้อุณหภูมิ 170-210 °C แรงดัน 5-20 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30-90 นาที โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอ สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกลและการสึกหรอ โดยทำการเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เอกลักษณะทางเคมีของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่ พบว่ามีการดูดกลืนพลังไปในแนวเดียวกัน แต่ไม่มีสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ($-\text{CH}_2-$ stretching) เหมือนกัน ซึ่งแตกต่างจากชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศและผง UHMWPE บริสุทธิ์ เนื่องจากพบว่า การสั่นที่พิกัดสัญญาณ 3669 cm^{-1} และ 3687 cm^{-1} ตามลำดับ

2) สมบัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่ พบว่า มีจุดหลอมเหลวของวัสดุ UHMWPE เจลี่ยอยู่ $137.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีสภาวะอุณหภูมิที่ $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ แรงดัน 20 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 นาที มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดคือ 40.08 % ซึ่งมีปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศอยู่ 13.43 %

3) ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่ โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบแผ่นหรือแบบเกล็ดที่เกิดจากการเชื่อมต่อประสานติดกันของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ที่มีลักษณะการเชื่อมต่อประสานคล้ายเม็ดสาคุ ซึ่งคล้ายกันกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

4) ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง $0.9041-1.0588\text{ g/cm}^3$ ส่วนชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.0048 g/cm^3

5) ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีผลความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 52-54 Shore D โดยมีสภาวะอุณหภูมิ $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ แรงดัน 5 MPa และเวลาดง

อุณหภูมิ 60 นาที มีความแข็งสูงสุดคือ 54 Shore D ซึ่งมีค่าความแข็งต่ำกว่าชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ อยู่ 7 Shore D

6) ค่าแรงดึงของชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีผลค่าแรงดึงสูงกว่าชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยพบว่า สภาวะอุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 90 นาที มีค่าความเค้นครากคือ 17.80 ± 3.96 MPa ความเค้นแรงดึงสูงสุดคือ 21.92 ± 5.24 MPa และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุดคือ 526.68 ± 20.01 % ซึ่งมีค่าแรงดึงสูงกว่าอยู่ 24.16, 22.17 และ 17.14 % ตามลำดับ

7) อัตราการสึกหรอของชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่ มีค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยพบว่าสภาวะอุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดคือ 6.62×10^{-8} mm³/Nm ซึ่งมีค่าอัตราการสึกหรอต่ำกว่าอยู่ 1.553×10^{-7} mm³/Nm

จากผลการทดสอบสมบัติทางกาย ทางกลและความต้านทานการสึกหรอ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดขึ้นรูปร้อนไม่ใช่สภาวะเดียวกัน ดังนั้นควรเลือกสภาวะให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน เช่น สภาวะอุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 5 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 90 นาที มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงสุด เหมาะสำหรับการผลิตท่อพลาสติก เนื่องจากวัสดุ UHMWPE มีความแข็งและความเหนียว สำหรับสภาวะอุณหภูมิ 190 °C แรงดัน 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที มีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นส่วนต่างๆที่ต้องการความทนทานต่อแรงเสียดทานสูงหรืออัตราการสึกหรอต่ำสุด อาทิเช่น แบร็ง บูท เฟืองหรือเกียร์และแท่งโปรไฟล์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากผลการทดสอบค่าความแข็งของวัสดุค่อนข้างต่ำ ควรทำการศึกษาและพัฒนาค่าความแข็งของวัสดุ UHMWPE โดยการเติมสารตัวเติม เช่น นาโนคาร์บอน อลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น เพื่อเป็นการพัฒนาค่าความแข็งวัสดุ UHMWPE ให้สูงขึ้น

5.2.2 เนื่องจากการทดสอบการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE ภายใต้สภาวะแบบแห้ง ควรทำการศึกษาการสึกหรอ ภายใต้สภาวะเปียกหรือมีสารหล่อลื่น เพื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบของสารหล่อลื่นและเปรียบเทียบกับสภาวะแบบแห้ง

5.2.3 จากการทดสอบการสึกหรอ พบว่า รอยการสึกหรอของชั้นทดสอบมีลักษณะเอียง เนื่องจากพื้นผิวชั้นทดสอบไม่ได้ระนาบ ซึ่งส่งต่อการผิวสัมผัสระหว่างชั้นทดสอบกับวงแหวน จากปัญหาที่เกิดขึ้น จึงควรทำการปรับพื้นผิวให้ได้ระนาบก่อนทำการทดสอบการสึกหรอ

บรรณานุกรม

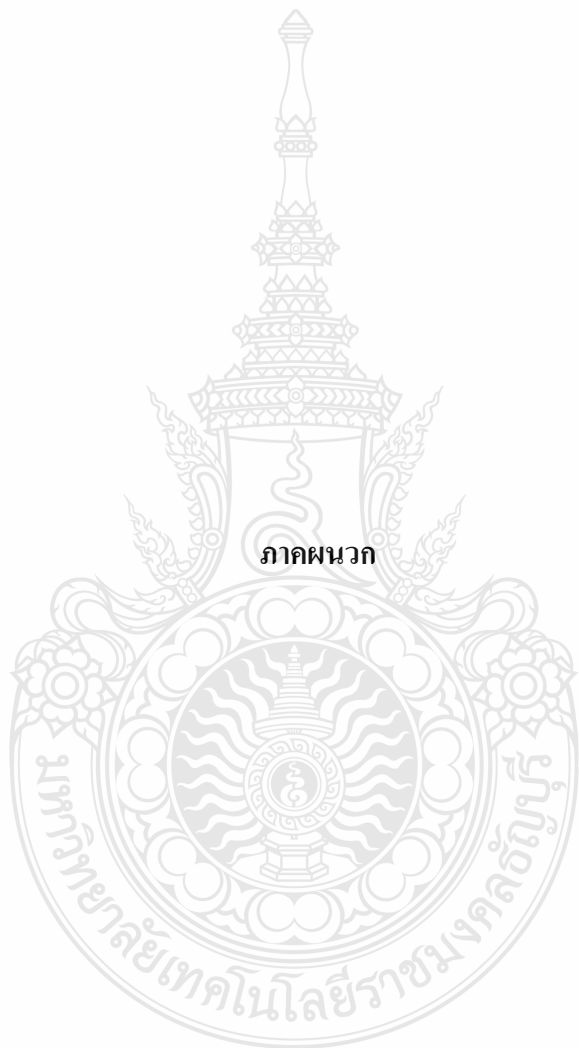
- [1] อโนดาษ์ รัชเวทย์ พอลิเมอร์ 2555, กรุงเทพฯ; หน้า 29-34.
- [2] Sangeeta Hambir, J P Jog, Sintering of ultra high molecular weight polyethylene; 1999.
- [3] Steven M. Kurtz. **UHMWPE Biomaterials Handbook**. China: Elsevier Inc.; 2009.
- [4] Narongrit Sonjaitham Noppanuch Puangmalee Wear of UHMWPE based microcomposites filled with hard and soft particles under dry sliding IE network conference, 2014 30-31 October 2014 Samutprakarn Thailand
- [5] American Society for Testing and Materials international ASTM D2240-05; P1-13.
- [6] ASTM D638 Plastic Tensile Strength Test (<http://info.admet.com>) Online
- [7] J.J. Wu, C.P. Buckley, J.J. O'Connor. Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions. *Biomaterials* 23 (2002) P3773-P3783
- [8] Shibo Wang, Shirong Ge. The mechanical property and tribological behavior of UHMWPE effect of molding Pressure *Wear* 263 (2007) P949-P956.
- [9] M. Peltzer, J.R. Wagner, A. Jimenez, Processing and mechanical characterization of UHMWPE stabilized with natural antioxidants; 2005.
- [10] Weston J. Wood, Wei Hong Zhong, Mechanical and wear properties of UHMWPE nanocomposites filled with carbon nanofillers.
- [11] F. Li, K. Hu, J. Li, B. Zhao. 2001. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene *Wear*. n.p
- [12] W. G. Sawyer, K. D. Freudenberg, P. Bhimaraj, L. S. Schadler. 2003. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles *Wear*. n.p.
- [13] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, G. Shi, Q. L. Ji, B. Wetzel, K. Friedrich. 2003. Graft polymerization onto inorganic nanoparticles and its effect on tribological performance improvement of polymer composites. *Tribol. Int.*
- [14] วิโรจน์ นัทรเกษ, ศิริชัย ต่อสกุล, สุรัตน์ วรรณศรี, สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะนำ, การวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ UHMWPE โดยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2557, สมุทรปราการ

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [15] สุรศักดิ์ มะธิโตปะนะ, ศิริชัย ต่อสกุล, สุรัตน์ วรรณศรี, การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram Extrusion การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2556, 16-18 ตุลาคม 2556, พัทยา ชลบุรี, หน้า 94-100
- [16] F.S.Senatov, A.A.Baranov, D.S.Muratov, M.V. Kaloshkin, V.V.Tcherdyntsev. Microstructure and properties of composite materials based on UHMWPE after mechanical activation.
- [17] Gul R. Improved UHMWPE for use in total joint replacement, Ph.D. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology; Boston,USA ;1997.
- [18] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra PJ. Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history, Polymer ;1990.
- [19] Amanda L. Forster, Aaron M. Forster, Joannie W. Chin, Jyun-Siang Peng, Chiao-Chi Lin, Sylvain Petit, Kai-Li Kang, Nick Paulter, Michael A. Riley, Kirk D. Rice, Mohamad Al-Sheikhly, Long-term stability of UHMWPE fibers, Polymer Degradation and Stability 2015, P45-51
- [20] Boon Peng Chang, Hazizan Md Akil , Ramdziah Md. Nasir Mechanical and Tribological Properties of Zeolite-reinforced UHMWPE Composite for Implant Application Procedia Engineering 2013 [88-94]
- [21] Wannasri S., Steranova I., Shinkhova T., Panin S.V. Influence of adding carbon and aluminum oxide nanofibers on structural and properties of ultra high molecular weight polyethylene. Tomsk, Russia. 2008
- [22] Wannasri S., Panin S.V., Ivanona L.R., Komeinko L.A., Fedorova T.V., Tkachev A.G. Increasing wear resistance of bulk UHMWPE based composite materials by mechanical activation and adding of plasticizer. Mesomechanics 2008, Tomsk, Russia. 2008
- [23] Wannasri S., 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
- [24] G.Sui, W.H.Zhong, X.Ren, X.O.Wang, X.P.Yang. Structure, mechanical properties and friction behavior of UHMWPE/HDPE/Carbonnanofibers. Materials Chemistry and Physics 115 (2009)

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [25] G.F.P.Woitchunas. 2007. J Mater Sci, Mater Med. 18:1659-1663.
- [26] 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.
- [27] Stephen Spiegelberg, 2001, Analytical techniques for assessing the effect of radiation on UHMWPE, Cambridge polymer group, Inc
- [28] Nakanisi, K., *Infrakrasnye spektry i stroenie organicheskikh soedinenii (Infrared Spectra and the Structure of Organic Compounds)*, Moscow: Mir, 1965.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Krasnov A. P., Gribova I. A., Chumavskaya A. N., Chemical structure of the polymers and tribochemical transformations in pure and filled systems. Friction Wear (Russ.), 1997, vol. 18, pp. 258–279.
- [32] V. N. Aderikha, V. A. Shapovalov, A. P. Krasnov, and Yu. M. Pleskachevskii, Effect of Aerosil Organophilization on Tribological Properties of Low-Filled UHMWPE Composites, *Trenie i Iznos*, 2008, Vol. 29, No. 4, pp. 421–424.[J. FrictionWear (Engl. Transl.)], 2008, Vol. 29, No. 4, pp. 318–323
- [33] Stepan S. Pesetskii, Sergei P. Bogdanovich and Nikolai. K. Myshkin, Tribological behavior of polymer nanocomposites produced by dispersion of nanofillers in molten thermoplastics, in *Tribology of Polymeric nanocomposites* by K. Friedrich and Alois K. Schlarb (ed. B. J. Briscoe), Elsevier, 2008 pp. 82–107
- [34] 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

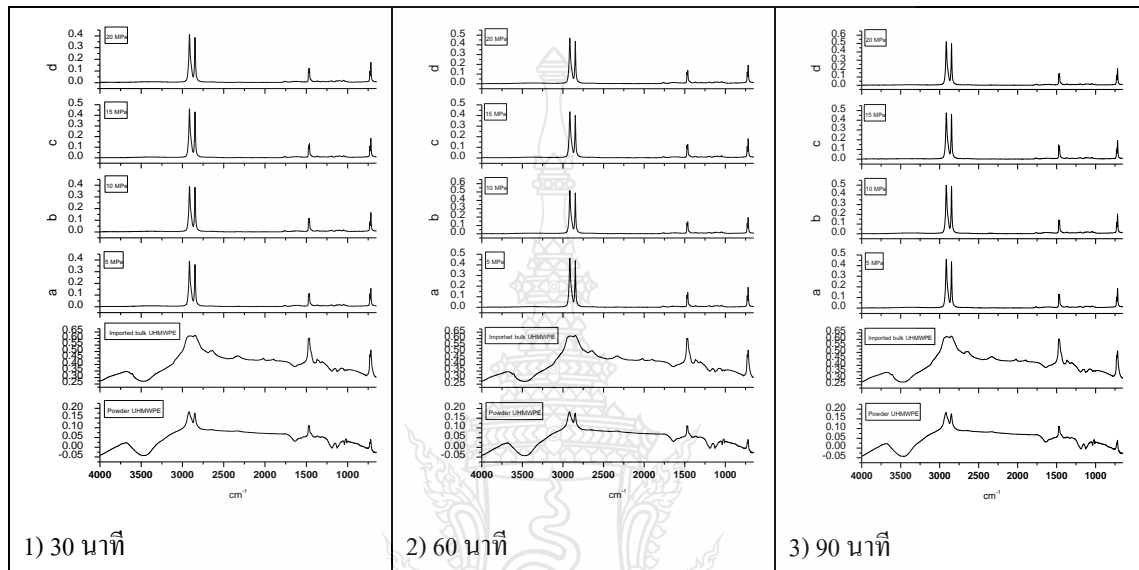
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

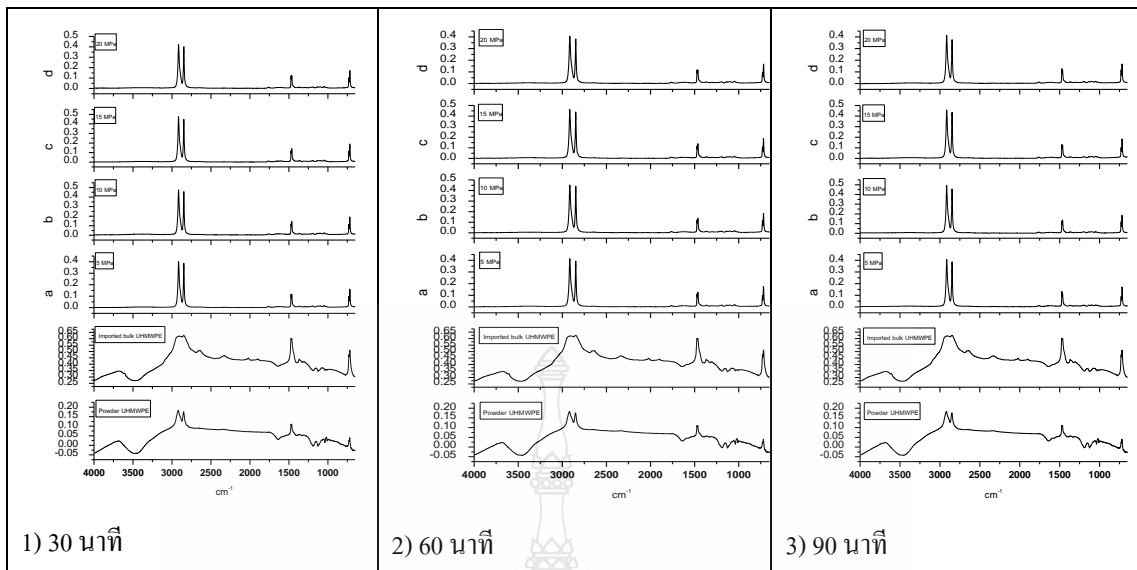


1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี

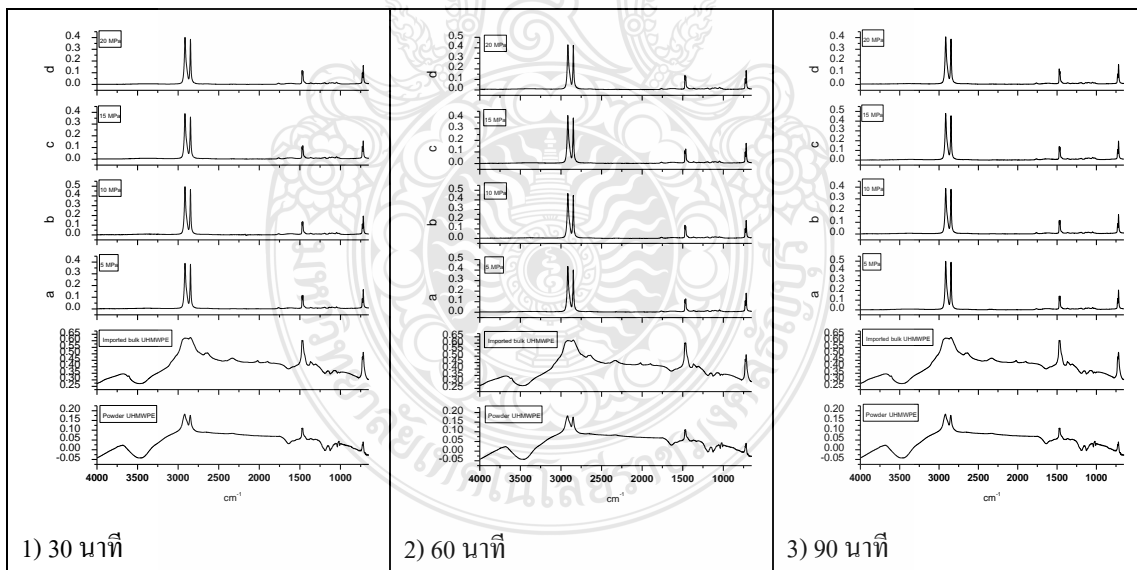
แสดงผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีและวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิ แรงดัน และเวลาดังอุณหภูมิระดับต่างๆ กับผง UHMWPE บริสุทธิ์และแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ



รูปที่ ก-1 เปรียบเทียบ IR Spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ แผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศกับแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ โดยอุณหภูมิที่ 170°C แรงดัน a) 5 MPa, b) 10 MPa, c) 15 MPa และ d) 20 MPa และเวลาดังอุณหภูมิระดับต่างๆ



รูปที่ ก-2 เปรียบเทียบ IR Spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ แผ่นขึ้นทศอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศกับแผ่นขึ้นทศอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ โดยอุณหภูมิ 190°C แรงดัน a) 5 MPa, b) 10 MPa, c) 15 MPa และ e) 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิระดับต่างๆ



รูปที่ ก-3 เปรียบเทียบ IR Spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ แผ่นขึ้นทศอบ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศกับแผ่นขึ้นทศอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ โดยอุณหภูมิที่ 210°C แรงดัน a) 5 MPa, b) 10 MPa, c) 15 MPa และ e) 20 MPa และเวลาคงอุณหภูมิต่างๆ

2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

การคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึกจากเทคนิค DSC

ปริมาณความเป็นผลึก (% Crystallinity) คำนวณได้จากสมการ 2.1

1) ผลทดสอบทางความร้อนของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ภายใต้สภาวะ อุณหภูมิ 170°C แรงดัน 10 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 นาที

ได้ค่า Heat flow endo up (จูล/กรัม)

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_m \times 100}{\Delta H_o} \times \frac{1}{X}$$
$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{106.6509 - 100}{291} \times 100\%$$

$$\% \text{ Crystallinity} = 36.65$$

X คือ เฟอร์เซนต์ของ UHMWPEZ ($\Delta H_{o,UHMWPE} = 291$ จูล/กรัม)

2) ผลทดสอบทางความร้อนของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ภายใต้สภาวะ อุณหภูมิ 190°C แรงดัน 10 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 นาที

ได้ค่า Heat flow endo up (จูล/กรัม)

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_m \times 100}{\Delta H_o} \times \frac{1}{X}$$
$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{109.7420 - 100}{291} \times 100\%$$

$$\% \text{ Crystallinity} = 37.71$$

3) ผลทดสอบทางความร้อนของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ภายใต้สภาวะ อุณหภูมิ 210°C แรงดัน 5 MPa และเวลาดงอุณหภูมิ 30 นาที

ได้ค่า Heat flow endo up (จูล/กรัม)

$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{\Delta H_m \times 100}{\Delta H_o} \times \frac{1}{X}$$
$$\% \text{ Crystallinity} = \frac{116.6470 - 100}{291} \times 100\%$$

$$\% \text{ Crystallinity} = 40.08$$

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ และขึ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Sample	Mass (mg.)	Forming condition			T _m	ΔH (J/mol)	Degree of Crystallinity (%)
		Temperature (°C)	Exposure time (นาที)	Pressure (MPa)			
Imported bulk UHMWPE	8.8	—	—	—		155.125	53.51
1	8.5	170	30	5	139.33	115.015	39.52
2	8.2			10	136.67	106.651	36.65
3	8.9			15	137.70	101.880	35.01
4	8.6			20	136.53	104.797	36.01
5	8		60	5	139.53	107.472	36.93
6	8.6			10	136.33	104.574	35.94
7	7.4			15	136.37	110.074	37.83
8	8.7			20	136.37	105.246	36.17
9	8		90	5	138.53	107.575	36.97
10	8.6			10	137.03	108.364	37.24
11	7.4			15	136.20	107.888	37.07
12	8.7			20	136.70	107.353	36.89
13	8.8	190	30	5	138.75	106.208	36.50
14	8.7			10	137.37	109.742	37.71
15	8.8			15	137.17	105.999	36.43
16	8.5			20	137.03	109.301	37.56
17	8.9		60	5	137.57	106.835	36.71
18	8.4			10	137.20	109.672	37.69
19	8.2			15	139.53	107.472	36.93
20	7.4			20	137.37	108.205	37.18
21	8.8		90	5	139.50	109.612	37.67
22	8.6			10	135.03	104.826	36.02
23	8.8			15	137.03	106.508	36.60
24	8.4			20	136.87	107.070	36.79
25	8.7	210	30	5	136.70	109.845	37.75
26	8.3			10	136.70	109.659	37.68
27	8.8			15	136.33	105.997	36.43
28	9		60	20	139.70	116.647	40.08
29	7.8			5	139.37	106.171	36.48
30	8.8			10	137.03	102.527	35.23
31	8.5		90	15	139.37	107.874	37.07
32	8.2			20	136.20	111.102	38.18
33	8.6			5	136.70	110.450	37.96
34	8.4			10	139.50	106.879	36.73
35	8.5			15	137.20	112.322	38.60
36	8.7			20	137.00	107.649	36.99

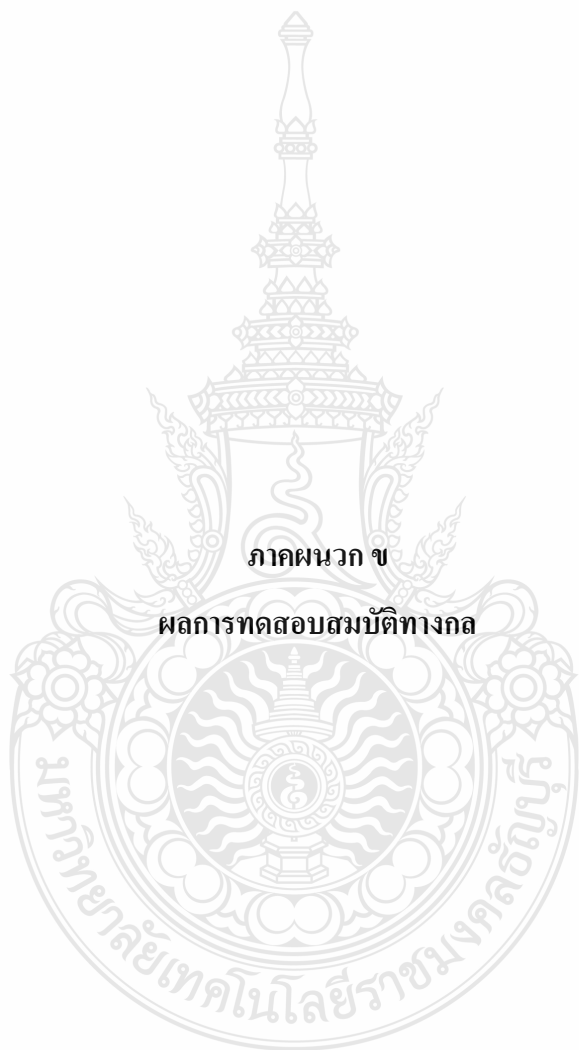
3 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป ร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ และขึ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Forming Conditions	Density (g/cm ³)			Average
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	
Imported Bulk UHMWPE	1.0080	1.0013	1.0050	1.0048
170-5-30	1.0080	1.0434	1.0245	1.0253
170-10-30	1.0013	0.9894	1.0468	1.0125
170-15-30	1.0474	0.9760	1.0544	1.0259
170-20-30	1.0006	0.9821	1.0068	0.9965
190-5-30	1.0021	1.0128	1.0029	1.0059
190-10-30	1.0044	0.9903	1.0121	1.0023
190-15-30	0.9998	0.9783	0.9891	0.9891
190-20-30	1.0152	0.9920	1.0008	1.0027
210-5-30	0.9804	0.9927	0.9674	0.9802
210-10-30	1.0019	1.0286	1.0266	1.0190
210-15-30	1.025	0.9888	0.989	1.0009
210-20-30	0.9724	0.9556	1.0291	0.9857
170-5-60	0.9581	0.9078	0.9938	0.9532
170-10-60	1.0545	1.0588	1.0515	1.0549
170-15-60	1.0129	1.0094	1.0323	1.0182
170-20-60	0.986	0.9691	0.9849	0.9800
190-5-60	1.0250	0.9924	0.9944	1.0039
190-10-60	1.0315	1.0290	0.9909	1.0171
190-15-60	1.0247	1.0506	1.0426	1.0393
190-20-60	1.0540	1.0227	0.9744	1.0170
210-5-60	0.9685	0.9649	0.9851	0.9728
210-10-60	0.9978	1.0085	1.0133	1.0065

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป ร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ และขึ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (ต่อ)

Forming Conditions	Density (g/cm ³)			Average
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	
210-15-60	0.9700	0.9804	0.9384	0.9629
210-20-60	0.9951	1.0195	0.9728	0.9958
170-5-90	1.0141	1.0249	1.0150	1.0180
170-10-90	1.0230	1.0378	1.0000	1.0203
170-15-90	1.0125	1.0044	0.9696	0.9955
170-20-90	0.9448	1.0259	0.9719	0.9809
190-5-90	0.9971	1.0132	1.0055	1.0053
190-10-90	1.0290	1.0166	1.0109	1.0188
190-15-90	1.0003	0.9778	1.0084	0.9955
190-20-90	0.9700	0.9948	1.0041	0.9896
210-5-90	0.9527	0.9732	0.9893	0.9717
210-10-90	1.0076	0.9950	0.9626	0.9884
210-15-90	0.9041	1.0058	1.0329	0.9809
210-20-90	0.9718	0.9828	0.9858	0.9801



1 การวิเคราะห์สัมพัทธ์ทางกล

ตารางที่ ข-1 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปก่อนภายใต้สภาวะต่างๆ และแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

Conditions	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	Average	SD
Import UHMWPE	60	61	61	58	61	61	62	62	60	60	61	61	61	61	60	60	61	61	61	61	61	60	61	59	63	60	62	59	60	59	60.60	1.04
170-5-30	53	54	53	53	53	54	53	55	54	54	54	53	53	54	54	52	54	54	54	53	52	54	55	54	53	53	54	54	53	54	53.57	0.73
170-10-30	51	52	51	51	50	51	51	51	52	52	52	52	54	54	53	53	53	53	54	52	52	53	53	52	52	52	53	53	51	50	52.10	1.09
170-15-30	54	54	52	52	52	55	53	52	51	51	52	53	52	52	51	51	51	50	51	51	51	53	52	51	51	52	51	52	52	51	51.87	1.11
170-20-30	51	51	48	51	51	50	50	49	50	51	51	51	51	53	52	51	52	53	54	53	49	53	51	53	52	54	53	52	53	53	51.53	1.50
190-5-30	53	53	52	51	51	53	52	53	52	50	53	52	52	51	51	53	53	52	51	51	52	53	52	52	52	52	50	50	50	51	51.77	1.01
190-10-30	52	53	54	54	54	53	50	55	54	50	53	50	54	53	50	52	51	53	53	52	49	54	50	54	50	54	50	52	51	52	52.20	1.71
190-15-30	52	52	51	51	51	51	53	52	51	51	51	52	52	52	51	51	52	52	51	52	52	53	52	53	51	53	49	52	50	51	51.53	0.90
190-20-30	49	48	48	49	50	54	53	53	54	52	53	53	53	53	53	53	52	53	52	52	52	52	52	52	52	51	51	50	51	49	51.57	1.68
210-5-30	52	53	53	52	51	54	52	52	52	52	54	54	53	52	51	52	53	53	51	52	51	52	53	51	51	54	52	52	51	52.23	0.97	
210-10-30	52	54	54	52	51	53	54	53	51	51	52	53	52	52	51	53	53	52	51	50	52	51	52	50	49	50	52	53	52	52	51.90	1.24
210-15-30	52	52	51	52	51	53	51	52	52	52	52	51	52	51	52	52	52	51	52	52	52	53	53	53	51	51	52	50	50	51.67	0.84	
210-20-30	49	51	51	52	52	49	51	52	53	53	50	52	52	53	53	51	51	52	54	54	51	52	53	55	55	50	48	49	50	50	51.60	1.77
170-5-60	52	53	54	54	54	52	54	54	54	54	51	54	54	53	54	52	53	53	54	53	52	54	54	54	54	54	54	53	54	53	53.40	0.86
170-10-60	53	52	52	51	50	52	52	51	51	51	52	51	51	51	52	50	51	49	49	49	50	52	53	52	53	51	52	53	51	51	51.23	1.17
170-15-60	51	51	50	50	51	50	51	49	50	51	51	51	49	51	52	51	51	49	51	52	49	49	51	50	50	52	54	53	53	50.87	1.31	
170-20-60	50	49	50	50	51	50	50	52	51	49	50	51	53	50	50	52	52	52	52	51	50	52	53	53	52	53	52	54	52	52	51.27	1.31
190-5-60	52	52	52	52	52	53	53	54	54	53	53	53	53	53	54	53	53	53	53	52	52	53	52	53	51	52	53	54	52	52	52.70	0.75

ตารางที่ ข-1 แสดงผลการทดสอบค่าความแข็งของแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปก่อนภายใต้สภาวะต่างๆ และแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ (ต่อ)

Conditions	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	Average	SD
190-10-60	50	52	52	52	50	50	51	51	52	51	51	52	51	52	51	51	52	51	52	52	50	50	50	51	52	51	49	50	52	53	51.13	0.94
190-15-60	53	53	53	51	53	53	53	53	52	51	53	53	53	52	52	54	52	53	54	52	51	53	53	53	53	53	51	50	50	50	52.27	1.14
190-20-60	50	52	51	52	53	50	49	50	49	52	50	50	50	50	50	52	51	51	50	51	49	51	51	52	51	50	49	50	52	51	50.67	1.06
210-5-60	53	53	54	54	53	53	55	54	55	54	52	54	54	54	54	54	53	54	55	55	53	53	52	53	54	53	54	54	55	53.70	0.84	
210-10-60	52	53	55	55	55	52	54	55	55	54	52	53	54	54	54	54	52	53	53	54	52	53	54	54	54	50	51	52	52	53	53.23	1.28
210-15-60	53	53	53	53	54	54	54	54	54	53	54	54	54	54	53	55	53	53	53	53	55	52	54	54	54	54	52	51	50	51	53.13	1.20
210-20-60	50	52	50	50	50	53	53	54	55	55	53	53	53	53	53	53	53	53	53	54	55	55	53	53	54	54	53	52	52	53	52.83	1.37
170-5-90	52	53	53	52	52	53	52	52	52	52	53	52	52	52	52	52	52	51	53	52	52	53	52	51	52	52	52	52	52	51	52.13	0.57
170-10-90	50	51	51	51	52	52	53	51	52	52	52	53	52	53	50	51	53	53	51	53	52	54	53	54	53	54	53	53	53	54	52.30	1.15
170-15-90	50	51	51	51	52	52	53	51	52	52	50	51	51	52	51	49	53	50	51	51	51	52	52	52	52	52	52	52	52	52	51.43	0.90
170-20-90	50	51	50	52	50	52	52	53	53	53	52	50	52	49	52	53	51	53	49	52	52	51	53	50	53	51	50	49	48	48	51.13	1.57
190-5-90	51	51	52	53	53	51	52	52	52	52	52	51	53	53	53	51	53	53	53	53	54	52	53	52	53	52	53	50	53	54	52.33	0.96
190-10-90	51	53	52	53	53	49	53	52	52	50	52	52	51	52	51	51	53	52	51	51	51	51	51	51	52	52	51	50	51	52	51.50	0.97
190-15-90	49	51	52	50	52	53	53	53	51	51	54	53	53	52	53	53	52	53	53	53	52	52	52	52	52	52	53	53	53	51	52.20	1.06
190-20-90	51	49	50	51	51	52	50	51	52	53	52	52	52	52	53	54	52	52	52	53	51	52	53	54	54	54	49	49	50	50	51.50	1.50
210-5-90	53	54	54	54	54	52	55	54	55	54	53	54	54	54	54	54	52	54	53	54	54	53	54	54	53	54	54	53	53	53.63	0.72	
210-10-90	52	53	53	51	50	53	53	53	53	51	54	53	54	51	51	52	52	53	52	52	51	52	52	51	50	51	53	52	51	51	51.93	1.08
210-15-90	52	54	54	53	54	54	55	53	54	54	55	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	55	54	54	54	54	51	51	51	51	53.43	1.25
210-20-90	51	52	53	53	53	52	52	53	52	53	53	53	53	53	54	54	53	53	54	53	53	54	53	54	53	53	51	50	51	51	52.67	1.09

ตารางที่ ข-2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงดึงของแผ่นขึ้นทดสอบUHMWPEที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน
ภายใต้สภาวะต่างๆ และแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Part No.	Yield Strength (MPa)					Ultimate Tensile Strength (MPa)					Elongation at Break (%)				
	1	2	3	Average	SD	1	2	3	Average	SD	1	2	3	Average	SD
Imported UHMWPE	15.7	12.2	12.6	13.5	1.92	22.0	14.9	14.3	17.1	4.32	431.7	453.7	423.8	436.4	15.50
170-5-30	16.8	20.0	18.8	18.5	1.62	25.3	25.8	25.9	25.7	0.33	517.9	458.1	490.0	488.7	29.92
170-10-30	23.5	18.8	13.5	18.6	5.00	30.3	25.1	20.6	25.4	4.86	525.4	511.3	533.6	523.4	11.25
170-15-30	21.4	14.0	22.5	19.3	4.62	26.6	19.8	28.3	24.9	4.52	481.3	505.0	490.2	492.1	11.97
170-20-30	20.0	16.9	18.6	18.5	1.55	26.6	22.2	24.5	24.4	2.21	523.7	464.7	499.3	495.9	29.69
190-5-30	17.1	15.8	11.7	14.9	2.82	22.6	23.0	18.3	21.3	2.58	460.9	497.8	511.0	489.9	25.98
190-10-30	24.3	13.0	20.8	19.4	5.78	26.1	17.4	25.8	23.1	4.91	345.8	474.9	472.9	431.2	73.95
190-15-30	13.4	18.2	17.0	16.2	2.50	19.3	25.5	22.1	22.3	3.13	515.7	537.8	496.0	516.5	20.87
190-20-30	15.0	26.5	15.8	19.1	6.42	21.1	30.7	19.3	23.7	6.12	489.3	453.8	438.4	460.5	26.09
210-5-30	18.0	15.4	15.8	16.4	1.40	25.8	23.6	22.6	24.0	1.64	514.4	520.4	479.8	504.9	21.94
210-10-30	12.9	22.8	13.0	16.2	5.69	17.3	25.5	17.0	19.9	4.84	494.0	339.2	435.3	422.8	78.17
210-15-30	11.8	16.8	12.1	13.6	2.80	14.5	20.2	15.9	16.8	3.00	478.5	494.3	474.0	482.3	10.68
210-20-30	16.0	19.4	23.2	19.5	3.60	22.9	21.7	29.0	24.5	3.96	528.3	360.8	420.0	436.4	84.93
170-5-60	17.5	16.8	14.0	16.1	1.85	24.9	24.0	22.0	23.6	1.53	473.6	487.8	498.6	486.7	12.53
170-10-60	18.0	19.2	13.4	16.9	3.06	22.2	25.0	15.7	21.0	4.76	465.9	486.9	428.2	460.3	29.74
170-15-60	19.5	19.6	19.8	19.6	0.15	26.2	25.4	25.5	25.7	0.40	513.5	490.7	480.3	494.9	16.97
170-20-60	22.3	22.4	12.8	19.2	5.51	22.8	23.6	20.3	22.3	1.73	292.5	343.4	514.7	383.5	116.40
190-5-60	16.8	17.8	14.8	16.5	1.53	21.6	23.0	20.0	21.5	1.49	506.2	512.2	525.6	514.7	9.90
190-10-60	15.5	15.5	15.8	15.6	0.17	19.9	19.1	20.2	19.7	0.57	519.3	491.8	523.0	511.4	17.05
190-15-60	17.0	14.0	18.8	16.6	2.42	23.7	23.7	22.5	23.3	0.71	500.6	480.5	494.2	491.8	10.24
190-20-60	14.3	18.8	20.4	17.8	3.16	17.0	23.9	24.7	21.9	4.25	396.7	488.4	459.8	448.3	46.90
210-5-60	17.8	16.2	12.0	15.3	3.00	25.5	24.4	18.0	22.6	4.09	493.6	491.5	418.7	467.9	42.64
210-10-60	12.3	13.5	16.5	14.1	2.16	20.4	20.7	23.3	21.5	1.62	514.1	509.5	473.4	499.0	22.26
210-15-60	24.4	17.0	17.3	19.6	4.19	30.0	24.5	21.1	25.2	4.49	396.8	511.2	407.6	438.5	63.13
210-20-60	12.4	27.8	15.3	18.5	8.18	18.5	29.5	21.3	23.1	5.74	489.6	371.7	453.3	438.2	60.42
170-5-90	18.5	19.0	21.0	19.5	1.32	24.4	26.3	27.0	25.9	1.33	458.1	494.7	525.7	492.9	33.85
170-10-90	16.0	15.2	12.9	14.7	1.61	22.2	18.8	16.6	19.2	2.86	491.0	484.1	450.5	475.2	21.66
170-15-90	19.0	18.0	16.1	17.7	1.47	24.1	24.9	21.5	23.5	1.75	461.7	515.0	467.9	481.6	29.11
170-20-90	8.5	7.3	13.2	9.7	3.12	15.0	15.1	21.1	17.1	3.47	468.9	499.7	517.9	495.5	24.77
190-5-90	17.8	15.0	20.6	17.8	2.80	21.9	18.2	25.6	21.9	3.71	525.9	540.5	512.1	526.2	14.22
190-10-90	13.5	22.4	16.2	17.4	4.56	17.8	26.8	21.3	22.0	4.54	494.4	510.3	520.4	508.4	13.12
190-15-90	14.0	16.2	17.9	16.0	1.96	24.1	23.0	24.2	23.8	0.66	508.8	494.2	489.1	497.4	10.23
190-20-90	14.8	14.8	14.2	14.6	0.35	17.7	18.4	18.3	18.1	0.41	479.9	474.9	493.8	482.9	9.83

ตารางที่ ข-2 แสดงผลการทดสอบค่าแรงดึงของแผ่นขึ้นทดสอบUHMWPEที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ และแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)

Part No.	Yield Strength (MPa)					Ultimate Tensile Strength (MPa)					Elongation at Break (%)				
	1.0	2.0	3.0	Average	SD	1.0	2.0	3.0	Average	SD	1.0	2.0	3.0	Average	SD
210-5-90	11.0	11.5	11.4	11.3	0.26	16.4	17.8	17.1	17.1	0.69	445.9	466.3	456.0	456.1	10.21
210-10-90	16.8	15.0	17.0	16.3	1.10	21.0	21.2	23.8	22.0	1.55	420.0	464.5	486.5	457.0	33.89
210-15-90	14.2	9.2	5.8	9.7	4.23	21.6	15.7	17.3	18.2	3.09	524.9	484.8	479.1	496.2	24.95
210-20-90	15.0	14.0	14.0	14.3	0.58	21.7	23.0	20.1	21.6	1.42	505.9	509.5	482.3	499.2	14.74





ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบการศึกษาระดับ

1. การคำนวณหาอัตราการสึกหรอ

กำหนดให้

Diameter of Ring (มม.)	62.00
Friction Speed (เมตร/วินาที)	0.30
Revolution per minute (rpm.)	92.4594
Time (นาที)	555.5556
Distance (เมตร)	10000
Load (N)	150

อัตราการสึกหรอ (Wear Rate) คำนวณได้จากสมการที่ 2.2

นำค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ Density (g/cm^3 หรือ ลูกบาศก์เซนติเมตร) แต่ละชิ้นทดสอบมาแทนค่าในสมการที่ 2.2

$$\text{Wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nm}$$

$$v = \text{Volume loss}, \quad N = \text{Load}, \quad m = \text{Distance}$$

2.1 จากผลการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่สภาวะที่อุณหภูมิ 170°C แรงดัน 15 MPa และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที พบว่าน้ำหนักก่อนการทดสอบ 0.9762 กรัม และหลังการทดสอบการสึกหรอน้ำหนักที่สูญเสียเท่ากับ 0.9761 กรัม สามารถหาอัตราการสึกหรอได้จากสมการที่ 2.2 (นำค่าความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ จากตารางที่ 2 แทนค่า Density)

$$\begin{aligned} V_{\text{loss}} (\text{กรัม}) &= m_0 (\text{กรัม}) - m_f (\text{กรัม}) \\ &= 0.9762 (\text{กรัม}) - 0.9761 (\text{กรัม}) \\ &= 0.0001 (\text{กรัม}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume loss (ม.ม.}^3) &= (m_0 - m_f) (\text{กรัม}) / \text{Density (g/cm}^3) \\ &= \frac{0.0001 (\text{g.})}{0.91 (\text{g/cm}^3)} \\ &= 0.10989011 \text{ มม.}^3 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 2.2

$$\begin{aligned} &= \frac{0.10989011 (\text{มม.}^3)}{150 (\text{N}) \times 10000 (\text{เมตร})} \\ &= 7.33 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{Nm} \quad \text{Ans.} \end{aligned}$$

ตารางที่ ค-1 แสดงผลการทดสอบอัตราการสึกหรอของแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆกับแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Conditions	m_0 (กรัม)	m_f (กรัม)	$m_0 - m_f$ (กรัม)	ρ (g/cm ³)	V_{loss} (mm ³)	Wear rate (mm ³ /Nm)	Average (mm ³ /Nm)	SD (mm ³ /Nm)
Imported bulk UHMWPE	1.0050	1.0048	0.0002	1.0080	0.21978022	1.47×10^{-7}	2.21×10^{-7}	1.542×10^{-7}
	1.0017	1.0011	0.0006	1.0013	0.659340659	4.40×10^{-7}		
	1.0017	1.0015	0.0002	1.0050	0.21978022	1.47×10^{-7}		
170-5-30	1.0086	1.0084	0.0002	1.0080	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.95×10^{-7}	1.128×10^{-7}
	1.0390	1.0388	0.0002	1.0434	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	1.0173	1.0168	0.0005	1.0245	0.549450549	3.66×10^{-7}		
170-10-30	1.0015	1.0010	0.0005	1.0013	0.549450549	3.66×10^{-7}	3.07×10^{-7}	3.321×10^{-8}
	0.9885	0.9881	0.0004	0.9894	0.43956044	2.93×10^{-7}		
	1.0469	1.0464	0.0005	1.0468	0.549450549	3.66×10^{-7}		
170-15-30	1.0473	1.0471	0.0002	1.0474	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.92×10^{-7}	1.652×10^{-7}
	0.9762	0.9761	0.0001	0.9760	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9865	0.9859	0.0006	1.0544	0.659340659	4.40×10^{-7}		
170-20-30	1.0006	1.0004	0.0002	1.0006	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.56×10^{-7}	4.088×10^{-8}
	0.9806	0.9803	0.0003	0.9821	0.32967033	2.20×10^{-7}		
	1.0020	1.0018	0.0002	1.0068	0.21978022	1.47×10^{-7}		
170-5-60	0.9587	0.9586	0.0001	0.9581	0.10989011	7.33×10^{-8}	3.15×10^{-7}	4.269×10^{-7}
	0.9080	0.9069	0.0011	0.9078	1.208791209	8.06×10^{-7}		
	0.9927	0.9926	0.0001	0.9938	0.10989011	7.33×10^{-8}		
170-10-60	1.0550	1.0545	0.0005	1.0545	0.549450549	3.66×10^{-7}	1.68×10^{-7}	1.316×10^{-7}
	1.0588	1.0586	0.0002	1.0588	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	1.0517	1.0516	0.0001	1.0515	0.10989011	7.33×10^{-8}		
170-15-60	1.0129	1.0128	0.0001	1.0129	0.10989011	7.33×10^{-8}	1.09×10^{-7}	7.379×10^{-8}
	1.0098	1.0097	0.0001	1.0094	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	1.0302	1.0299	0.0003	1.0323	0.32967033	2.20×10^{-7}		
170-20-60	0.9858	0.9856	0.0002	0.9860	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.13×10^{-7}	3.840×10^{-8}
	0.9595	0.9594	0.0001	0.9691	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9829	0.9827	0.0002	0.9849	0.21978022	1.47×10^{-7}		
170-5-90	1.0126	1.0121	0.0005	1.0141	0.549450549	3.66×10^{-7}	3.50×10^{-7}	1.014×10^{-7}
	1.0238	1.0234	0.0004	1.0249	0.43956044	2.93×10^{-7}		
	1.0143	1.0136	0.0007	1.0150	0.769230769	5.13×10^{-7}		
170-10-90	1.0230	1.0228	0.0002	1.0230	0.21978022	1.47×10^{-7}	2.41×10^{-7}	1.412×10^{-7}
	1.0380	1.0377	0.0003	1.0378	0.32967033	2.20×10^{-7}		
	0.9992	0.9986	0.0006	1.0000	0.659340659	4.40×10^{-7}		

ตารางที่ ค-1 แสดงผลการทดสอบอัตราการสึกหรอของแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆกับแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)

Conditions	m_0 (กรัม)	m_f (กรัม)	$m_0 - m_f$ (กรัม)	ρ (g/cm ³)	V_{loss} (mm ³)	Wear rate (mm ³ /Nm)	Average (mm ³ /Nm)	SD (mm ³ /Nm)
170-15-90	1.0115	1.0114	0.0001	1.0125	0.10989011	7.33×10^{-8}	6.70×10^{-8}	1.552×10^{-9}
	1.0045	1.0044	0.0001	1.0044	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9695	0.9694	0.0001	0.9696	0.10989011	7.33×10^{-8}		
170-20-90	0.9450	0.9448	0.0002	0.9448	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.79×10^{-7}	6.976×10^{-8}
	1.0244	1.0240	0.0004	1.0259	0.43956044	2.93×10^{-7}		
	0.9714	0.9712	0.0002	0.9719	0.21978022	1.47×10^{-7}		
190-5-30	1.0009	1.0007	0.0002	1.0021	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.11×10^{-7}	3.878×10^{-8}
	1.0098	1.0097	0.0001	1.0128	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	1.0072	1.0070	0.0002	1.0029	0.21978022	1.47×10^{-7}		
190-10-30	1.0040	1.0036	0.0004	1.0044	0.43956044	2.93×10^{-7}	2.66×10^{-7}	6.369×10^{-8}
	0.9904	0.9901	0.0003	0.9903	0.32967033	2.20×10^{-7}		
	1.0110	1.0105	0.0005	1.0121	0.549450549	3.66×10^{-7}		
190-15-30	0.9999	0.9995	0.0004	0.9998	0.43956044	2.93×10^{-7}	2.25×10^{-7}	7.791×10^{-8}
	0.9778	0.9774	0.0004	0.9783	0.43956044	2.93×10^{-7}		
	0.9891	0.9889	0.0002	0.9891	0.21978022	1.47×10^{-7}		
190-20-30	1.0146	1.0144	0.0002	1.0152	0.21978022	1.47×10^{-7}	6.62×10^{-8}	6.567×10^{-8}
	0.9891	0.9890	0.0001	0.9920	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9977	0.9977	0.0000	1.0008	0	0.00		
190-5-60	1.0244	1.0243	0.0001	1.0250	0.10989011	7.33×10^{-8}	8.88×10^{-8}	3.926×10^{-8}
	0.9915	0.9914	0.0001	0.9924	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9943	0.9941	0.0002	0.9944	0.21978022	1.47×10^{-7}		
190-10-60	1.0312	1.0311	0.0001	1.0315	0.10989011	7.33×10^{-8}	1.10×10^{-7}	3.901×10^{-8}
	1.0291	1.0289	0.0002	1.0290	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	1.0145	1.0143	0.0002	0.9909	0.21978022	1.47×10^{-7}		
190-15-60	1.0246	1.0241	0.0005	1.0247	0.549450549	3.66×10^{-7}	1.93×10^{-7}	1.143×10^{-7}
	1.0500	1.0498	0.0002	1.0506	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	1.0422	1.0420	0.0002	1.0426	0.21978022	1.47×10^{-7}		
190-20-60	1.0517	1.0515	0.0002	1.0540	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.53×10^{-7}	3.725×10^{-8}
	1.0278	1.0275	0.0003	1.0227	0.32967033	2.20×10^{-7}		
	0.9727	0.9725	0.0002	0.9744	0.21978022	1.47×10^{-7}		
190-5-90	0.9973	0.9972	0.0001	0.9971	0.10989011	7.33×10^{-8}	6.63×10^{-8}	5.314×10^{-10}
	1.0129	1.0128	0.0001	1.0132	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	1.0059	1.0058	0.0001	1.0055	0.10989011	7.33×10^{-8}		

ตารางที่ ค-1 แสดงผลการทดสอบอัตราการสึกหรอของแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆกับแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)

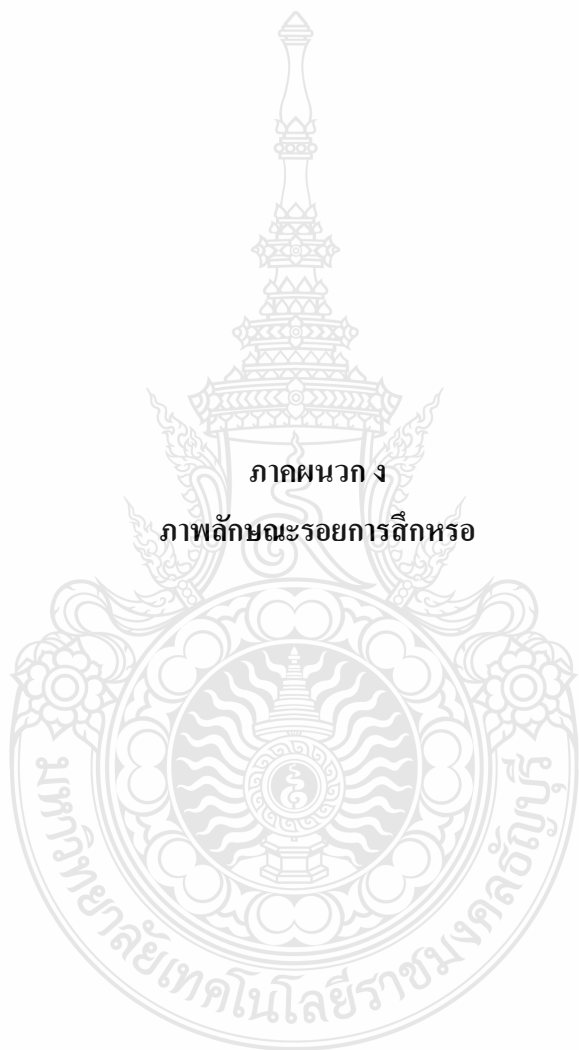
Conditions	m_0 (กรัม)	m_f (กรัม)	$m_0 - m_f$ (กรัม)	ρ (g/cm^3)	V_{loss} (mm^3)	Wear rate (mm^3/Nm)	Average (mm^3/Nm)	SD (mm^3/Nm)
190-10-90	1.0280	1.0277	0.0003	1.0290	0.32967033	2.20×10^{-7}	1.30×10^{-7}	6.421×10^{-8}
	1.0162	1.0160	0.0002	1.0166	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	1.0071	1.0070	0.0001	1.0109	0.10989011	7.33×10^{-8}		
190-15-90	1.0002	1.0001	0.0001	1.0003	0.10989011	7.33×10^{-8}	8.97×10^{-8}	4.040×10^{-8}
	0.9768	0.9766	0.0002	0.9778	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	1.0038	1.0037	0.0001	1.0084	0.10989011	7.33×10^{-8}		
190-20-90	0.9699	0.9696	0.0003	0.9700	0.32967033	2.20×10^{-7}	1.36×10^{-7}	6.991×10^{-8}
	0.9938	0.9936	0.0002	0.9948	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	1.0024	1.0023	0.0001	1.0041	0.10989011	7.33×10^{-8}		
210-5-30	0.9806	0.9805	0.0001	0.9804	0.10989011	7.33×10^{-8}	1.14×10^{-7}	8.035×10^{-8}
	0.9913	0.9912	0.0001	0.9927	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9673	0.9670	0.0003	0.9674	0.32967033	2.20×10^{-7}		
210-10-30	0.9996	0.9995	0.0001	1.0019	0.10989011	7.33×10^{-8}	1.09×10^{-7}	3.650×10^{-8}
	1.0286	1.0282	0.0004	1.0286	0.43956044	2.93×10^{-7}		
	1.0237	1.0236	0.0001	1.0266	0.10989011	7.33×10^{-8}		
210-15-30	1.0232	1.0231	0.0001	1.0250	0.10989011	7.33×10^{-8}	1.57×10^{-7}	7.921×10^{-8}
	0.9879	0.9876	0.0003	0.9888	0.32967033	2.20×10^{-7}		
	0.9862	0.9859	0.0003	0.9890	0.32967033	2.20×10^{-7}		
210-20-30	0.9703	0.9700	0.0003	0.9724	0.32967033	2.20×10^{-7}	2.26×10^{-7}	4.599×10^{-8}
	0.9534	0.9530	0.0004	0.9556	0.43956044	2.93×10^{-7}		
	1.0280	1.0277	0.0003	1.0291	0.32967033	2.20×10^{-7}		
210-5-60	0.9669	0.9666	0.0003	0.9685	0.32967033	2.20×10^{-7}	1.37×10^{-7}	6.942×10^{-8}
	0.9624	0.9622	0.0002	0.9649	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	0.9846	0.9845	0.0001	0.9851	0.10989011	7.33×10^{-8}		
210-10-60	0.9982	0.9981	0.0001	0.9978	0.10989011	7.33×10^{-8}	4.43×10^{-8}	3.837×10^{-8}
	1.0080	1.0079	0.0001	1.0085	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	1.0101	1.0101	0.0000	1.0133	0	0.00		
210-15-60	0.9673	0.9672	0.0001	0.9700	0.10989011	7.33×10^{-8}	1.63×10^{-7}	1.102×10^{-7}
	0.9771	0.9769	0.0002	0.9804	0.21978022	1.47×10^{-7}		
	0.9384	0.9380	0.0004	0.9384	0.43956044	2.93×10^{-7}		
210-20-60	0.9922	0.9921	0.0001	0.9951	0.10989011	7.33×10^{-8}	4.52×10^{-8}	3.913×10^{-8}
	1.0150	1.0150	0.0000	1.0195	0	0.00		
	0.9719	0.9718	0.0001	0.9728	0.10989011	7.33×10^{-8}		

ตารางที่ ค-1 แสดงผลการทดสอบอัตราการสึกหรอของแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆกับแผ่นขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ (ต่อ)

Conditions	m_0 (กรัม)	m_f (กรัม)	$m_0 - m_f$ (กรัม)	ρ (g/cm^3)	V_{loss} (mm^3)	Wear rate (mm^3/Nm)	Average (mm^3/Nm)	SD (mm^3/Nm)
210-5-90	0.9525	0.9523	0.0002	0.9527	0.21978022	1.47×10^{-7}	1.14×10^{-7}	3.984×10^{-8}
	0.9695	0.9694	0.0001	0.9732	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9864	0.9862	0.0002	0.9893	0.21978022	1.47×10^{-7}		
210-10-90	1.0065	1.0064	0.0001	1.0076	0.10989011	7.33×10^{-8}	6.75×10^{-8}	1.600×10^{-9}
	0.9934	0.9933	0.0001	0.9950	0.10989011	7.33×10^{-8}		
	0.9575	0.9574	0.0001	0.9626	0.10989011	7.33×10^{-8}		
210-15-90	0.9042	0.9040	0.0002	0.9041	0.21978022	1.47×10^{-7}	3.32×10^{-7}	1.624×10^{-7}
	1.0040	1.0034	0.0006	1.0058	0.659340659	4.40×10^{-7}		
	1.0313	1.0306	0.0007	1.0329	0.769230769	5.13×10^{-7}		
210-20-90	0.9696	0.9694	0.0002	0.9718	0.21978022	1.47×10^{-7}	2.49×10^{-7}	1.399×10^{-7}
	0.9818	0.9815	0.0003	0.9828	0.32967033	2.20×10^{-7}		
	0.9851	0.9845	0.0006	0.9858	0.659340659	4.40×10^{-7}		

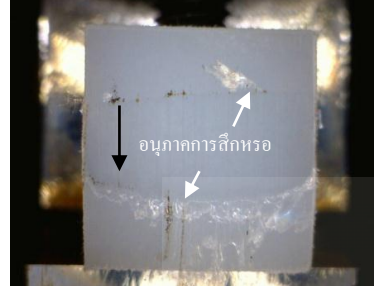
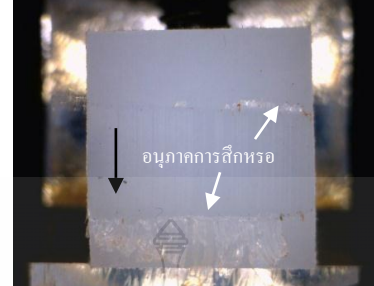

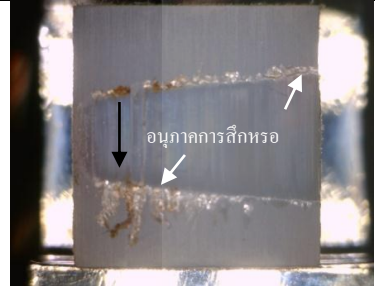
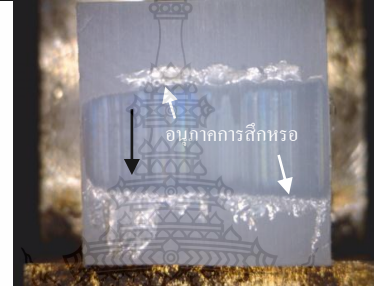
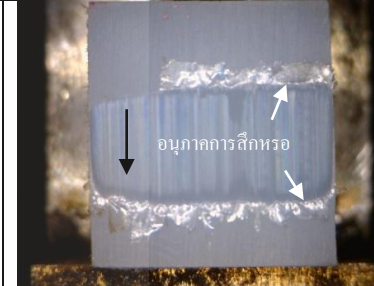
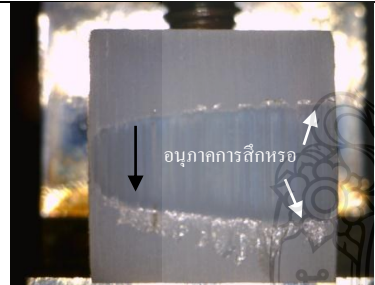

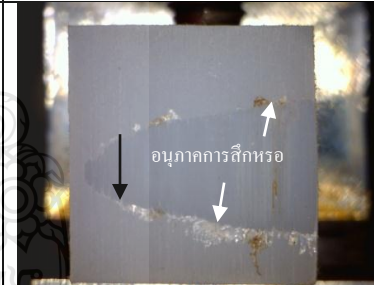
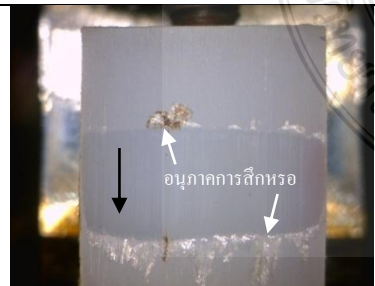
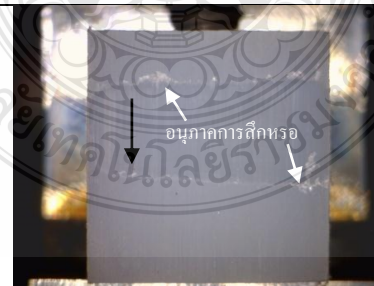
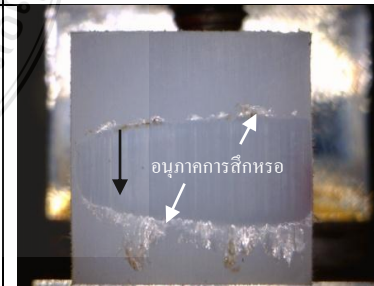
หมายเหตุ

- m_0 = มวลขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ (กรัม)
 m_f = มวลขึ้นทดสอบหลังผ่านการทดสอบการสึกหรอ (กรัม)
 $m_0 - m_f$ = มวลน้ำหนักที่สูญเสียจากการทดสอบการสึกหรอ (กรัม)
 ρ = ค่าความถ่วงจำเพาะของขึ้นทดสอบ (g/cm^3 หรือ ลูกบาศก์เซนติเมตร)
 V_{loss} = ปริมาณที่สูญเสีย (mm^3 หรือ ลูกบาศก์มิลลิเมตร)
Wear rate = อัตราการสึกหรอ (mm^3/Nm)

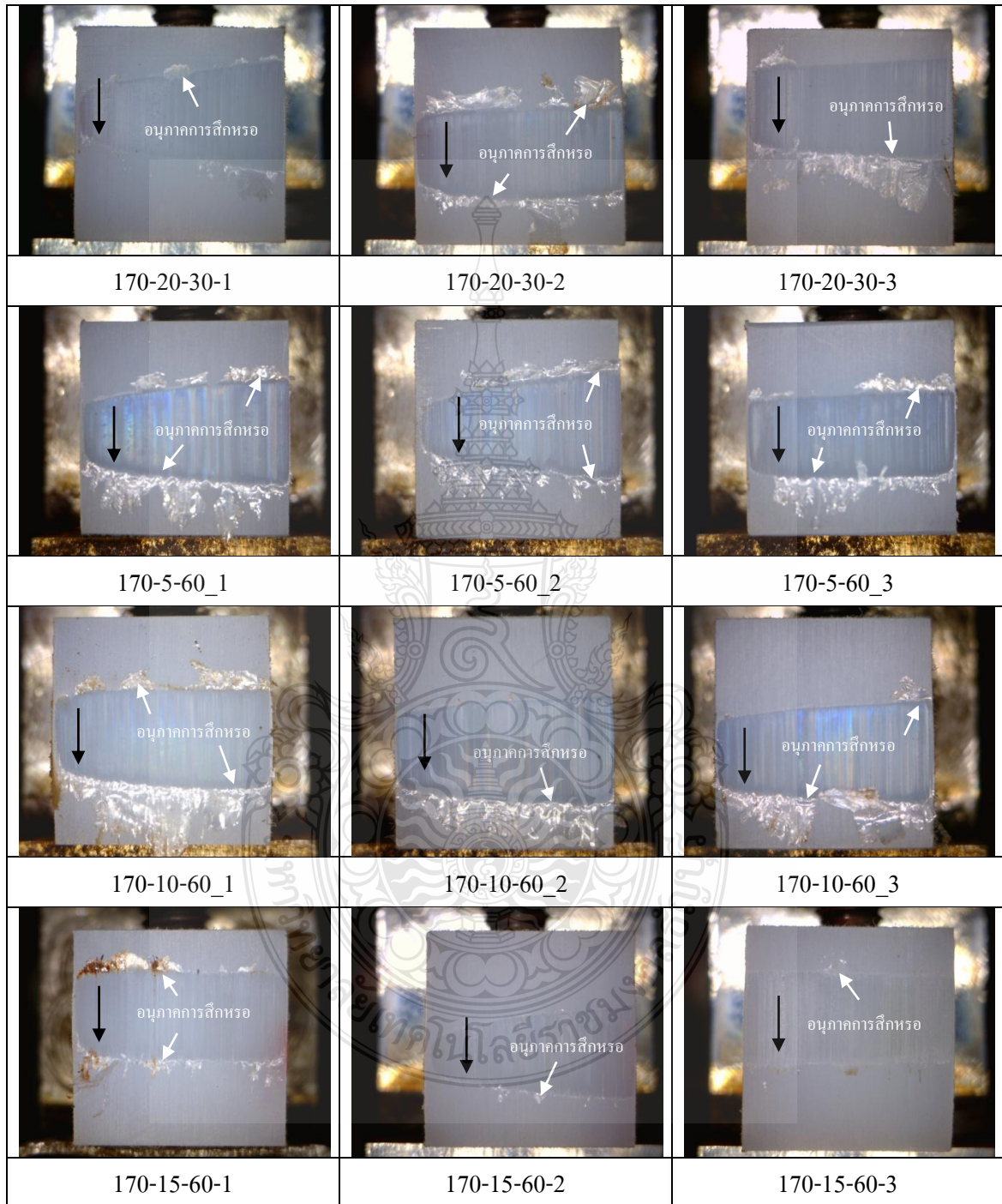


ภาคผนวก ง
ภาพลักษณะรอยการตีกรอ

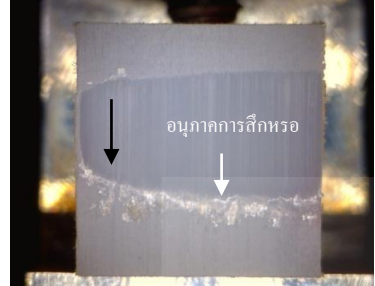
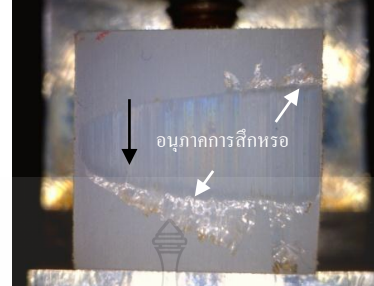
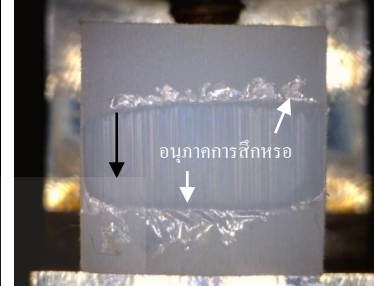
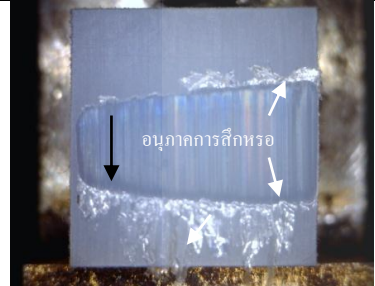

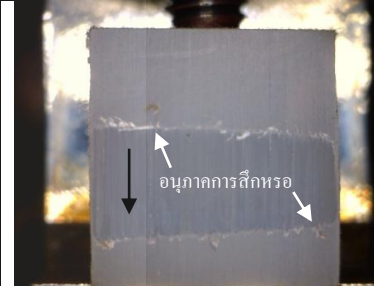


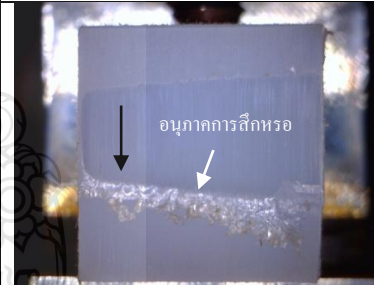
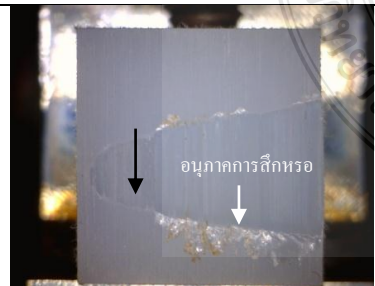

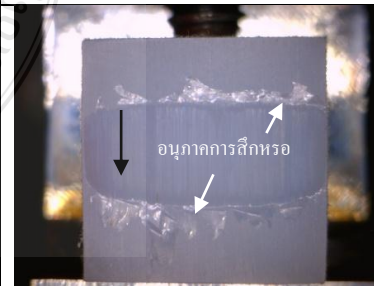
ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

		
UHMWPE_1	UHMWPE_2	UHMWPE_2
		
170-5-30_1	170-5-30_2	170-5-30_3
		
170-10-30_1	170-10-30_2	170-10-30_3
		
170-15-30-1	170-15-30-2	170-15-30-3

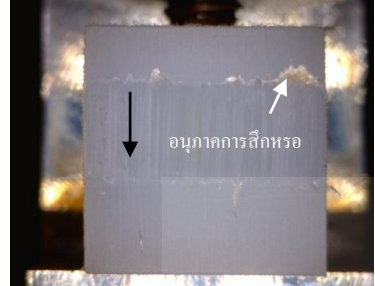




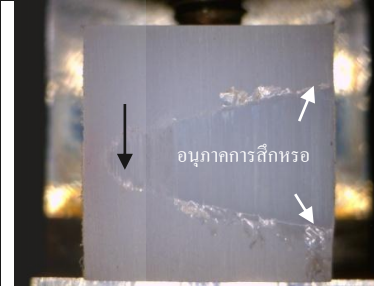


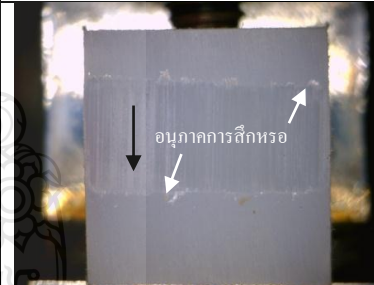
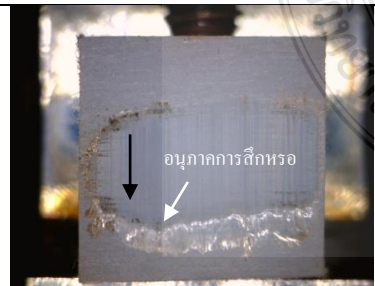
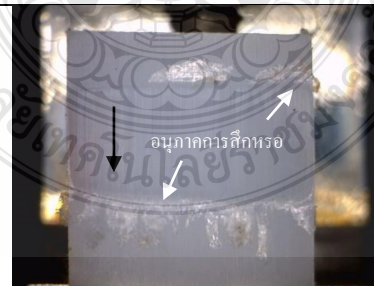

ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)




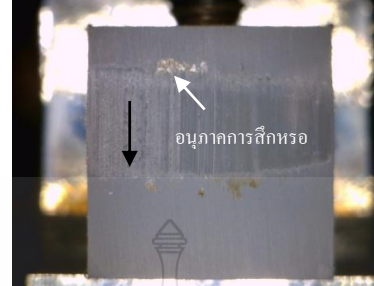
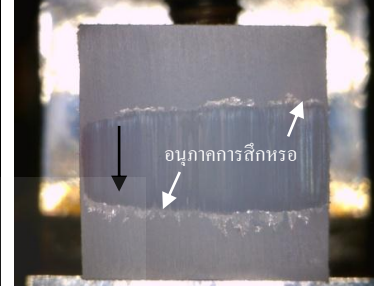

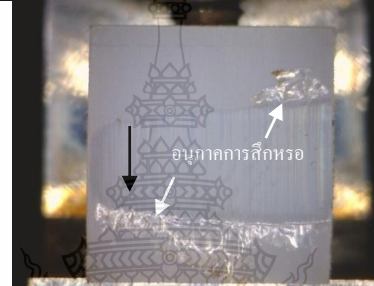
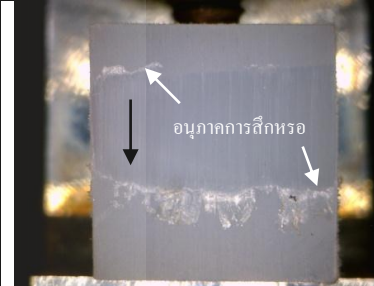
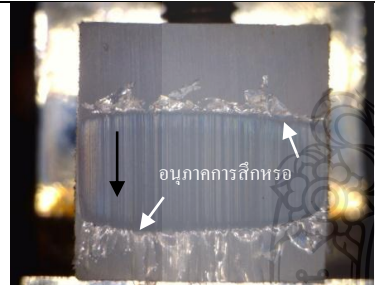

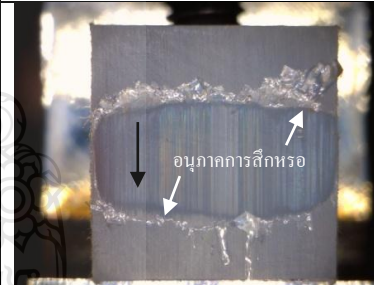
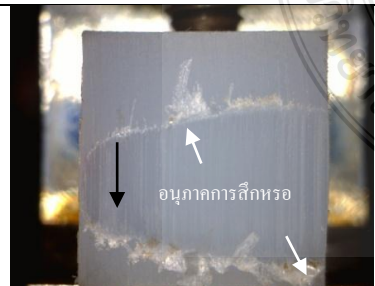

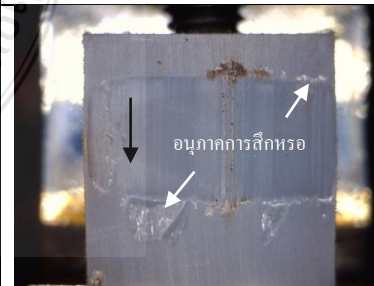
ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)

		
170-20-60-1	170-20-60-2	170-20-60-3
		
170-5-90_1	170-5-90_2	170-5-90_3
		
170-10-90-1	170-10-90-2	170-10-90-3
		
170-15-90-1	170-15-60-2	170-15-90-3

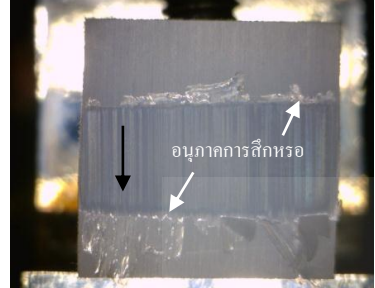
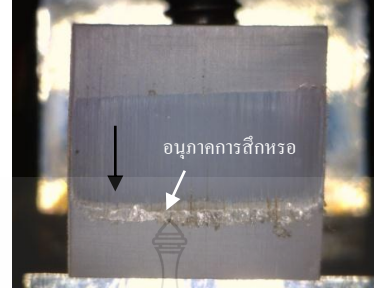
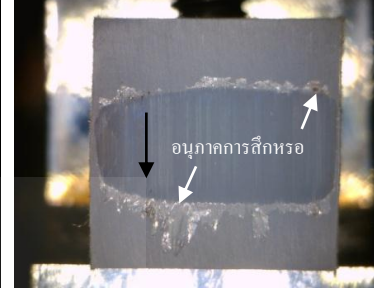
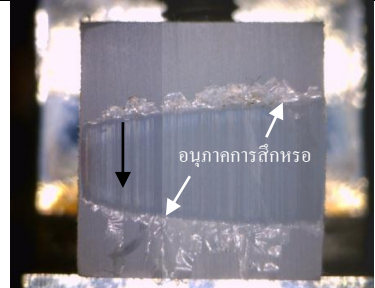
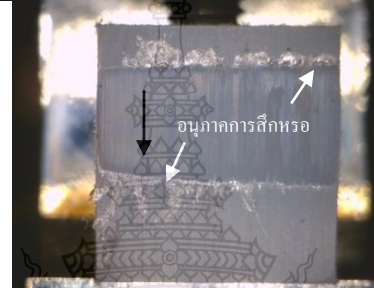
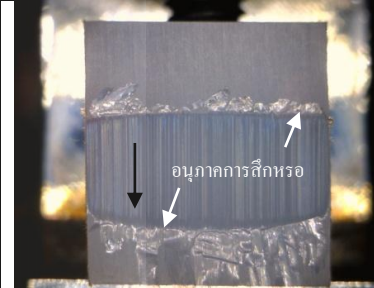
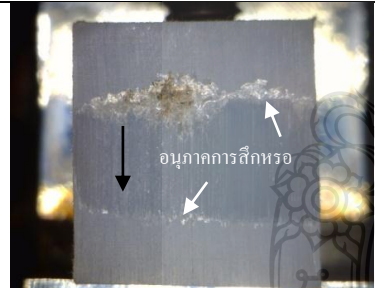

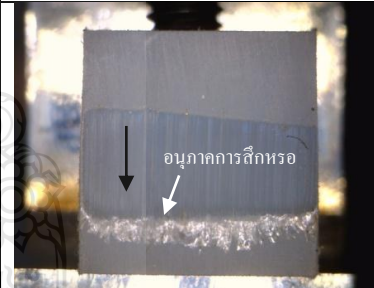
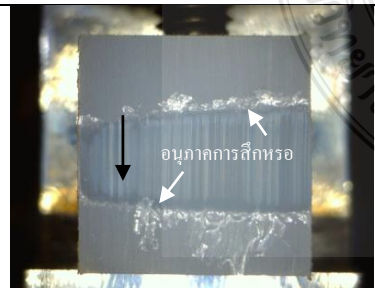

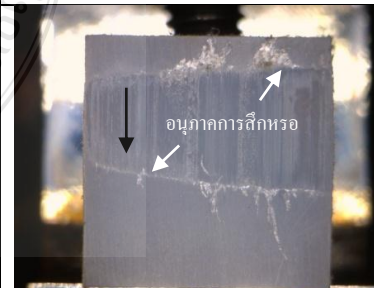
ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)

		
170-20-90-1	170-20-90-2	170-20-90-3
		
190-5-30-1	190-5-30-2	190-5-30-3
		
190-10-30-1	190-10-30-2	190-10-30-3
		
190-15-30-1	190-15-30-2	190-15-30-3

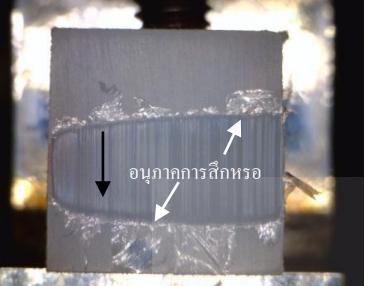

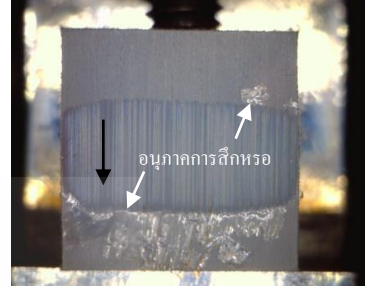
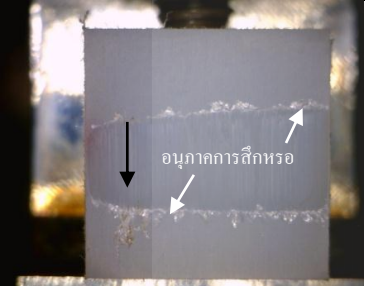
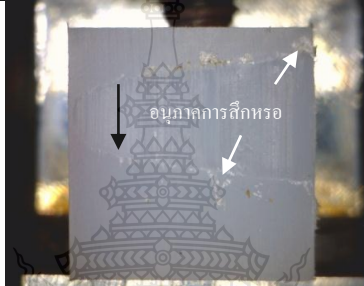

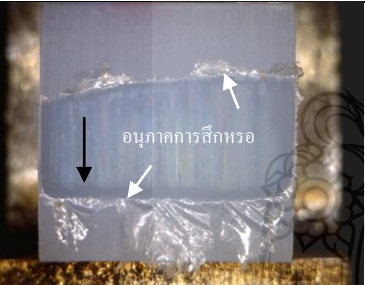




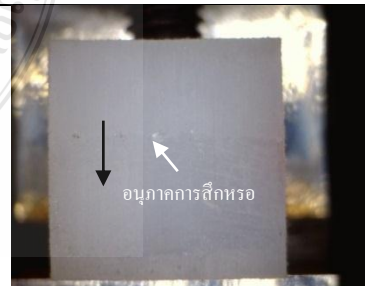
ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)

		
190-20-30-1	190-20-30-2	190-20-30-3
		
190-5-60-1	190-5-60-2	190-5-60-3
		
190-10-60-1	190-10-60-2	190-10-60-3
		
190-15-60-1	190-15-60-2	190-15-60-3

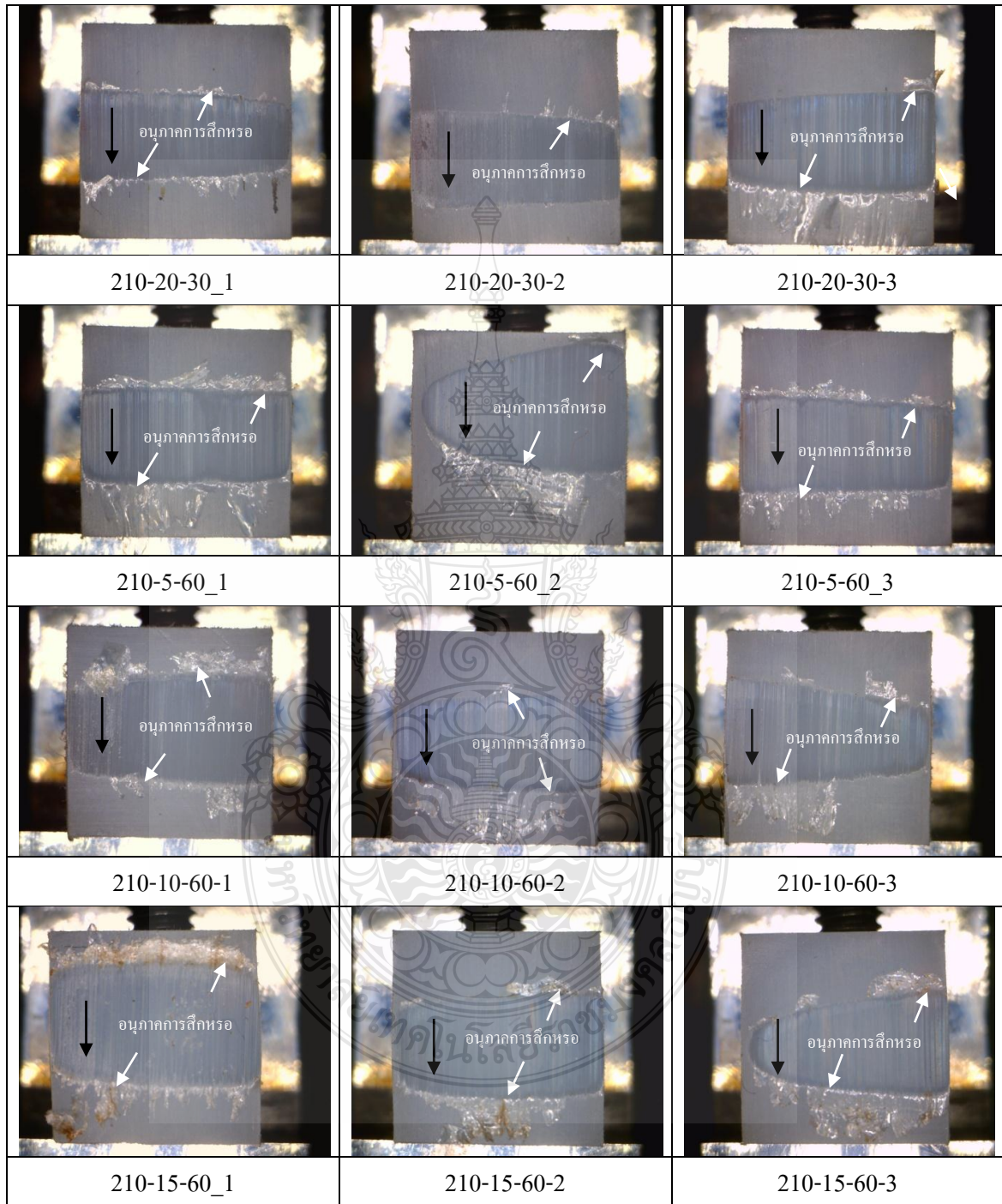
ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)

		
190-20-60-1	190-20-60-2	190-20-60-3
		
190-5-90-1	190-5-90-2	190-5-90-3
		
190-10-90-1	190-10-90-2	190-10-90-3
		
190-15-90-1	190-15-90-2	190-15-90-3


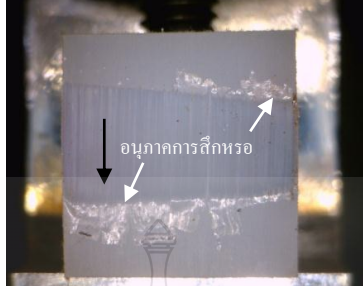

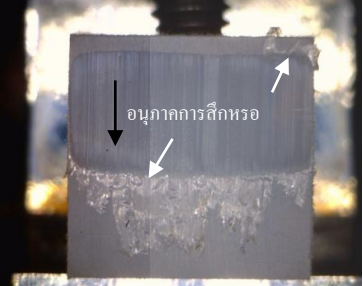
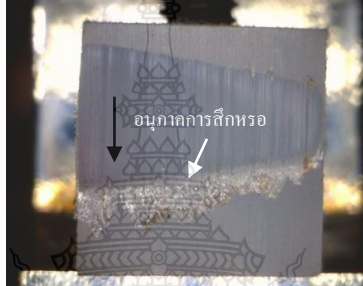
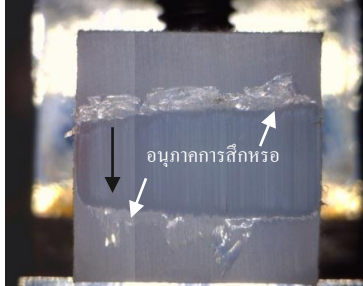
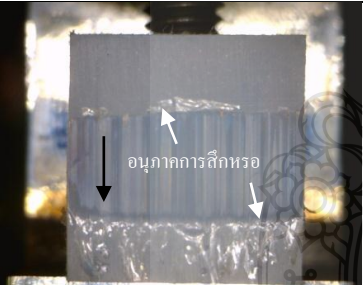

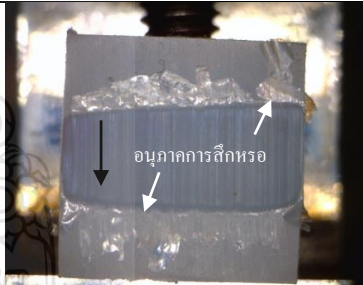
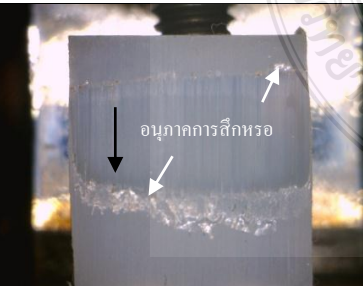

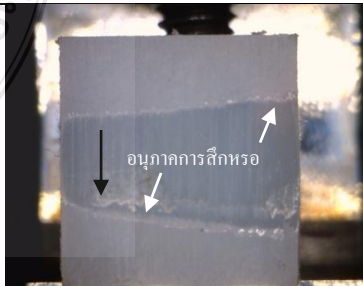
ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)

		
190-20-90-1	190-20-90-2	190-20-90-3
		
210-5-30_1	210-5-30_2	210-5-30_3
		
210-10-30_1	210-10-30_2	210-10-30_3
		
210-15-30_1	210-15-30_2	210-15-30_3

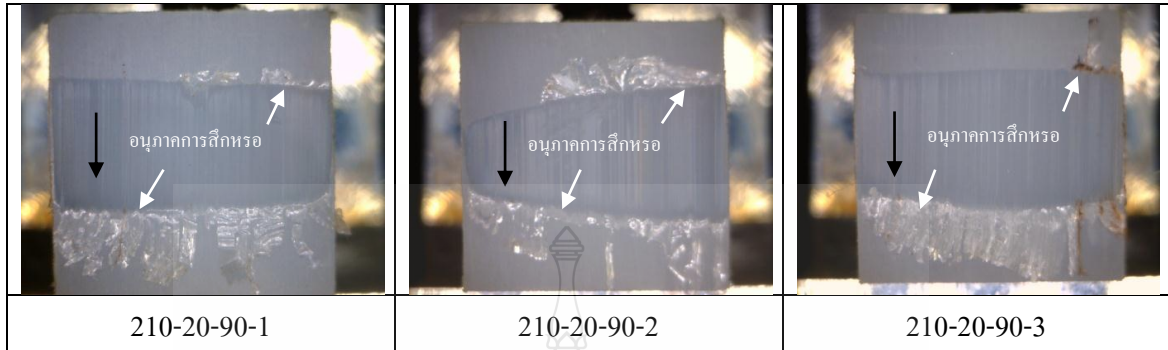
ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)



ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)

		
210-20-60_1	210-20-60-2	210-20-60-3
		
210-5-90_1	210-5-90_2	210-5-90_3
		
210-10-90-1	210-10-90-2	210-10-90-3
		
210-15-90-1	210-15-90-2	210-15-90-3

ตารางที่ ง-1 แสดงลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน ภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ(ต่อ)

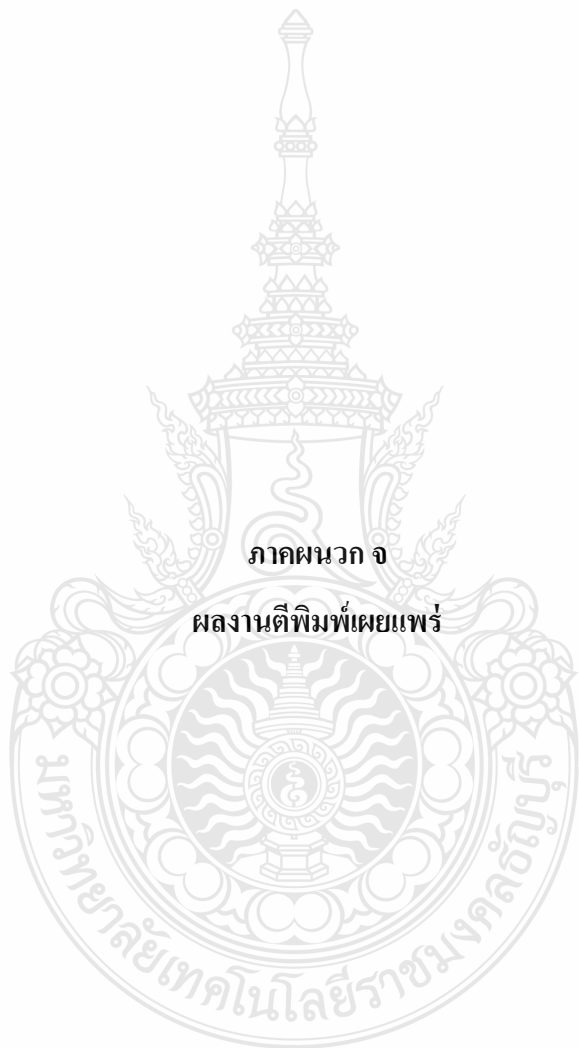


หมายเหตุ

ทิศทางการไหลตามวงแหวนคู่สัมผัส (ลูกศรเส้นสีดำ)

อนุภาคการสึกหรอ (Wear Debris) บริเวณการสะสมรอยสึกหรอ (ลูกศรเส้นสีขาว)





ภาคผนวก จ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Industrial Engineering Department
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang



การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2557

IE NETWORK CONFERENCE 2014

30-31 October 2014
Novotel Suvarnabhumi Airport Hotel
www.ienet-th.org

Diversifying Industrial Engineering
for Future Generation

Proceedings



การไฟฟ้านครหลวง
Metropolitan Electricity Authority



KISTLER
measure. analyze. innovate.



คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการ

๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ประธาน กรรมการ
๒. รองศาสตราจารย์ ดร.จิตรา รุ่งกิจการพานิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๓. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๖. ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๗. ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	กรรมการ
๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย กานดำนันทะ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
๙. ดร.ชนะ รักษศิริ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	กรรมการ
๑๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๒. ดร.เพ็ญสุดา พันฤทธิ์ดำ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๓. ดร.ฐิติกร พัฒนพิบูล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๔. ดร.นันทวิภา จันทศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๕. ดร.ศิริรัตน์ หมั่นวณิชกุล	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา	กรรมการ
๑๖. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๗. รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญรงค์ สายแก้ว	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๑๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา ราชฤทธิ์ภักดิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปรมิธาน พีร์พัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาพจน์ เจริญอภิบาล	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพัฒน์ เศรษฐ์สมบูรณ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ
๒๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขอังคณา แกลงกัณฑ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	กรรมการ

๒๔. รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๕. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์วงค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล สมุทรคุปต์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๐. ดร.วริษา วิสิทธิ์พานิช	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๑. ดร.วสวัชร นาคเขียว	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๒. ดร.อนิรุท ไชยจารุวัฒน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	กรรมการ
๓๓. รองศาสตราจารย์ ดร.เขวลิต ลิ้มมณีวิจิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๔. รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๕. รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โขมพิตรภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ อุดมศักดิ์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๓๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ สุนทรวานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงมาน เตียววัฒนรัฐติกาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๑. ดร.ไพบุลย์ ช่างทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๒. ดร.ช่อแก้ว จตุรานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๓. ดร.พิเนษฐ์ ศรีโยธา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ

๔๔. ดร.วิบูลย์ ตั้งวัชรธรรมกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๕. ดร.อุษณีย์ คำพูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๖. อาจารย์สมพร เพียรสุขขมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๗. อาจารย์สุจินต์ ธงถาวรสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี	กรรมการ
๔๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุศล พิมาพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
๔๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ	กรรมการ
๕๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พรเทพ แก้วเชื้อ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๑. อาจารย์ธนภุต ไซติภาวริศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๒. อาจารย์ธนิดา สุนาร์ักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๓. อาจารย์พัฒนพงษ์ แสงหัตถวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๔. อาจารย์วรินทร์ เกียรติคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	กรรมการ
๕๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีชัย จันทร์มณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชาญ ช่วยพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๗. ดร.ฤทธิชัย เกาเนียม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลกรุงเทพ	กรรมการ
๕๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ณฐา คุปต์ชัยชูร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๕๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรัตน์ ตรีชวนพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราช มงคลธัญบุรี	กรรมการ

๖๒. ดร.ชัยยะ ปราณีตพลกรัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๓. ดร.ระพี กาญจนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	กรรมการ
๖๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ อินต๊ะวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนวิภา อาวิทพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๖. ดร.แมน ต้อยแพร่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๗. ดร.บรรเจิด แสงจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๘. ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๖๙. ดร.อลงกต ลีเมธีญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพ เชียงใหม่	กรรมการ
๗๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เดช เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยงยุทธ ตุลยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๒. อาจารย์รอมฎอน บูระพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	กรรมการ
๗๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทโชติ อุดมศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรินทร์ น่วมทิม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ

๗๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ร่ำพิง เจริญยศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๖. ดร.สมพงษ์ พิริยานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	กรรมการ
๗๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๗๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมเกียรติ ศรีศิลา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๗๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรเดช สุวิทยารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทัศน์ ยอดเพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุรพจน์ วัชโรภาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	กรรมการ
๘๒. รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ชัย จิตตะมัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๕. ดร.จงกล ศรีธรร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๖. ดร.ปวีร์ ศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	กรรมการ
๘๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุนธ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
๘๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	กรรมการ
๘๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา พิทักษ์กุล	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๑. ดร.สัมพันธ์ รัฐวิบูลย์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๒. ดร.ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๓. ดร.สมหญิง งามพรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๔. อาจารย์อรดี พฤตศรีณนันท	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	กรรมการ
๙๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ถตวิรุฬห์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรีสัจจา วิทยศักดิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๙๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิษญา สิมารักษ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ

๙๙. ดร.ขวัญนิธิ คำเมือง	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๑๐๐. ดร.ภาณุ บูรณจารุกร	มหาวิทยาลัยนเรศวร	กรรมการ
๑๐๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์ ศรีสำเร็จ	มหาวิทยาลัยปทุมธานี	กรรมการ
๑๐๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรทอง ทองจัด	มหาวิทยาลัยพะเยา	กรรมการ
๑๐๓. รองศาสตราจารย์สุคนธ์ อาจฤทธิ	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กรรมการ
๑๐๔. อาจารย์ณภัทร อินทนนท์	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	กรรมการ
๑๐๕. รองศาสตราจารย์ศุภชัย นาทะพันธ์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรนาถ ไกรภู	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๗. ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๘. ดร.รณชัย ศิโรเวฐนกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๐๙. ดร.ศุภชัย ราชภูริศิริ	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๐. อาจารย์กัญจน์ คณาธารทิพย์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๑. อาจารย์ดวงยศ สุภักดิ์	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๒. อาจารย์ธนา สาดรา	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๓. อาจารย์พิมพ์วัลย์ สุตะโคตร	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรรมการ
๑๑๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญจันทร์ จริงจิตร์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัครไพบูลย์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๖. ดร.พิชญ มนัสปิติ	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๗. อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไผ่	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๘. อาจารย์พรคพงษ์ แก่นณรงค์	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๑๙. อาจารย์ศิลปชัย วัฒนเสย	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๐. อาจารย์สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๑. อาจารย์สมพร พรหมดวง	มหาวิทยาลัยรังสิต	กรรมการ
๑๒๒. ดร.เลิศเลขา ธนะชัยพันธ์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง	กรรมการ
๑๒๓. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๕. ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๖. ดร.พงษ์เทัญ จันทนะ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๗. ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ

๑๒๘. ดร.สิริเดช ชชาตินิยม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	กรรมการ
๑๒๙. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๐. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชวลิต มณีศรี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๒. ดร.อัศวิน วงศ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๓. อาจารย์จักรพันธ์ กัณหา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๔. อาจารย์ธนิศ ศรีวะระมย์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม	กรรมการ
๑๓๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ อนุรัตน์านนท์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ลีลาทวิวงศ์	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๘. ดร.กัญญา ทองสนิท	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๓๙. ดร.คณิศ พลอยดน้อย	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๐. ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๑. อาจารย์วิชัย จันทร์รักษา	มหาวิทยาลัยศิลปากร	กรรมการ
๑๔๒. รองศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุธรรมานนท์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๓. รองศาสตราจารย์วันดา รัตน์มณี	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลางเดือน โภชนา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตน์วิไล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๖. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุจน์ สังขพงศ์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๗. ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจริญ เจริญจิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๘. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สงวน ตั้งโพธิธรรม	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๔๙. ดร.วันฐิตพงษ์ คงแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	กรรมการ
๑๕๐. รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ริจิรวนิช	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วินิช ทวี	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐภูมิ ฐู่แทนคุณ	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๔. อาจารย์ณัฐพล พุฒยางกูร	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๕. อาจารย์ปยุตยา คีนดี	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๖. อาจารย์ชานิตา พิทยานนท์	มหาวิทยาลัยสยาม	กรรมการ
๑๕๗. อาจารย์จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ

๑๕๘. อาจารย์จิตลดา หมายมั่น	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
๑๕๙. อาจารย์วรลักษณ์ เสถียรรังสฤษฏ์	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
๑๖๐. อาจารย์อรอุมา กอสนาน	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย	กรรมการ
๑๖๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ตะวันฉาย โพธิ์หอม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลิน เพ็ชรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ สินธุเชาวน์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๕. ดร.จรวัยพร แสันทวีสุข	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๖. ดร.ธารชуда พันธนิกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๗. ดร.จริยาภรณ์ อุ๋นวงษ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๘. ดร.สัมพันธ์ โอหาพิริยกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๖๙. อาจารย์ฐิตินันท์ ศรีสุวรรณดี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	กรรมการ
๑๗๐. พันโทหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัญพัชร คง พัฒนานันท์	โรงเรียนนายร้อยพระ จุลจอมเกล้า	กรรมการ
๑๗๑. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๒. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศุทธิ์ พงศ์ชัยฤกษ์	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๕. ดร.เอกอุ ธรรมกรบัญญัติ	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๖. ดร.กรกฎ เหมสถาปัตยกรรม	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๗. ดร.ดำรงเกียรติ รัตนอมรพิน	สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น	กรรมการ
๑๗๘. รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๗๙. รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ คล่องบุญจิต	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๐. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๑. รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๒. รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ

๑๘๓. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ยวงใย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๔. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรพลสิทธิ์ ลิ้มบรรดินันท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๕. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๖. ดร.เชาวลิต หามนตรี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๗. ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๘. ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๘๙. ดร.พลชัย โชติปราชญ์กุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๙๐. ดร.พิชญ์วดี กิตติปัญญางาม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ
๑๙๑. อาจารย์ธรรณ เจียรตระกูล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	กรรมการ และ เลขานุการ

หมายเลข	กระบวนกรที่มีรูปเล่มแนบ	นครคนวัย โฉเจจัญ		
195	ผ้าไมคักไมทอจากพอลิเมอรยอยสลายใตทางน้าภาพ	ธัญญา ดวงแก้ว นครคนวัย โฉเจจัญ นที ศรีสวัสดิ์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
198	เส้นใยสององค้ประกอบพอลิแลคติกแอซิดและพอลิมิวที่ลีน ซิกนัล แอมเบเล็อกและแกน	กิตติพงษ์ หริ่มจำ นครคนวัย โฉเจจัญ นที ศรีสวัสดิ์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
200	การเคลือบผิวสารประกอบไฮดรอกซิดอิมพ้าโทและคอลลลา เจนบนผิวโลหะไททาเนียมผสมด้วยวิธีการเคลือบด้วย ไฟฟ้า	ชญ์สิภษณ์ บูมสุด ศุภชัย สุรพันธ์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
202	การตรวจติดตามและสรอยยี่ต่วนผิวเลนส์ในกระบวนการ ตัดขอบ	อุดมศักดิ์ เกตุอินทร์ สมเกียรติ์ ตั้งจิตสิดเจจัญ	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
203	การศึกษาผลกระทบจากการสั่นแบบอัลตราไฮฟิคต่อ คุณสมบัติทางกลของงานเชื่อมระหว่างวัสดุ 25Cr-35Ni ไม ผานการไม่งานกับ 25Cr-35Ni ผานการไม่งาน	พลากร สกิดวิสัย มารวิโชค มีพัฒน์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
206	การออกแบบและสร้างเครื่องตัดแยกปลาไส้ตันโดยใช้ระบบ สั่นสะเทือน	สมจิตต์ อักษรธรรม	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
210	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการผลิตและอัตราส่วน แรงตดพลาตในกระบวนการกลึงซึเอ็งซี	บาลิตวงษ์ ตั้งกัณฐาน สมเกียรติ์ ตั้งจิตสิดเจจัญ	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
215	การหาสัณษณพหุของผลต้งต้งโลหะผสมนิกเกิล-ทอ นาในคาร์บอนสำหรับกรพ่นเคลือบด้วยคาร์บอน	ดลวิวัฒน์ ดีสม ปัยสิทธิ์ บรรจงประเสริฐ	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
220	อิทธิพลของปัจจัยมุมที่เคลือบแรงในการขึ้นรูปแผ่นอลูมิ เนียมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแม่ตดเนื่องโดยการสั่นพัลเป็น จุด	ธงชัย เทจเงินทร์ดี ศิริชัย ตอสกุล	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
229	ผลกระทบของซิลิกอนในกระบวนการสเลออลูมิไนซซิงที่ เคลือบบนเหล็กกล้าไร้สนิมไร้คาร์บอนความต้านทานการ เกิดคาร์บูไรเซชัน	นิตพล ภาทพิทักษ์ มีโยรส พรหมดีเรก	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
230	ผลของขนาดยาตดการแพร่ของจากพอลิเอทรีลาไมตไฮโดร เจลสำหรับประยุกต์ใช้ในนาบาสงยาผ่านผิวหนังควบคุม ด้วยไฟฟ้า	สุนทร นาคแท้ สุนนมาลัย นิยมกลาง	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
243	การศึกษาเปรียบเทียบเอกซโพเนอรับสำหรับกรฉายรัง สีอครยี่แม่แบบพัลสเลดแมมท้าวไปในการตรวจสอบก่าย ภาพรังสีแบบต้งทัง	พิสิษฐ์ รังนากะ มารวิโชค มีพัฒน์ สมพร เพ็ชรสมานที	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
253	ผลของความต้งคักไฟฟ้าตดสมมติเบ็งกลไฟฟ้าของอิลลา สโตเมอรัไนไมนัสสำหรับแอคทูเอออร์	ณกันตย์ นฤน สุนนมาลัย นิยมกลาง	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
267	การศึกษาการตรวจสอบด้วยภาพถ่ายรังสีในมีนงานที่มี หลายความหนาตดต้งกันโดยไปเทคนิคหลายพัลส การวิเคราะห์ความเสียหายของโมตดในเครื่องตดเตช พลาสติก	พิสิษฐ์ รังนากะ มารวิโชค มีพัฒน์ จรายพร แชนพัสม ธน ทองกลม	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
274	การศึกษาการเตรียมสูตรคอมพาวด์พลาสติกพอลิแลคติก แซดิด เพื่อการขึ้นรูปเป็นแผ่นไฟม	ศศิธร แก้วจัญญ กุลาดิ์ สังกัณท์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
276	การศึกษาสมบัติพอลิแลคติกแซดิดเมื่อไม่นำมันลหุงเป็น สารพ่นสกาพลาสติก	วิรัชชภา รุ่งเรือง กุลาดิ์ สังกัณท์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
292	มัจจยที่มีอิทธิพลตดการขึ้นรูปอะลูมิเนียม	เกษม พิพัฒน์ปัญญานกุล วิสิษฐ์ภษณ์ พรตดิ์ กัญญะ พิพัฒน์ เพชร คุณพล	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
301	การปรับปรุงสมบัติทางกลของมีนงานผสมเงินสเลอรัล 925 ด้วยวิธีการแม่บึง	นครคนศักดิ์ ธรรมโชติ อรศกัณท์ มาใหญ่	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
303	การวิเคราะห์สมบัติของตัวแปรที่มีผลตดสมบัติทางกลของ วัสดุ UHMWPE โดยกรรมวิธีการตดขึ้นรูปร้อน	วิโรจน์ จังถกรย ศิริชัย ตอสกุล สุรตดิ์ บรรณศิริ สุตกัณท์ นช้ไธย่นา	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
304	การเตรียมแผ่นบางขนาดนาโนจากแอลลูไมนทงของไทย สำหรับการเคลือบจากกลดสารเคมีทงทงทงใตแสงใน บ่างที่ตดต้งเห็น	พรทพิไล หงกรก โทก รัญชภา แจจัญญอม สรพงษ์ ภาสุปรัย สุตกัณท์ ชญุทอง	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
325	การลดของเสียจากการกัตรอยแเดกร้าในกระบวนการหล่อ ฉีดอลูมิเนียม:กรณีศึกษาผลิตกัทกัทไฟฟูร LM3024	กัศุสมน ตาดะโยธิน มนตรี พงษ์หลัง	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
327	การศึกษาการเกิดชั้นสารประกอบเบ็งโลหะระหว่างโลหะ มดคีไร้สารตะกั่ว Sn-0.7Cu และโลหะพ่นตางชนิดโดยการ ปดกัทแม่ขั้วไฟฟูร	นิวัฒน์ มู กัณ อรจิตร แจมแสง	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
331	การวิเคราะห์การสักรของซิลยงกัทกัทงั้งเคราห์เพื่อการ บำรุงรักษาเบ็งปรับปรุงเกาห์และการบำรุงรักษาเบ็ง พยกรณ	นรากร เสนกัณ สุรพล รามฐรณ์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
338	การศึกษามัจจยที่มีผลกระทบต่อสัณษณพดรับของการ เคลือบแม่ตดแสงสะท้อนโดยกระบวนการเคลือบสารด้วย การระเหยของแข็ง	ธานสุรณั์ ฉันทะกุล พิรญาณั์ แก้วสุรกรณ มัมพลง ยวงโย	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
345	การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลตดกระบวนการตดขึ้นรูปของผลิต กัทกัทคอนนิตเดอรัด้วยวิธีไฟฟูรในตดอลิมนต	ปานาญ ทอณนาก ปัญญานันธิ์ อิมทรพัฒน์	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
347	การศึกษามัจจยที่มีอิทธิพลตดการทงทงเลือกกระบวนการ	ธนภัทร มณีแสง ขวัญนัธิ์ ต่าเมือง	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
353	ผลกระทบของต้งการตดต้งตัวอย่างในกระบวนการมันทก สัญญาณอะคูสติกตดต้งการตดต้งของวัสดุในการ ทดสอบการต้งแม่ตด แกนต้ง	กาสสิรพณ์ ศรีสำเรจ รามิล เกตรกรกุล อรรรณ พรหมมาหลวง	Materials and Manufacturing Processes	View PDF
355	การปรับปรุงผิวหน้าเหล็กกล้าศรีอิมมีอานรอน นวตฐาน JIS เกรด SKD61	อรรรกรณั์ วรบุตร ตุจิกรณั์ นามตง ไกรภณั์ พูลทรัพย์ พิจารณั์ จรเสนา	Materials and Manufacturing Processes	View PDF

การวิเคราะห์หัตถิผลของตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ UHMWPE โดย
กรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน
An Analysis of The Effect of Variable on Mechanical Property of UHMWPE By
Hot Compression Molding Process.

วิโรจน์ ฉัตรเกษ¹ ศิริชัย ต่อสกุล² สุรัตน์ วรรณศรี³ สุรศักดิ์ มะธิโตปะนา³

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี
³สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
อีสานนครราชสีมา
E-mail: chudget_ie@hotmail.com

Wirot Chudget¹ Sirichai Torsakul² Surat Wannasri³ Surasak Matitopanum³

^{1,2}Department of industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Patumtanee 12110

³Department of industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of
Technology Isan, Nakhonratchasima 30000
E-mail: chudget_ie@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ แรงดันและเวลาของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อความทนทานต่อการสึกหรอของวัสดุ
กึ่งพอลิเอทิลีนโมเลกุลสูง (Ultra High Molecular Weight Polyethylene; UHMWPE) จากการทดสอบขึ้นรูป
ด้วยกรรมวิธีการอัดขึ้นรูปร้อน โดยกำหนดสภาวะการทดลองขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 170, 190 และ 210°C แรงดัน 5, 10, 15
และ 20 MPa. และเวลาของอุณหภูมิ 30, 60 และ 90 นาที เพื่อเปรียบเทียบกับก่อนวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้าจาก
ต่างประเทศ สำหรับการทดสอบสมบัติทางกล ประกอบด้วยการทดสอบแรงดึงและความแข็ง ขนาดของชิ้นทดสอบแรง
ดึงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D638 สำหรับในกรณีทดสอบความแข็ง ดำเนินการทดสอบด้วยวิธีทดสอบ Durometer
แบบ Shore D อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ผลการศึกษารายนี้ พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่
มีค่าความเค้นครากและความเค้นแรงดึงสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ แต่มีความยืดตัวต่ำกว่า ที่
สภาวะอุณหภูมิที่ 170 °C แรงดัน 15 MPa และเวลาของอุณหภูมิ 30 นาที มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุด
และค่าความยืดตัวสูงสุดเท่ากับ 22.83 ± 2.37 MPa, 24.93 ± 2.97 MPa และ 337.78 ± 22.89 % ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้น
ทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีค่าเท่ากับ 20.87 ± 1.01 MPa, 22.93 ± 2.27 MPa และ
396.67 ± 37.43 % ตามลำดับ สำหรับค่าความแข็ง พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีค่า
ความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 52-54 Shore D ซึ่งต่ำกว่าชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศที่
มีค่าความแข็งเท่ากับ 63.47 ± 2.19 Shore D เนื่องจากพบ ฟังก์ชันการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่บ่งบอกการ
เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้มีปริมาณความเป็นผลึกและความแข็งแรงลดลง
คำหลัก UHMWPE สมบัติทางกล ความเค้นแรงดึง ความยืด ความแข็ง Shore D

Abstract

The work is to study the effect of temperature, pressure and temperature time on Wear resistance properties of bulk Ultra High Molecular Weight Polyethylene; UHMWPE that performed by Hot compression mold process to comparison with imported bulk UHMWPE. Experimental compression mold condition consists of the temperature of 170, 190 and 210 °C and pressure 5, 10, 15 and 20 MPa with the temperature exposure time of 30, 60, and 90 minutes. The Mechanical test consists of tension and hardness test. Tensile specimens according with ASTM D 638 standard In the case of hardness test, it was tested by mean of Durometer with the type of Shore D hardness that according with ASTM D 2240 standard. Result, most experimental formed bulk UHMWPE showed that the higher yield strength and ultimate tensile strength but lower Elongation in contrast with imported bulk UHMWPE. An optimum compression mold condition of the temperature of 170 °C and pressure of 15 MPa with exposure time of 30 minutes obtained minimum yield strength, ultimate tensile strength and Elongation of 22.83 ± 2.37 MPa, 24.93 ± 2.97 MPa and $337.78 \pm 22.89\%$ respectively while imported bulk UHMWPE obtained of 20.87 ± 1.01 MPa, 22.93 ± 2.27 MPa and 396.67 ± 37.43 % respectively. For hardness test, most experimental formed bulk UHMWPE obtain in the range of 52-54 Shore D that lower than imported bulk UHMWPE that its hardness of 63.47 ± 2.19 Shore D because by a cross-linking in polymer chain had shown variation peak of carbonyl group (C=O) that indicated the oxidation reaction in the end of polymer chain and affect to decrease degree of crystallinity and strength of polymer.

Keywords: UHMWPE, Mechanical properties, Ultimate tensile strength, Elongation, Shore D hardness

1. บทนำ

ปัจจุบันมีแนวโน้มในการใช้วัสดุพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นในงานอุตสาหกรรมยานยนต์ การต่อเรือ งานสิ่งทอ ปีโตเคมีภัณฑ์โดยมีทั้งผลิตภัณฑ์พลาสติกเคมีภัณฑ์ที่ผลิตในประเทศและนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกของโพลีเอทิลีน โดยมีชื่อเรียกว่า Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) ซึ่งมีสมบัติเด่นคือ มีความหนาแน่นของโมเลกุลสูงถึง 6,000,000 โมล/กรัม ทนต่อแรงเสียดทาน แรงกระแทก การกัดกร่อน ต้านทานการสึกหรอ และมีความลื่นไหลดี

จากงานการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า Steven M. Kurtz. [1] ได้กล่าวถึงกระบวนการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE โดยสามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีอัดขึ้นรูปร้อนหรือรีดอัดขึ้นรูป (Hot Compression Molding or Ram Extrusion Process) ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากวัสดุ

UHMWPE มีความเหนียวสูงและไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า จึงไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีทั่วไป อาทิเช่น การเป่าขึ้นรูป การฉีดขึ้นรูปหรือการอัดรีดขึ้นรูปด้วยสกรู นอกจากนี้ได้ศึกษางานวิจัยของ Shibo Wang และ Shirong Ge [2] ซึ่งได้ทำการศึกษาลักษณะของแรงดันแม่พิมพ์ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE โดยทำการปรับระดับแรงดันต่างกัน 3 ระดับ ที่ แรงดัน 10, 15 และ 20 MPa. เพื่อการวิเคราะห์ความแข็งแรงต่อรอยขีดข่วนและกลไกการสึกหรอ J.J. Wu, C.P. Buckle และ J.J. O'Conner [3] ได้ทำการศึกษาความสมบูรณ์ทางกลของการอัดขึ้นรูปวัสดุ UHMWPE: ผลกระทบที่แตกต่างกันของเงื่อนไขกระบวนการผลิต โดยทำการวิเคราะห์ผลทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี ทางความร้อนและความต้านทานแรงดึง Sangeeta Hambir และ J.P. Jog [4] ได้ทำการศึกษาผงพอลิเมอร์โพลีเอทิลีน 2 เกรด คือ

PTPE และ UHMWPE ที่ได้จากการเทคนิคการบดอัด ผงภายใต้แรงดันและการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมละลาย (Sintering processes) เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและพัฒนาค่าความแข็งของวัสดุ

ดังนั้นผู้ทำวิจัยมีความประสงค์ที่จะการศึกษากระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนแผ่นพลาสติก (Hot compressed process) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปร้อนก้อน UHMWPE และทำการวิเคราะห์ผลการตรวจสอบสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพและความต้านทานการสึกกร่อนของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน โดยต้องการผลทดสอบที่ดีที่สุด โดยมีค่าตัวแปรที่สามารถควบคุมได้อยู่ 3 ตัวแปร คือ สภาวะอุณหภูมิความร้อนภายในแม่พิมพ์ แรงดัน และระยะเวลาคงอุณหภูมิที่เหมาะสมของการผลิต

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) โดยใช้ผง UHMWPE เกรด SLL-6-6020 ซึ่งมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 6.5×10^6 g/mol ขนาดอนุภาคเท่ากับ 80-100 μm ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Corporation Limited จากประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

2.2 สภาวะของการทดลอง

สภาวะของการทดลองอัดขึ้นรูปร้อน ประกอบด้วย อุณหภูมิที่ 170, 190 และ 210 °C แรงดัน 5, 10, 15 และ 20 MPa. และระยะเวลาคงอุณหภูมิ 30, 60, 90 นาที โดยการนำผง UHMWPE น้ำหนัก 120 กรัมเทลงในแม่พิมพ์ (Cavity) ขนาด $160 \times 80 \times 55$ มม. พร้อมทำการเกลี่ยผง UHMWPE ให้เสมอกัน ทำการปิดประกบแม่พิมพ์ด้วยพิช (Punch) ดังแสดงในรูปที่ 1 แล้วนำแม่พิมพ์ไปขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression Molding) ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นเลื่อนแม่พิมพ์ลงมาจากบนแท่นระบบหล่อเย็น โดยอุณหภูมิหล่อเย็นอยู่ที่ 25 °C และอัตราการไหล 3 ลิตร/นาที



รูปที่ 1 แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปร้อน



รูปที่ 2 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน

2.3 การวิเคราะห์ตรวจสอบและการทดสอบต่างๆ ของวัสดุ UHMWPE

การวิเคราะห์ผลการทดสอบและสมบัติต่างๆ ประกอบด้วย การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล ซึ่งการวิเคราะห์ตรวจสอบเอกลักษณ์ทางเคมี ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer: FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Frontier เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Functional Groups) จากสเปกตรัมสัญญาณการสั่นของพีคต่างๆ ที่เกิดขึ้น [3-5]

สมบัติทางกายภาพ การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและพื้นผิวแตกหักของชิ้นทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope ; SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV. และเครื่องเคลือบ JEOL JFC-1600 Auto fine Coater [6]

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry; DSC ยี่ห้อ PERKIN ELMER DSC 7 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับพลังงานความร้อน ขณะหลอมละลาย (enthalpy, $\Delta H_{\text{endotherm}}$) ของชิ้นทดสอบเทียบกับค่ามาตรฐาน สำหรับวัสดุ UHMWPE ซึ่งมีค่า $\Delta H = 291$ J/g สารตัวอย่าง โดยน้ำหนักชิ้นทดสอบ 5.0 - 10.0

mg. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ 10 °C/min. จากช่วง 20-210 °C และอัตราการไหลไนโตรเจน 20 ml/min. หลังจากนั้นทำการคำนวณหาร้อยละของปริมาณความเป็นผลึกตามสมการที่ 2.1 [7]

$$\Delta X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_o}{\Delta H_o} \times 100\% \quad (2.1)$$

การวิเคราะห์สมบัติทางกล โดยการตรวจสอบค่าความแข็งวัสดุพอลิเมอร์ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง Durometer ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G type D ตามมาตรฐาน (ASTM D 785 for Rockwell, D 2240 for Durometer or Shore, and D2583 for Barcol) [8-9]

การตรวจสอบค่าต้านทานแรงดึงของวัสดุพอลิเมอร์ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง Tensile testing ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR10K Plus Series โดยใช้อัตราเร็วในการดึง 50 มม./นาที และ gauge length 50 มม. แล้วดึงชิ้นทดสอบจนขาด โดยการเตรียมชิ้นทดสอบรูปร่างคล้ายกับดัมเบล (Dumbbell) ให้มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 638-03 [9] เพื่อต้องการหาค่าความเค้น-ความเครียด ค่ายังมอดูลัสและค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดของวัสดุ [10]

การวิเคราะห์ตรวจสอบค่าความต้านทานการสึกหรอ โดยดำเนินการทดสอบด้วยวิธี Block on Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 โดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ 10×10×10 mm. 3 วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 62 mm. ความหยาบพื้นผิววงแหวน 0.2 μm ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการโพรไบโอเทคโนโลยี อุตสาหกรรมการผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม นครราชสีมา โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้ง กำหนดความเร็วของการเสียดทาน 0.3 m/sec แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N และทำการทดสอบด้วยระยะเวลา 555 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg และนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอ

(Wear rate) ในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อหน้าหนักที่เกิดชิ้นทดสอบและระยะทางทำการทดสอบดังสมการต่อไปนี้ [11-12]

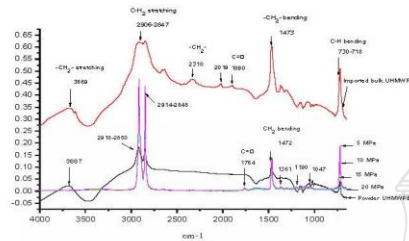
$$\text{Wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nm} \quad (2.2)$$

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

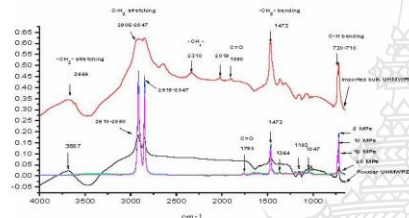
3.1 เอกลักษณ์ทางเคมี

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของชิ้นทดลองที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน ประกอบด้วยอุณหภูมิค่าความดันระดับต่าง ๆ พบว่าส่วนใหญ่มีผลการดูดกลืนพลังงานที่ 2914–2848 cm⁻¹ เป็นสัญญาณการสั่นของ C–H stretching, ที่ 1764 cm⁻¹ เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของชิ้นทดสอบ จึงทำให้ค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง, ที่ 1464 cm⁻¹ เป็นสัญญาณการสั่นของ –CH₂– bending, ที่ 730–718 cm⁻¹ เป็นสัญญาณการสั่นของ C–H bending และที่เกิดการดูดพลังงานขึ้นเพิ่มเล็กน้อยที่ 1361, 1190, 1047 cm⁻¹ ดังแสดงในรูปที่ 3

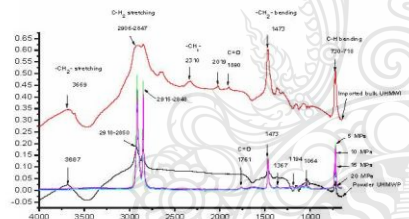
ส่วนชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและผง UHMWPEบริสุทธิ์ พบว่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3669 cm⁻¹ เป็นสัญญาณการสั่นของ –CH₂– stretching, ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-linking ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ และพบการดูดกลืนพลังงานที่ 2310-2019 cm⁻¹ เป็นสัญญาณการสั่นของ –CH₂– bending ที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีผลต่อความเสื่อมสภาพของวัสดุ UHMWPE ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 อุดหนุมีที่ 170 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 อุดหนุมีที่ 190 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 อุดหนุมีที่ 210 องศาเซลเซียส

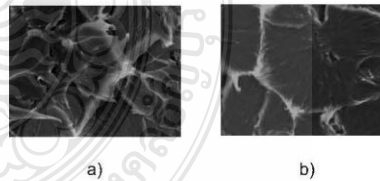
3.2 สมบัติทางกายภาพ

จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุ UHMWPE ด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุนหนุมีหลอมเหลวของวัสดุ UHMWPE บริสุทธิ์ ไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงซึ่งมีอุนหนุมีหลอมเหลวอยู่ในช่วงอุนหนุมีที่ 136.70-141.06 °C โดยมีชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนมีปริมาณความเป็ผลึกสูงสุดเท่ากับ 40.08 % ซึ่งมีผลต่อค่าความแข็งแรงวัสดุก่อน UHMWPE สำหรับชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีปริมาณความเป็ผลึกเท่ากับ 53.31% [13]

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

ชั้นทดสอบ สภาวะการขึ้นรูป	ปริมาณ ความเป็ ผลึก (%)	ความเค้น คราส σ_c (MPa)	ความเค้น คราสแรงดึง สูงสุด σ_u (MPa)	ความยืด ตัว ϵ (%)	ความ แข็ง Shore D
Imported bulk UHMWPE	53.31	20.87	22.93	389.67	63.47
173-5-30	39.62	22.70	23.69	327.62	63.67
173-10-30	36.85	21.30	23.93	323.95	62.10
173-15-30	36.91	22.83	24.93	337.76	61.87
173-20-30	36.91	21.69	23.77	317.62	61.83
193-5-30	36.90	20.83	23.93	327.33	61.77
193-10-30	37.71	22.83	23.85	319.72	62.23
193-15-30	36.43	18.07	20.67	322.79	61.93
193-20-30	37.99	17.93	20.27	331.68	61.67
213-5-30	37.75	21.00	22.37	336.33	62.23
213-10-30	37.68	21.17	24.29	329.00	61.90
213-15-30	36.45	20.33	23.53	348.81	61.67
213-20-30	40.98	17.87	20.47	339.18	61.93

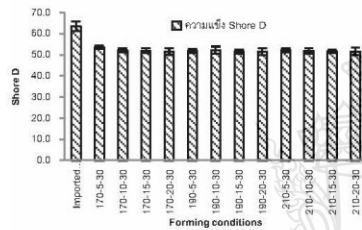
การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบพบว่าส่วนใหญ่มีลักษณะการเกาะยึดของโครงสร้างเป็นแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (lamellar or flake pattern) ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 ที่เกิดจากการเชื่อมต้อประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ที่ถูกกดอัดให้เกิดการเชื่อมติดกันด้วยอุนหนุมี แรงดัน และเวลาของอุนหนุมีและแรงดันที่ระดับต่างๆ และทำให้เป็นตัวทึบหนึ่ในการอัดขึ้นรูปใหม่พิมพ์ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเชื่อมต้อประสานของผงอนุภาค UHMWPE เปรียบเทียบกับสมบัติของ UHMWPE ที่ไม่มีจุดไหลตัวและหลอมละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พบว่า มีลักษณะคล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดสากู [14-15]



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุ UHMWPE a) ชั้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนอุนหนุมี 210 °C แรงดัน 15 MPa. b) ชั้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

3.2 สมบัติทางกล

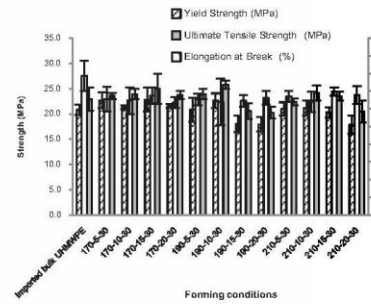
ผลการตรวจสอบค่าความแข็ง พบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีค่าความแข็งค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 52-54 Shore D เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์และไม่พบสัญญาณการสั่นของ $-CH_2-$ stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์ สำหรับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศพบว่ามีค่าความแข็งเท่ากับ 63 Shore D เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนมีค่าความแข็งวัสดุพอลิเมอร์ต่ำกว่า ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทดสอบเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุพอลิเมอร์ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

การศึกษาวิเคราะห์ความต้านทานแรงดึงของชิ้นทดสอบพบว่า ชิ้นทดสอบวัสดุพอลิเมอร์ UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนส่วนใหญ่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดและความเค้นครากสูงกว่าชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ แต่ค่าความยืดตัวและค่าความแข็งมีค่าต่ำกว่า ดังตารางผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 1 และกราฟวิเคราะห์ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลที่แสดงการเปรียบเทียบชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศที่แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะของการอัดขึ้นรูปร้อนที่ต่างกันมีผลทำให้ได้ชิ้นทดสอบที่มีสมบัติทางกลต่างกัน โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 170 °C ความดัน 15 MPa มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุดและค่าความยืดสูงสุดเท่ากับ 22.83 ± 2.37 MPa, 24.93 ± 2.97 MPa และ 337.78 ± 22.89 %

ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นทดสอบวัสดุพอลิเมอร์ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีค่าเท่ากับ 20.87 ± 1.01 MPa, 22.93 ± 2.27 MPa และ 396.67 ± 37.43 % ตามลำดับ



รูปที่ 8 สมบัติทางกลของการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุพอลิเมอร์ UHMWPE ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้สภาวะต่างๆเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

4.สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองอัดขึ้นรูปร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ที่เส้นมวลโมเลกุลสูง เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์ UHMWPE พบว่าสภาวะอุณหภูมิที่ 170 °C แรงดัน 15 MPa. และเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุดและค่าความยืดสูงสุดเท่ากับ 22.83 ± 2.37 MPa, 24.93 ± 2.97 MPa และ 337.78 ± 22.89 % สำหรับค่าความแข็งเท่ากับ 52 Shore D ปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 35.01% จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบเอกซเรย์ทางเคมีพบ พิกัดสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลง

2. สำหรับวัสดุพอลิเมอร์ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศพบว่า ค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุดและค่าความยืดสูงสุดเท่ากับ 20.87 ± 1.01 MPa, 22.93 ± 2.27 MPa และ 396.67 ± 37.43 % ตามลำดับ ค่าความแข็งก่อนวัสดุเท่ากับ 63 Shore D ปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31%

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอกราบขอบพระคุณผศ.สุรัตน์ วรรณศรี ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Steven M. Kurtz. **UHMWPE Biomaterials Handbook**. China: Elsevier Inc.; 2009.
- [2] Shibo Wang, Shirong Ge. The mechanical property and tribological behavior of UHMWPE : Effect of molding Pressure Wear 263 (2007) 949-956.
- [3] J.J. Wu, C.P. Buckley, J.J. O'Connor. Mechanical integrity of compression-moulded ultra-high molecular weight polyethylene: effects of varying process conditions. Biomaterials 23 (2002) 3773-3783
- [4] F.S.Senatov, A.A.Baranov, D.S.Muratov, M.V. Kaloshkin, V.V.Tcherdyntsev. Microstructure and properties of composite materials based on UHMWPE after mechanical activation.
- [5] P.S. Rama Sreekanth, S. Kanagaraj. Assessment of bulk and surface properties of medical grade UHMWPE based nanocomposites using Nanoindentation and microtensile testing. (2013) 140-151
- [6] Min Zhi Rong, Ming Qiu Zhang, Guang Shi, Qiu Long Ji, Bernd Wetzel, Klaus Friedrich. Graft polymerization inorganic nanoparticles and its effect on tribological Performance improvement of the polymer composites. Tribology International 36 (2003) 679-707.
- [7] Sangeeta Hambir, J P Jog, Sintering of ultra high molecular weight polyethylene; 1999.
- [8] M. Peltzer, J.R. Wagner, A. Jimenez, Processing and mechanical characterization of UHMWPE stabilized with natural antioxidants; 2005.
- [9] American Society for Testing and Materials international ASTM D2240-05; P1-13
- [10] An American National Standard "Standard test Method for Tensile Properties of Plastics", ASTM International, D 638
- [11] G.Sui, W.H.Zhong, X.Ren, X.O.Wang, X.P.Yang. Sturcture,mechanical properties and friction behavior of UHMWPE/HDPE/Carbonnanofibers. Materials Chemistry and Physics 115 (2009) 404-412.
- [12] 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.
- [13] W.Gregory Sawyer, Kevin D. Freudenberg, Praveen Bhimaraj, Linda S.Schadler.A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. Wear 254 (2003) 573-580
- [14] Gul R. Improved UHMWPE for use in total joint replacement. Ph.D. Dissertation.: Massachusetts Institute of Technology; Boston,USA ;1997.
- [15] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra PJ. Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history. Polymer ;1990.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวิโรจน์ ฉัตรเกษ
วัน เดือน ปีเกิด	1 มิถุนายน 2528
ที่อยู่	43 หมู่ 3 ตำบลกุดเรือคำ อำเภอดอนจาน จังหวัดสกลนคร 47120
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	2553-2554 วิศวกรจัดซื้อ (Procurement Engineer) บริษัท คาวาซากิมอเตอร์เอ็นเตอร์ไพรส์ (ประเทศไทย) จำกัด
เบอร์โทรศัพท์	08-6231-2364
อีเมล	Chudget_ie@hotmail.com

