



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบเพื่อความต้านทานการสึกหรอภายใต้  
การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่นสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน  
ทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม

Molecular weight polyethylene composites for high wear resistance  
under temperature changes and lubricant to apply for use in  
industrial machinery parts

คณะผู้วิจัย

ประกอบชาติภักต์

หัวหน้าโครงการ

นายอนันต์ เต็มเปี่ยม

นักวิจัย

นายสุรัตน์ วรรณศรี

นักวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2559

สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

## กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม จากสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปีงบประมาณ 2559 และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องและหน่วยงานต่างๆ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้การดำเนินการศึกษาวิจัยสามารถดำเนินการได้แล้วเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งประกอบด้วย S.H.& SONS ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์แท่ง UHMWPE กิ่งสำเร็จรูปที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ Physics of surface hardening และห้องปฏิบัติการ Polymer composite materials ของ Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISPMS SB RAS) เมือง Tomsk ประเทศสหพันธรัฐรัสเซีย ที่ให้ความได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวัดวิเคราะห์ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอและรายละเอียดลักษณะของพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นทดสอบ

ประกอบ ขาติภักดิ์  
อนันต์ เต็มเปี่ยม  
สุรัตน์ วรรณศรี



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุก่อนกึ่งสำเร็จรูป UHMWPE ด้วย Ram extruder ที่ให้ค่าความเค้นครากสูงสุด และอัตราการสึกหรอต่ำสุด สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านทางการแพทย์และทางด้านวิศวกรรมเครื่องจักรกลต่างๆ การดำเนินการศึกษาวิจัยกำหนดสภาวะของการทดลองขึ้นรูปผง UHMWPE บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 140 150 และ 160 °C ความดัน 3 5 8 และ 10 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที หลังจากที่ได้ข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผง UHMWPE บริสุทธิ์ จึงดำเนินการขึ้นรูป UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณการผสมฟิลเลอร์แต่ละชนิดที่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE composite

ผลการศึกษาวิจัย พบว่า สภาวะการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากขึ้นทดสอบมีสมบัติทางกลสูงสุดโดยมีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าความยืดเท่ากับ  $20.43 \pm 1.21$  MPa,  $28.33 \pm 1.53$  MPa และ  $285.60 \pm 6.41$  % ตามลำดับ และมีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm โดยมีสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 23.3 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) และ 4.75 เท่า ตามลำดับ จากการเกิด cross-linking ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52% ในขณะที่วัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ จากการวิเคราะห์ IR-spectrum พบ พิกัดสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ และปริมาณความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับ 53.31 % ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลง สำหรับในส่วนของการขึ้นทดสอบ UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ชนิดต่างๆ พบว่า ปริมาณการผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟิลเลอร์ชนิดต่างๆ มีดังนี้

1. ปริมาณการผสม 0.3 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าความยืดเท่ากับ  $23.17 \pm 3.35$  MPa,  $34.78 \pm 2.80$  MPa และ  $229.00 \pm 6.09$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 18.55 % (วิเคราะห์จากความเค้นแรงดึงสูงสุด) สำหรับในส่วนของการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.09 \times 10^{-9} \pm 3.39 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.44 เท่า

2. ปริมาณการผสม 0.4 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าความยืดเท่ากับ  $21.93 \pm 0.51$  MPa,  $25.40 \pm 0.69$  MPa และ  $267.67 \pm 22.03$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลต่ำกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 11.54 % (วิเคราะห์จากค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด) สำหรับในส่วนของการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.32 \times 10^{-9} \pm 4.78 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.30 เท่า

3. ปริมาณการผสม 0.4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าความยืดเท่ากับ  $23.93 \pm 1.89$  MPa,  $26.77 \pm 1.20$  MPa และ  $296.54 \pm 7.51$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลต่ำกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 5.83 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) สำหรับในส่วนของอัตราการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.14 \times 10^{-9} \pm 3.16 \times 10^{-10}$   $\text{mm}^3/\text{Nm}$  หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.41 เท่า

4. ปริมาณการผสม 4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 5  $\mu\text{m}$  มีค่าความเค้นคราก ความเค้นแรงดึงสูงสุด และค่าความยืดเท่ากับ  $22.57 \pm 2.01$  MPa,  $26.31 \pm 3.11$  MPa และ  $136.66 \pm 11.67$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลต่ำกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 7.68 % (วิเคราะห์จากค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด) สำหรับในส่วนของอัตราการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.37 \times 10^{-9} \pm 5.71 \times 10^{-10}$   $\text{mm}^3/\text{Nm}$  หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก่อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.27 เท่า





## Abstract

The objective of this research is a study to determine optimum forming condition of semi-finished bulk UHMWPE by using ram extruder that obtain maximum yield strength and minimum wear rate for apply to use in area of medical and mechanical application. Experimental extrusion specified forming condition consists of the temperature of 140, 150 and 160 °C and pressure of 3, 5, 8 and 10 MPa with the temperature exposure time of 30 minutes. After known optimum forming condition of UHMWPE powder, thus forming UHMWPE filled with different kind of filler to study and determine optimum weight fraction of various types of filler that affect onto wear resistance property of UHMWPE composites.

Result, extruded condition at the temperature of 150 °C under pressure of 5 MPa with exposure time of 30 minutes is an optimum extruded condition due to specimen shown a maximum yield strength, ultimate tensile strength and elongation of  $20.43 \pm 1.21$  MPa,  $28.33 \pm 1.53$  MPa and  $285.60 \pm 6.41$  % respectively and obtain minimum wear rate of  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm. Its mechanical properties and wear resistance property higher than imported bulk UHMWPE by 23.3 % and 4.75 times respectively due to the formation of cross-linking are occurred in polymer chain and also its degree of crystallinity is high equal to 61.52%. For bulk UHMWPE, IR-spectrum shown a variation peak of carbonyl group (C=O) are occurred that that it indicated the oxidation reaction at the end of polymer chain and its degree of crystallinity is equal to 53.31% which result to decrease strength of polymer. In the case of UHMWPE filled with filler, optimum weight fractions of various types of filler are as follows.

1. The filling of 0.3 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm shown yield strength, ultimate tensile strength and elongation of  $23.17 \pm 3.35$  MPa,  $34.78 \pm 2.80$  MPa and  $229.00 \pm 6.09\%$  respectively that its mechanical properties was increased by 18.55% (increasing of ultimate tensile strength). For the wear rate, is equal to  $2.09 \times 10^{-9} \pm 3.39 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm or its wear resistance was increased by 1.44 times in compared with initial bulk UHMWPE.

2. The filling of 0.4 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm shown yield strength, ultimate tensile strength and elongation of  $21.93 \pm 0.51$  MPa,  $25.40 \pm 0.69$  MPa and  $267.67 \pm 22.03\%$  respectively that its mechanical properties was increased by 11.54% (increasing of ultimate tensile strength). For the wear rate, is equal to  $2.32 \times 10^{-9} \pm 4.78 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm or its wear resistance was increased by 1.30 times in compared with initial bulk UHMWPE.

3. The filling of 0.4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  shown yield strength, ultimate tensile strength and elongation of  $23.93 \pm 1.89$  MPa,  $26.77 \pm 1.20$  MPa and  $296.54 \pm 7.51\%$  respectively that its mechanical properties was increased by 5.83% (increasing of ultimate tensile strength). For the wear rate, is equal to  $2.14 \times 10^{-9} \pm 3.16 \times 10^{-10}$   $\text{mm}^3/\text{Nm}$  or its wear resistance was increased by 1.41 times in compared with initial bulk UHMWPE

4. The filling of 4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 5  $\mu\text{m}$  shown yield strength, ultimate tensile strength and elongation of  $22.57 \pm 2.01$  MPa,  $26.31 \pm 3.11$  MPa and  $136.66 \pm 11.67\%$  respectively that its mechanical properties was increased by 7.68% (increasing of ultimate tensile strength). For the wear rate, is equal to  $2.37 \times 10^{-9} \pm 5.71 \times 10^{-10}$   $\text{mm}^3/\text{Nm}$  or its wear resistance was increased by 1.27 times in compared with initial bulk UHMWPE



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	๗
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญของงาน	1
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	5
2.1 ทฤษฎีของพอลิเมอร์และ UHMWPE พอลิเมอร์	5
2.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์	9
2.3 กระบวนการขึ้นรูป UHMWPE	11
2.4 การสีกรของวัสดุพอลิเมอร์	13
2.5 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านโทรโบลยี	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 การดำเนินการศึกษาวิจัย	32
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย	32
3.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	34
3.3 การเตรียมวัสดุผง UHMWPE และ UHMWPE ผสมอนุภาค Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ขนาดต่างๆ สำหรับการขึ้นรูป	34
3.4 การอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสมอนุภาค Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ขนาดต่างๆ	36
3.5 การศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี	38
3.6 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ	38
3.7 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล	41
3.8 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านโทรโบลยี	45
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานศึกษาวิจัย	52
4.1 ผลการทดลองอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ	52
4.2 วัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 $\mu\text{m}$	69
4.3 วัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 $\mu\text{m}$	80
4.4 วัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 1 $\mu\text{m}$	92

4.5 วัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 5 μm	105
บทที่ 5	119
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	119
5.2 ข้อเสนอแนะ	121
เอกสารอ้างอิง	123



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สารเพิ่มความทนแรงกระแทกที่สำคัญทางการค้า	10
ตารางที่ 2.2 สรุปสมบัติทางด้านโพรปีเอตีของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ	29
ตารางที่ 3.1 ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ	41
ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมูฟิงก์ชั้นต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของ ชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ	56
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบ ที่นำเข้าจากต่างประเทศ	57
ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางด้านโพรปีเอตีของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่าน การทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบที่ นำเข้าจากต่างประเทศ	67



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 a) แผนผังโครงสร้างของวัสดุ Homopolymer และ Copolymer, b) แผนผังโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบเส้นและแบบกิ่งก้านสาขา	6
รูปที่ 2.2 แผนผังโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโมโนเมอร์และพอลิเอทิลีน	7
รูปที่ 2.3 คุณสมบัติทางสัญญาณวิทยาของ UHMWPE	8
รูปที่ 2.4 TEM ไมโครกราฟของ UHMWPE แสดงอาณาบริเวณที่เป็นอสัณฐานและผลึก (ผลึกแผ่น)	8
รูปที่ 2.5 DSC กราฟสำหรับ UHMWPE	10
รูปที่ 2.6 พฤติกรรม True-stress strain ในแนวแกนภายใต้แรงดึงของวัสดุ UHMWPE ที่มีมวลโมเลกุลต่างกันเปรียบเทียบกับ HDPE	11
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างข้อมูลผลการทดสอบ Small punch test data ที่ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราเร็วของการทดสอบ 0.5 mm/min	12
รูปที่ 2.8 ขั้นตอนต่างๆ ของการขึ้นรูปชิ้นงาน UHMWPE	14
รูปที่ 2.9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรด GUR 1020 ความหนา 100 $\mu\text{m}$ จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง	16
รูปที่ 2.10 เครื่องอัดขึ้นรูปแผ่น UHMWPE ด้วยกรรมวิธี Hot compression molding	17
รูปที่ 2.11 แผนผังของเครื่องอัดรีด	18
รูปที่ 2.12 แสดงขั้นตอนการขึ้นรูปก้อนวัสดุ UHMWPE ด้วยกรรมวิธี Hot isostatic pressing	19
รูปที่ 2.13 รูปแบบของการสึกหรอของวัสดุ	20
รูปที่ 2.14 แสดงอัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบลำตัว หลังจากผ่านการลื่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ	23
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบลำตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น	24
รูปที่ 2.16 โครงสร้างผลึกของ PTFE และโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE	25
รูปที่ 2.17 การสึกหรอและกลไกการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายโอนบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE	26
รูปที่ 2.18 กลไกการถ่ายโอนพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่	27
รูปที่ 2.19 เครื่องทดสอบการสึกหรอ Ball on disk tribometer	28
รูปที่ 2.20 ลักษณะรูปร่างของการสัมผัสของการทดสอบไทรโบมิเตอร์	29
รูปที่ 2.21 การทดสอบการสึกหรอของวัสดุด้วยวิธีการแบบ Block on Ring	29
รูปที่ 3.1 ผง UHMWPE ที่ใช้ในการทดลอง	35
รูปที่ 3.2 แสดงภาพขยายของ MWCNT, $\text{Al}_2\text{O}_3$ nanofibers และ $\text{Al}_2\text{O}_3$ อนุภาคขนาดต่างๆ	35
รูปที่ 3.3 ตู้อบความร้อนและการอบผง UHMWPE และ UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ที่ใช้ในการทดลอง	36

รูปที่ 3.4 เครื่อง Ultrasonic disperser และการทำให้เกิดการกระจายตัวของฟิลเลอร์	37
รูปที่ 3.5 เครื่อง High speed homogenizer และการบั่นผสม UHMWPE กับฟิลเลอร์	37
รูปที่ 3.6 เครื่อง Ram Extruder และการอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE	38
รูปที่ 3.7 กระบอกอัด (Barrel)	39
รูปที่ 3.8 หัวตาย (Profile die head)	39
รูปที่ 3.9 แสดงการป้อนเติมผง UHMWPE	39
รูปที่ 3.10 แสดงการอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบและขนาดของขึ้นทดสอบที่ได้จากการอัดรีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Ram Extruder	40
รูปที่ 3.11 DSC กราฟของวัสดุ UHMWPE- GUR 1050 powder (first heat)	42
รูปที่ 3.12 แสดงหลักการของวิธีการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell	43
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore A และ Shore D	44
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D	44
รูปที่ 3.15 เครื่องทดสอบแรงดึง การจับยึดขึ้นทดสอบและการดึงขึ้นทดสอบ	45
รูปที่ 3.16 ขึ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง	46
รูปที่ 3.17 ค่าพิคัดของส่วนต่างๆ ของขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638	46
รูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง	47
รูปที่ 3.19 a) แผนภาพหลักการของการทดสอบ b) เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Ballon-disk tribometer)	47
รูปที่ 3.20 หลักการของการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77	48
รูปที่ 3.21 ขึ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ	48
รูปที่ 3.22 a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดขึ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ	49
รูปที่ 3.23 เครื่องชั่งน้ำหนัก AND รุ่น HR-200 ความละเอียด 0.1 mg สำหรับชั่งตวงน้ำหนักที่สูญเสียของขึ้นทดสอบ	49
รูปที่ 3.24 a) ลักษณะของเครื่อง Optical profilometer b) ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของพื้นผิวการสึกหรอของขึ้นทดสอบ และ c) รายละเอียดลักษณะของพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัส	50
รูปที่ 4.1 IR spectrum: a) ผง UHMWPE บริสุทธิ์ b) วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศ	52
รูปที่ 4.2 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ Imported bulk UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศและวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 140 °C ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที	53
รูปที่ 4.3 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ Imported bulk UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศและวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูป	

ด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 150 °C ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที	54
รูปที่ 4.4 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบ Imported bulk UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 160 °C ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที	54
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ	58
รูปที่ 4.6 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ	59
รูปที่ 4.7 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ	60
รูปที่ 4.8 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ	64
รูปที่ 4.9 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ	66
รูปที่ 4.10 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม MWCNT	68
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม MWCNT	71
รูปที่ 4.12 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม MWCNT	72
รูปที่ 4.13 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม MWCNT	73
รูปที่ 4.14 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม MWCNT	76
รูปที่ 4.15 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม MWCNT	78
รูปที่ 4.16 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanofibers	79
รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanofibers	82
รูปที่ 4.18 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanofibers	83



รูปที่ 4.19 ความแข็งของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanofibers	84
รูปที่ 4.20 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanofibers	87
รูปที่ 4.21 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanofibers	89
รูปที่ 4.22 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 μm	90
รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 μm	93
รูปที่ 4.24 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 μm	94
รูปที่ 4.25 ความแข็งของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 μm	95
รูปที่ 4.26 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 μm	98
รูปที่ 4.27 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 μm	99
รูปที่ 4.28 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 μm	101
รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 μm	105
รูปที่ 4.30 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 μm	106
รูปที่ 4.31 ความแข็งของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 μm	106
รูปที่ 4.32 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 μm	110
รูปที่ 4.33 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ผสม Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 μm	111

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

คำย่อและสัญลักษณ์	ความหมาย
UHMWPPW	Ultra high molecular weight polyethylene
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethylene monomer
T <sub>g</sub>	อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature)
T <sub>m</sub>	อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point temperature)
T <sub>f</sub>	อุณหภูมิไหลตัว (Flow temperature)
DSC	Differential Scanning Colorimeter
$\chi$	ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity)
M <sub>v</sub>	มวลโมเลกุล (Molecular Weight)
HDPE	High density polyethylene
DCM	Direct compression molding
PTFE	Polytetrafluoroethylene
MWCNT	Multiple wall carbon nano tubes
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminium oxides
FT-IR spectroscopy	Fourier transform infrared spectroscopy
SEM	Scanning electron microscope
-CH <sub>2</sub> -	Methylene group
C=C	Vinyl group
C=O	Carbonyl group
-R <sup>1</sup> CH=CHR <sup>2</sup> -	Trans-vinylene group
$\sigma_y$	ความเค้นคราก (Yield strength)
$\sigma_u$	ความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength)
$\sigma_b$	ความเค้น ณ จุดแตกหัก (Breaking strength)
% $\epsilon$	ความยืด ณ จุดแตกหัก (Elongation at break)
$\mu$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction)
K	อัตราการสึกหรอ (Wear rate, mm <sup>3</sup> /Nm)
Ra	ความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอ (Worn surface Roughness , $\mu$ m)

## บทที่ 1

### ที่มาและความสำคัญของงาน

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (UHMWPE) เป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทก เมื่ออยู่ต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่างๆ จึงมีการนำ UHMWPE มาประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ UHMWPE ที่มีจำหน่ายในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแท่งหรือแผ่น consolidate UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและไม่มีการผลิตภายในประเทศ การนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้น UHMWPE สามารถนำไปได้กับเครื่องจักรกลต่างๆ ในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ที่ต้องการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์เหล่านี้โดยตรงเนื่องจาก UHMWPE ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีใดๆ และที่สำคัญที่สุดคือ มีความลื่นตัวสูงสามารถหล่อลื่นได้ในตัว ทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องจักรเหล่านั้นไม่จำเป็นต้องใช้สารหล่อลื่นในการหล่อลื่น สำหรับในส่วนของงานศึกษาวิจัยพัฒนาและปรับปรุงสมบัติต่างๆ ได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาปรับปรุงสมบัติของ UHMWPE ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานลักษณะต่างๆ ในรูปของ polymeric composite materials โดยการผสมหรือเจือวัสดุเสริมแรงชนิดต่างๆ เข้าไปทั้งในระดับอนุภาคไมโคร หรือนาโน, การปรับปรุงสมบัติด้วยการผสมสารเคมีบางอย่าง เช่น grafting ต่างๆ เพื่อให้เกิดการ crosslink, การปรับปรุงผิวของวัสดุเสริมแรงต่างๆ เพื่อให้สามารถเกาะยึดกับ UHMWPE ได้ดียิ่งขึ้น และการฉายรังสีเป็นต้น โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะเน้นทางด้านปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านไทรโบโลยีเป็นหลักเพื่อให้ได้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ซึ่งสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลในเรื่องของการประหยัดพลังงานของเครื่องจักรกลต่างๆ



รูปที่ 1 ชิ้นส่วนเฟืองที่ผลิตจาก UHMWPE

จากรูปที่ 1 เป็นภาพถ่ายตัวอย่างชิ้นส่วนเฟืองที่ผลิตจาก UHMWPE ของบริษัท S.H. & SONS จำกัด ที่ผลิตมาจากแท่ง UHMWPE บริสุทธิ์ ไม่มีส่วนผสมของสารเติมแต่งใดๆ แต่การใช้งานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลมากมายเหล่านี้ ต้องทำงานภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันและสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ ความสึกหรอที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นหากชิ้นส่วนต่างๆ อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น และการใช้งานที่อยู่ภายใต้ภาวะความเค้นและความเครียดที่สูง เครื่องจักรต้องได้รับการตรวจสอบบำรุงอยู่เป็นประจำและชิ้นส่วนจะถูกเปลี่ยนบ่อยขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติของ UHMWPE ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในลักษณะต่างๆ วัสดุ UHMWPE แบบใหม่ที่จะได้รับจากการวิจัยนี้จะเป็นพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบ (UHMWPE composite) ที่มีสมบัติเด่นทางด้านทนทานต่อความสึกหรอ มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และคงทนต่อแรงกระแทก

การปรับปรุงสมบัติทางกลและทางด้านโทรโพลีที่ผ่านมานั้นเป็นการปรับปรุงสมบัติ UHMWPE ภายใต้สภาวะปราศจากสารหล่อลื่นและไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกระบวนการวิจัย ทำให้ได้ UHMWPE composite ที่ไม่ครอบคลุมการใช้งานได้ทุกรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้การใช้งานที่มีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสึกหรอ เช่น เฟือง เป็นต้น

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ แล้ว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะดำเนินการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุชนิดนี้ เนื่องจากมองเห็นหนทางที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์พอลิเอทิลีนของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีของไทยที่ปัจจุบันดำเนินการผลิตเฉพาะ HDPE, LDPE และ LLDPE ให้ปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มในการทำการผลิต UHMWPE เพิ่มขึ้นอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุในกลุ่มพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่งที่มีส่วนผสมและโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเช่นเดียวกับ HDPE, LDPE และ LLDPE แต่มีมวลโมเลกุลสูงกว่าที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน

หากผลการดำเนินโครงการนี้บรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของโครงการ จะมีส่วนช่วยให้เกิดการพัฒนาด้านต่างๆ ตามมา ทั้งในส่วนที่เกี่ยวกับการพัฒนาทางวิชาการหรือการศึกษาที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยและปรับปรุงสมบัติของ UHMWPE เพื่อหาสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนให้มีคุณภาพมากขึ้น ตอบสนองความต้องการภาคอุตสาหกรรม

## 1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

1. เพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงกับ  $Al_2O_3$  nanofibers และระหว่างพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงกับ  $Al_2O_3$  nanoparticle ( $\alpha$  phase) สำหรับใช้สร้างชิ้นส่วนเฟืองอุตสาหกรรมและรองสิ้น

2. เพื่อศึกษาไทรโบโลยีของ UHMWPE ภายใต้เงื่อนไขสถานะที่มีส่วนผสมของสารเติมแต่ง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่นชนิดต่างๆ
3. เพื่อสร้างชิ้นส่วนเพื่อองศาหกรรมและร่องลื่นที่ผลิตจากวัสดุพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงเชิงประกอบ (UHMWPE composite)

## 1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของ UHMWPE คือ  $Al_2O_3$  nanofibers และ  $Al_2O_3$  Alpha phase ในระดับอนุภาคไมโคร และนาโน
2. ศึกษาไทรโบโลยีของ UHMWPE ที่มีส่วนผสมของสารเติมแต่งภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (25-100°C) และสารหล่อลื่น (เบอร์ SAE 40 SAE 20W50, น้ำมันเครื่องสังเคราะห์เกรด SJ - SM / CH4 - CI4, น้ำมันเกียร์ API GL-1, SAE 90, 140, จาระบี)

## 1.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติต่างๆ ของ UHMWPE กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงาน ขึ้นทดสอบ มาตรฐานต่างๆ ในการทดสอบสมบัติต่างๆ (อ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐานต่างๆ ที่ระบุใน UHMWPE biomaterial handbook [1])
2. จัดซื้อจัดหาวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ และก้อนวัสดุสำเร็จรูป UHMWPE จากต่างประเทศ
3. ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของชิ้นทดสอบ จากข้อ 2
4. ดำเนินการขึ้นรูปชิ้นทดสอบก้อนวัสดุสำเร็จรูป UHMWPE +  $Al_2O_3$  nanofibers ที่อัตราการผสมต่างๆ เพื่อหาสถานะต่างๆ ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านไทรโบโลยี
5. ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของชิ้นทดสอบ จากข้อ 4
6. ดำเนินการขึ้นรูปชิ้นทดสอบก้อนวัสดุสำเร็จรูป UHMWPE +  $Al_2O_3$  nano-particle (Alpha phase) ที่มีขนาด particle ต่างกันที่อัตราการผสมต่างๆ ที่มีขนาด particle ต่างกัน ที่อัตราการผสมต่างๆ เพื่อหาสถานะต่างๆ ในการขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านไทรโบโลยี
7. ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของชิ้นทดสอบ จากข้อ 5
8. เปรียบเทียบสมบัติทางกล และสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของก้อนวัสดุสำเร็จรูป UHMWPE บริสุทธิ์ กับก้อนวัสดุสำเร็จรูป UHMWPE +  $Al_2O_3$  nanofibers และ UHMWPE +  $Al_2O_3$  nano-particle (Alpha phase) ที่ดำเนินการศึกษาวิจัย

9. สร้างเฟืองและรองลื่นโดยใช้ไมลและเครื่องมือของหน่วยงานสนับสนุน บริษัท S.H.& SONS จำกัด  
และทดสอบการใช้งานจริง

10. สรุปผลการดำเนินการทดลองศึกษาวิจัย

11. ถ่ายทอดองค์ความรู้และเทคโนโลยี



## บทที่ 2

### ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีของพอลิเมอร์และ UHMWPE พอลิเมอร์

UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทก เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่างๆ

การประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ อาทิเช่น เฟือง เกียร์ แบริ่ง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ ในอุตสาหกรรมการผลิตอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลการเกษตร และอุตสาหกรรมอาหาร โดยมีการนำไปใช้เป็นวัสดุปูพื้นหรือบุภายในรางลำเลียงถ่านหินหรือพื้นกระบะรถบรรทุก เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ (Total joint replacement) สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ [1]

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยโมเลกุลย่อยของไฮโดรเจนและคาร์บอนหลายๆโมเลกุล (Poly) เชื่อมต่อเข้าด้วยกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งแต่โมเลกุลย่อยหรือที่เรียกว่า “โมโนเมอร์ (Monomer)” ของพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบเหมือนกันเชื่อมต่อเข้าด้วยกันจะเรียกว่า Homopolymer แต่ถ้าแต่ละส่วนหรือแต่ละโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันมีความแตกต่างกันจะเรียกว่า Copolymer ดังลักษณะแผนภาพการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.1a โดยที่สัญลักษณ์ A, B คือโมโนเมอร์ที่แตกต่างกัน



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

โมโนเมอร์ของพอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวกันเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือแบบกิ่งก้านสาขา (Branched) ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.1b ซึ่งแนวโน้มของการเกิดการจัดเรียงตัวแบบกิ่งก้านสาขานี้ขึ้นอยู่กับควบคุมสถานะของขบวนการสังเคราะห์ ดังนั้น สิ่งที่ต้องจำและทำความเข้าใจก็คือรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ ดังลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่แสดงในรูปที่ 2a และ 2b ที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างง่าย ๆ ของโครงสร้างพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Copolymer มีความ

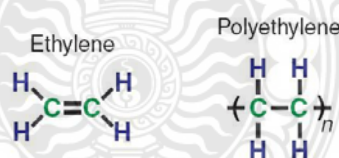


เป็นไปได้ที่จะมีโครงสร้างย่อยหรือโมโนเมอร์ย่อยต่างชนิดกัน ตามชนิดของธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบที่ผสมเข้าไป แต่ในทางปฏิบัติในอุตสาหกรรม พอลิเอทิลีนรวมทั้ง UHMWPE จะเป็น Copolymer ที่เกิดร่วมกับโมโนเมอร์อื่นๆ (ตัวอย่างเช่น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตหรือเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของพอลิเมอร์

สมบัติพื้นฐานที่โดดเด่นและเห็นได้ชัดของพอลิเมอร์ที่แตกต่างจากวัสดุอื่นๆ (เช่น โลหะชนิดต่างๆ และเซรามิก) คือ ขนาดโมเลกุล (Molecular size) ในกรณีที่เป็นโลหะผสมและเซรามิก องค์ประกอบย่อยที่เป็นส่วนประกอบคืออะตอมของธาตุโลหะชนิดต่างๆ (ตัวอย่างเช่น Co, Cr, Mo และอื่นๆ) หรืออาจจะเป็นพันธะโมเลกุลเล็กๆ เช่น คาร์ไบด์ หรือ ออกไซด์ของโลหะ แต่สำหรับขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์อาจประกอบด้วยโมโนเมอร์หลายๆ ชนิดรวมกันมากกว่า 100,000 โมโนเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้มวลโมเลกุล (Molecular weights) ของพอลิเมอร์สามารถปรับขนาดเพิ่มขึ้นเป็นล้านกรัมต่อโมล (106 g/mol) และนอกจากนี้รูปแบบการก่อตัวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ย่อยๆ เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ทำให้พอลิเมอร์มีคุณลักษณะพิเศษจำเพาะที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของพอลิเมอร์

### 2.1.1 พอลิเอทิลีน (Polyethylene)

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ก่อตัวหรือสังเคราะห์จากแก๊สเอทิลีนโมโนเมอร์ (Ethylene monomer (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)) ที่มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 28, สูตรเคมีโดยทั่วไปของพอลิเอทิลีน คือ – (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>– โดยที่ n คือ degree of polymerization ซึ่งแผนภาพแสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนและพอลิเอทิลีน มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังโครงสร้างทางเคมีของเอทิลีนโมโนเมอร์และพอลิเอทิลีน [1]

สำหรับพอลิเอทิลีน สายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยเอทิลีนโมโนเมอร์ ตั้งแต่ 200,000 หน่วยเรียงต่อกันซ้ำๆ หรือในอีกหนึ่งความหมาย สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนมากถึง 400,000 อะตอม ซึ่งพอลิเอทิลีนยังสามารถแบ่งชนิดแยกย่อยออกได้หลายชนิด (LDPE, LLDPE, HDPE, PE1000 และ UHMWPE) ตามขบวนการสังเคราะห์ โดยพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดถูกสังเคราะห์ที่ขึ้นมาจากขนาดของมวลโมเลกุลและรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลที่ต่างกัน สำหรับในส่วนของ LDPE and LLDPE จะหมายถึง low-density polyethylene และ linear low density polyethylene ตามลำดับ ลักษณะการจัดเรียงโมโนเมอร์ภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนเหล่านี้จะ

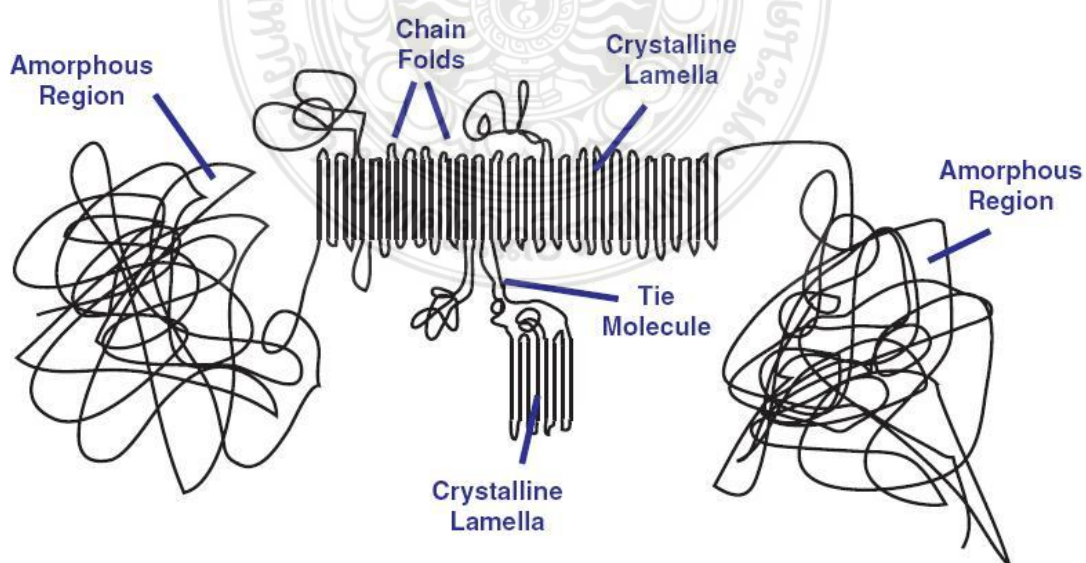


มีลักษณะเป็นแบบกิ่งก้านสาขาและเป็นเส้นตรงตามลำดับ และนอกจากนี้มวลโมเลกุลของพอลิเอทิลีนแต่ละชนิดจะต่ำกว่า 50,000 g/mol

HDPE สายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีมวลโมเลกุลสูงถึง 200,000 g/mol สำหรับในส่วนของ PE1000 และ UHMWPE เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ พบว่า PE1000 และ UHMWPE จะมีมวลโมเลกุลสูงประมาณ  $1 \times 10^6$  g/mol แต่ในความเป็นจริงมวลโมเลกุลที่สูงมากๆ เช่นนี้ไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรงด้วยวิธีการธรรมดาต่างๆ ไป แต่จะทำการวัดเปรียบเทียบอนุมาณแทนด้วยค่า intrinsic viscosity (IV)

### 2.1.2 สภาพความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (Crystallinity of polymer)

วิธีการหนึ่งซึ่งช่วยให้สามารถจินตนาการเห็นสายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE คือสายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นเชือกหรือสายโซ่ที่พันกันยุ่งเหยิงคล้ายสปาเกตตี้ที่มีความยาวมากกว่าหนึ่งกิโลเมตร เนื่องจากสายโซ่จะไม่อยู่นิ่ง มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา และมีการดูดซับพลังงานความร้อนภายในตลอดเวลาส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อถูกทำให้เย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point) สายโซ่โมเลกุลของ UHMWPE มีแนวโน้มที่จะเกิดการสับเปลี่ยนพันธะของ C—C และทำให้เกิดการพับของสายโซ่ (Chain fold) การพับของสายโซ่กลับไปกลับมาเช่นนี้ทำให้โมเลกุลเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (Ordered) เฉพาะบางช่วงบริเวณ, บริเวณที่มีการพับของสายโซ่เป็นแผ่นนี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและเรียกว่า “ผลึกแผ่น (Crystalline lamella)” ที่มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกบางๆ โดยผลึกแผ่นเหล่านี้จะฝังตัวอยู่ในบริเวณที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) และสามารถที่จะเชื่อมต่อกับผลึกแผ่นข้างเคียงได้ด้วยพันธะโมเลกุล (Tie molecule) ซึ่ง UHMWPE มีลักษณะรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลและความเป็นผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.3



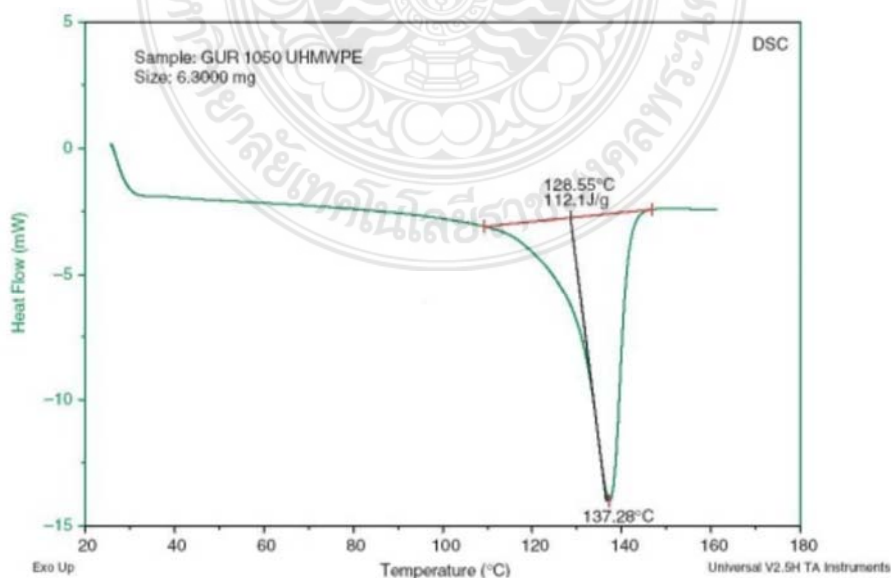
รูปที่ 2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ UHMWPE [1]

### 2.1.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของพอลิเมอร์ (Thermal transition of polymer)

วิธีการหนึ่งที่ใช้จำแนกหรือทำให้เห็นความแตกต่างของลักษณะจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดคือ อุณหภูมิที่แตกต่างกันที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เหล่านั้น ในที่นี้จะขอย้อนกล่าวไปถึงรูปแบบของสายโซ่โมเลกุล UHMWPE ที่มีลักษณะเป็นสไปร์กที่ขดตัวที่ยาวและพันกันยุ่งเหยิง ซึ่งสามารถจินตนาการได้ถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกลับไปกลับมา และเกิดการบิดงอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน หรืออาจกล่าวได้ว่า พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะต้องเผชิญกับผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อน 3 ด้านหลักๆ คือ อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ), อุณหภูมิหลอมละลาย (Melting point temperature;  $T_m$ ) และอุณหภูมิไหลตัว (Flow temperature;  $T_f$ )

อุณหภูมิที่มีสภาพเป็นแก้ว (Glass transition temperature;  $T_g$ ) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มีพฤติกรรมแปรเปลี่ยนที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า  $T_g$  สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนไม่เพียงพอที่จะเลื่อนผ่านสายโซ่อื่นได้และมีวิธีเดียวที่วัสดุจะตอบสนองต่อความเค้นทางกลที่มากกระทำคือการยืดออกหรือแตกออกจากพันธะที่ประกบกันเป็นสายโซ่โมเลกุล ในกรณีของ UHMWPE,  $T_g$  จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $-160^\circ\text{C}$

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิ  $T_g$  สายโซ่โมเลกุลบริเวณพื้นที่ที่เป็นอสัณฐานภายในพอลิเมอร์จะเคลื่อนตัวได้มากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิของ UHMWPE เพิ่มขึ้นสูงกว่า  $60-90^\circ\text{C}$  ผลึกที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่เล็กกว่าผลึกในพอลิเมอร์จะเริ่มหลอมละลาย ซึ่งพฤติกรรมการหลอมละลายของพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline polymer) รวมทั้ง UHMWPE ถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการวัดปริมาณของผลึกของพอลิเมอร์ หรือที่เรียกว่า “สภาพความเป็นผลึก (Crystallinity)” และสามารถวัดได้ด้วยการใช้ differential scanning calorimeter (DSC) โดย DSC จะวัดปริมาณความร้อนจำเพาะที่จำเป็นต้องใช้ต่อการเพิ่มอุณหภูมิของพอลิเมอร์ ตัวอย่าง DSC data สำหรับ UHMWPE มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 DSC กราฟของ UHMWPE [1]

DSC traces สำหรับ UHMWPE ประกอบด้วย 2 ส่วน โดยส่วนที่หนึ่งของเส้นโค้งเป็นจุดสูงสุดของอุณหภูมิหลอมละลาย ( $T_m$ ) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ  $137^{\circ}\text{C}$  และสอดคล้องกับจุดที่เป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline regions) ที่มีการหลอมละลาย ซึ่งอุณหภูมิหลอมละลายของ UHMWPE สะท้อนให้เห็นถึงความหนาของผลึก หรือความสมบูรณ์ของผลึก โดยความหนาแน่นและความสมบูรณ์ของผลึก UHMWPE ยิ่งมากมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิหลอมละลายสูงกว่าผลึกที่ไม่สมบูรณ์หรือผลึกที่มีขนาดเล็กกว่า

บริเวณพื้นที่ด้านล่างภายใต้จุดหลอมละลายสูงสุด คือ สัดส่วนของสภาพความเป็นผลึกหรือปริมาณผลึกที่เรียกว่า ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) นอกจากนี้ DSC ยังสามารถวัดปริมาณพลังงานความร้อนสุทธิต่อหน่วยมวล (ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้สำหรับการหลอมละลาย (Enthalpy) หรือ  $\Delta H_{\text{emdotherm}}$ ) ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการหลอมละลายบริเวณส่วนที่เป็นผลึกภายในขั้นตอนทดสอบโดยเปรียบเทียบกับค่าการเปลี่ยนแปลง enthalpy ของขั้นตอนที่มีความสมบูรณ์ของผลึก 100% (Enthalpy ของ UHMWPE บริสุทธิ์  $\Delta H_f = 291 \text{ J/g}$ ) และคำนวณออกมาเป็นปริมาณผลึก สำหรับก้อนวัสดุ UHMWPE ส่วนใหญ่จะมีปริมาณผลึกประมาณ 50-55%

ในขณะที่อุณหภูมิของพอลิเมอร์กึ่งผลึกถูกทำให้สูงขึ้นเหนืออุณหภูมิหลอมละลาย พอลิเมอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเกิดการไหลตัว (Flow transition,  $T_f$ ) และกลายเป็นของเหลว สำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า  $500,000 \text{ g/mol}$  สามารถสังเกตเห็นพฤติกรรมไหลได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามสำหรับพอลิเอทิลีนที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่า  $500,000 \text{ g/mol}$  ด้วยสายโซ่โมเลกุลที่มีปริมาณมากกว่าและซับซ้อนมากกว่าจะเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการไหล ส่งผลให้ UHMWPE ไม่แสดงพฤติกรรมไหลตัวหรืออาจกล่าวได้ว่า “ไม่มีจุดไหลตัว” เหมือนพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ

## 2.2 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์บริสุทธิ์ส่วนใหญ่มีสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอต่ำ ซึ่งบางครั้งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานบางประเภท ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เหล่านี้ด้วยการผสมสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆ เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งาน และนอกจากนี้ยังมีการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูป ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูปนี้โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า พอลิเมอร์คอมพาวด์ (Polymer compound) สารเติมแต่งที่ใช้ผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ประกอบด้วย ฟิลเลอร์ (Filler) สารประสาน (Coupling agents) สารเพิ่มความทนแรงกระแทก (Impact modifiers) สารก่อผลึก (Nucleating agents) พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

### 2.2.1 ฟิลเลอร์ (Filler)

ฟิลเลอร์ หมายถึง สารเติมแต่งที่ผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มเนื้อหรือปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ (บางครั้งเรียกว่า สารเพิ่มเนื้อ (Insert fillers)) และปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์

(หรือเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcing fillers)) และนอกจากนี้ฟิลเลอร์ยังมีส่วนช่วยลดต้นทุนการผลิตชิ้นงานที่ทำจากพอลิเมอร์ ซึ่งเรียกฟิลเลอร์ชนิดนี้ว่า เอกเทนเดอร์ (Extenders)

### 2.2.2 สารประสาน (Coupling agents)

สารประสาน หมายถึง สารที่ทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมการเกาะยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์ ซึ่งบางครั้งเรียกว่า สารช่วยยึด (Adhesion promoters) และนอกจากนี้ในการใช้สารประสานบางครั้งอาจมีความจำเป็นต้องใช้สารปรับปรุงพื้นผิวฟิลเลอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือความแข็งแรงของการเกาะยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์

สารประสานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปประกอบด้วย สารโครเมียมเชิงซ้อน (Chromium complexes) ซิลเลน (Silanes) ไททาเนต (Titanates) และเซอร์โคเนียมอะลูมิเนต (Zirconium aluminates)

### 2.2.3 สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers)

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติเปราะและขาดความเหนียว (Toughness) และความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact strength) ต่ำ การทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะลดลง และมีความทนทานต่อแรงกระแทกหรือมีความเหนียวเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการผสมสารเติมแต่งที่เรียกว่า สารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก (Impact modifiers) ตัวอย่างสารเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก ประกอบด้วยสารชนิดต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** สารเพิ่มความทนแรงกระแทกที่สำคัญทางการค้า

สารเพิ่มความทนแรงกระแทก	องค์ประกอบ / สันฐานวิทยา	ใช้งานกับ
EPDM	เอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีน เทอร์พอลิเมอร์	PP ,PS
Functionalized polyolefins	พอลิโอเลฟินส์ที่ถูกดัดแปลงด้วยกรด	PA,PC
เทอร์โมพลาสติก-พอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์	โคพอลิเมอร์แบบบล็อก (soft polyether/hard polyester)	PET,PBT
SBS	สไตรีน-บิวตะไดอีน บล็อกโคพอลิเมอร์ (triblock, soft polybutadiene /hard PS)	PS,PP,PPO
Acrylic (core-shell)	Polyacrylic 'core'/polymethacrylic 'shell'	PVC,PC,PET
MBS (core-shell)	Polybutadiene or polybutadiene/styrene 'core' polymeethacrylic 'shell'	PVC, PC, PET,PBT
ABS	อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน-สไตรีน เทอร์พอลิเมอร์	PVC,PC, PUR,PET
EVA	เอทิลีน-ไวนิลเอซิเตตโคพอลิเมอร์	PVC
SBR	ยางสไตรีน-บิวตะไดอีน	PS
NBR	อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีนโคพอลิเมอร์	PVC
CPE	คลอริเนเตดพอลิเอทิลีน	PVC

### 2.2.4 ก่อผลึก (Nucleating agents)

สารก่อผลึก เป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์ โดยทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสเทียมหรือนิวเคลียสก่อผลึก ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติทางกลสูงขึ้น ในขณะเดียวกัน

ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ (โครงสร้างผลึกมีความละเอียด) ส่งผลให้แสงผ่านได้มากขึ้น โพลีเมอร์จึงสมบัติโปร่งแสงขึ้น

### 2.2.5 พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizers)

กระบวนการเพิ่มความอ่อนนุ่มให้กับพอลิเมอร์หรือที่เรียกว่า พลาสติกไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่ผสมเข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่า พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซออร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Extensibility or stretchability) ของพอลิเมอร์

### 2.3 กระบวนการขึ้นรูป UHMWPE

จากความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับองค์ประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ ที่ประกอบไปด้วย C และ H ดังที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา เป็นเพียงแค่มารู้พื้นฐานขององค์ประกอบทางเคมีเท่านั้น แต่ถ้าต้องการอธิบายให้ลึกซึ้งจนสามารถจินตนาการออกมาเป็นก้อนวัสดุ UHMWPE ที่สามารถจับต้องและนำไปใช้งานได้จะต้องอธิบายให้เห็นภาพขั้นตอนต่างๆ ของกรรมวิธีการผลิต



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนต่างๆ ของการขึ้นรูปชิ้นงาน UHMWPE โดยเริ่มจาก; a) ผง UHMWPE บริสุทธิ์ b) แท่งวัสดุกิ่งสำเร็จรูป UHMWPE ที่ผลิตจากผง UHMWPE c) การตัดเฉือนปาดผิวชิ้นงานขึ้นรูปชิ้นงานจากแท่ง UHMWPE ด้วยการกลึงขึ้นรูป และ d) ชิ้นงานสำเร็จรูป UHMWPE ที่ได้จากการตัดเฉือนขึ้นรูป (รูปนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก David Schroeder [Biomet, Inc., Warsaw, Indiana, USA].) [1]

โดยขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตชิ้นงาน UHMWPE นั้นมี 3 ขั้นตอนที่สำคัญ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนแรกคือการเปลี่ยน ethylene gas ให้เป็นผง UHMWPE ด้วยขบวนการ polymerization ขั้นตอน



ที่สองคือ ผง UHMWPE ถูกทำให้อยู่ในรูปของแข็งเป็นแผ่น แท่ง ก้อนหรือผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จ (Semi finished product) ดังแสดงในรูปที่ 2.5b และขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จ ด้วยวิธีการตัดเฉือน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.5c สำหรับในกรณีของชิ้นงานหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก อาจจะทำให้การขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกรรมวิธีการตัดเฉือน ซึ่งขบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปนี้เรียกว่า “direct compression molding (DCM)”

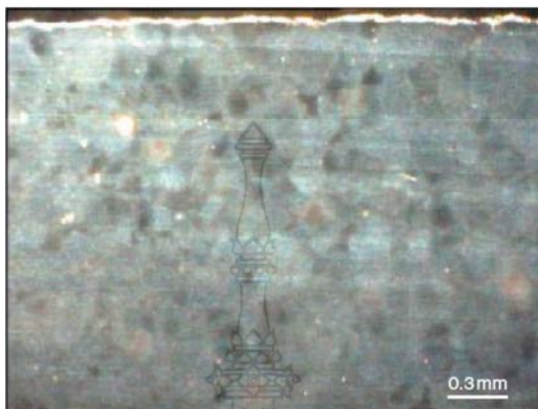
แต่ละขั้นตอนของกรรมวิธีการผลิตพื้นฐานทั้ง 3 ขั้นตอนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของ UHMWPE ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการตัดเฉือนขึ้นรูป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะรูปร่างภายนอกและปรากฏที่ผิวเท่านั้น แต่การเปลี่ยนแปลงของขบวนการ polymerization จะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของ UHMWPE และผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

การขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัสดุก้อน UHMWPE จะต้องทำการขึ้นรูปภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง เนื่องจาก UHMWPE มีความหนืดสูง ดังที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 2.1 ซึ่ง UHMWPE จะไม่มีจุดไหลตัวเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมละลายเหมือนกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่นๆ จากเหตุผลนี้ทำให้ UHMWPE ไม่สามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธีการขึ้นรูปทั่วๆ ไปที่ใช้สำหรับเทอร์โมพลาสติก อาทิเช่น การฉีดขึ้นรูปการอัดรีดด้วยสกรู หรือการเป่าขึ้นรูป แต่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion

การก่อตัวเป็นของแข็งจากการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE ด้วยกรรมวิธี compression molding และ ram extrusion เกิดขึ้นภายใต้สภาวะของการรวมกันของอุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสม โดยความแม่นยำเที่ยงตรงของการรวมกันของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรที่เป็นค่าเฉพาะของ UHMWPE ถูกนำมาใช้ในการผลิตวัสดุก้อน UHMWPE เชิงพาณิชย์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปตามหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ [2-16] ว่า กลไกที่ควบคุมการก่อตัวเป็นของแข็ง คือ การแพร่ของอะตอมที่เป็นเนื้อหลัก (Self-diffusion) ในขณะที่สายโซ่โมเลกุล UHMWPE (หรือบางส่วนของสายโซ่) ของอนุภาคเกิดการแทรกตัวเข้าหากันในระดับโมเลกุล โดยจลศาสตร์ของการแพร่บริเวณขอบเกรนที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมประสานของขอบเกรนบริเวณที่อยู่ติดกัน (ที่ความดันสูง) และความร้อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ (ที่อุณหภูมิสูง) ซึ่งส่งผลให้ขบวนการแพร่มีข้อจำกัด เนื่องจากการก่อตัวเป็นของแข็ง UHMWPE จะเกิดขึ้นด้วยภายใต้อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการแพร่ข้ามขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE

หลังจากการก่อตัวขึ้นรูปเป็นของแข็ง ผง UHMWPE จะยังคงรักษาสภาพการเป็นเม็ดอนุภาคภายในโครงสร้างเม็ดเกรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการผสม calcium-stearate ในผง UHMWPE [2, 4, 13, 16] จะสังเกตเห็นโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนที่มีลักษณะจำเพาะของ UHMWPE ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยขึ้นทดสอบจะต้องผ่านการเตรียมด้วยวิธีการเฉพาะที่แตกต่างกัน วิธีมาตรฐานที่ใช้สำหรับการเตรียมขึ้นทดสอบได้มีการอธิบายไว้อย่างละเอียดในมาตรฐาน ASTM F 648 โดยขึ้นทดสอบจะถูกเตรียมให้เป็นแผ่นบางๆ คล้ายแผ่นฟิล์มที่มีความหนาในหน่วยไมโครเมตร จากนั้นจึงนำไปทำการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงในโหมด dark field [13] แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันไม่มีการผสม calcium-stearate ในผง

UHMWPE ส่งผลให้การวิเคราะห์ตรวจโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงทำได้ยากขึ้น ดังลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งเป็นโครงสร้างจุลภาคจากการก่อตัวเป็นของแข็งของผง UHMWPE เกรด GUR 1020 (ของ Rolf Kaldewier, Ticona, Inc.) โดยชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ความหนาประมาณ 100  $\mu\text{m}$



**รูปที่ 2.6** โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรด GUR 1020 ความหนา 100  $\mu\text{m}$  จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง [1]

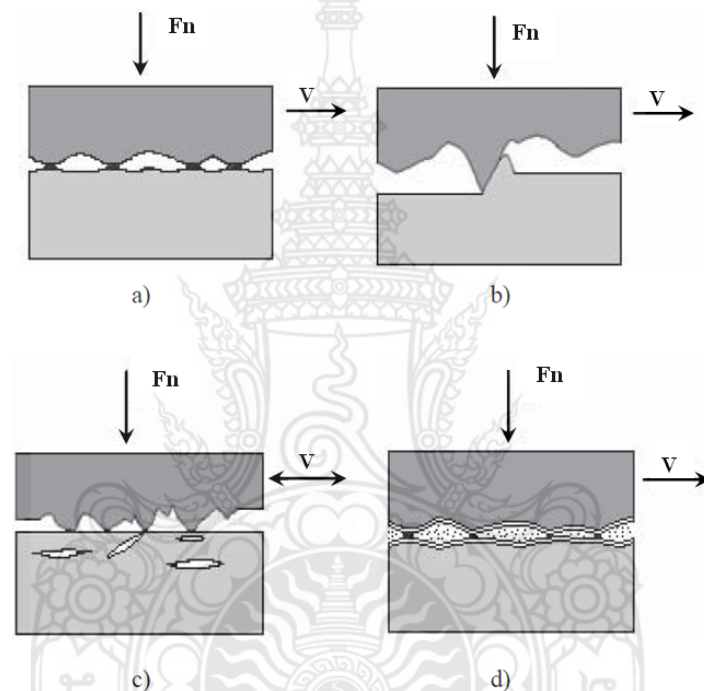
นอกจากนี้ โครงสร้างจุลภาคของก้อนวัสดุ UHMWPE ยังสามารถทำการตรวจสอบได้โดยการนำชิ้นทดสอบไปแช่แข็งในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการหักทำลายชิ้นทดสอบ [2] หรือตามด้วยการกัดด้วยกรด เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นอาณาบริเวณขอบเกรนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น [16] หลังจากนั้นจึงนำชิ้นทดสอบไปทำการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยการตรวจสอบพื้นผิวรอยแตกหักหลังจากผ่านการแช่แข็งหรือพื้นผิวหลังจากผ่านการกัดกรด

ความแตกต่างของขอบเกรนที่เกิดขึ้นเป็นตัวสะท้อนลักษณะโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างเกรนของ UHMWPE โดยความบกพร่องของก้อนวัสดุ UHMWPE จะเพิ่มขึ้น ถ้าสถานะของการก่อตัวขึ้นรูปเป็นก้อนของแข็งไม่เหมาะสม (อุณหภูมิ ความดันและเวลาที่ไม่เหมาะสม) [17] ซึ่งโดยส่วนใหญ่ ความบกพร่องที่พบจะอยู่ในรูปของเม็ดอนุภาคเดี่ยวๆ ที่ไม่มีการเกาะยึดเชื่อมประสานติดกับเม็ดอนุภาคอื่นๆ หรือ มีบางอาณาบริเวณของการก่อตัวเป็นของแข็งแยกตัวหรือไม่มีการเชื่อมประสานกับอาณาบริเวณข้างเคียง สำหรับในส่วนของเทคนิคและวิธีการมาตรฐาน (ASTM F648) เกี่ยวกับการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงสำหรับตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุก้อน UHMWPE ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ตรวจสอบความบกพร่องของการหลอมรวมผง UHMWPE และนอกจากนี้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายซึ่งประกอบด้วย laser candling และ ultrasound ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบในอุตสาหกรรมได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบวัสดุก้อน UHMWPE เกรดทางการแพทย์ด้วยเช่นกัน แต่เทคนิคการตรวจสอบดังกล่าวไม่ใช่วิธีการมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับ

#### 2.4 การสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์

พื้นผิวของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ เมื่อถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุรองลื่น (Bearing materials) ที่ต้องสัมผัสกับการเสียดสี จะเกิดการสึกหรอจากการเสียดสีกับพื้นผิวคู่สัมผัสที่แข็งกว่า การประยุกต์ใช้งานวัสดุ

คู่สัมผัสโลหะแข็งขัดถูเสียดสีกับพื้นผิวพอลิเมอร์นั้นถูกกำหนดตามความต้องการของการออกแบบทางกล และรวมถึงข้อเท็จจริงที่ว่าพอลิเมอร์สามารถต้านทานการเสียดสีกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสได้ดีกว่าการลื่นไถล เสียดสีตัวมันเอง โดยรูปแบบพื้นฐานการสึกหรอของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เริ่มต้นจากก่อดำของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสโลหะที่แข็งกว่า ซึ่งการก่อดำของชั้นฟิล์มนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของพอลิเมอร์ [18] การสึกหรอของพอลิเมอร์โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มรูปแบบการสึกหรอออกได้เป็น 4 รูปแบบประกอบด้วย การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) และการสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล (Tribochemical wear) [19-21] ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบการสึกหรอของพอลิเมอร์; a) การสึกหรอแบบยึดติด b) การสึกหรอแบบขัดถู c) การสึกหรอแบบล้าตัว d) การสึกหรอแบบไทรโบเคมีคอล [19]

#### 2.4.1 การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)

การสึกหรอแบบยึดติดเป็นรูปแบบการสึกหรอที่มีลักษณะปรากฏเป็นจุดเชื่อมประสาน (Microwelds) ระหว่างพื้นผิวของวัสดุสองชิ้นที่นำไปสู่การเสียดทาน ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.7a โดยจุดเชื่อมประสานเหล่านี้อ่อนแอและเกิดการเฉือนขาดบริเวณรอยต่อเชื่อมประสานของพื้นผิวทั้งสอง ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่จุดเชื่อมประสานมีความแข็งแรงสูง พื้นผิวของวัตถุที่อ่อนกว่าจะถูกเฉือนและส่งผลให้เกิดการถ่ายเนื้อวัสดุไปยังพื้นผิววัตถุที่แข็งกว่า

กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการลื่นไถลเสียดทานของพื้นผิวพอลิเมอร์บนพื้นผิววัสดุที่ต่างกัน (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โลหะ) ซึ่งเมื่อไหร่ก็ตามที่ความแข็งแรงของการยึดติด (adhesive bonds) ที่ก่อดำขึ้นระหว่างพื้นผิววัสดุทั้งสองที่สัมผัสกันมีความแข็งแรงมากกว่าความแข็งแรงเหนียวแน่น



(cohesive strength) ของเนื้อพอลิเมอร์จะมีผลทำให้เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เกาะยึดติดบนพื้นผิววัสดุ คู่สัมผัสและส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บางๆ ถ่ายเนื้อ (Transfer film) ลงบนพื้นผิววัสดุ คู่สัมผัส และในขณะเดียวกัน ฟิล์มพอลิเมอร์บางส่วนเกิดการหลุดร่อนออกจากอาณาบริเวณของความเสียดทานกลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ (wear debris) [22] ผลของการสึกหรอแบบยึดติดที่เกิดจากการเสียดทานของจุดเชื่อมประสานความเสียดทานจะค่อยๆ ขยายขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นรอยร้าวที่มีขนาดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการเสียดทานของจุดเชื่อมประสานที่ยึดติดกัน ซึ่ง Belyi และคณะ ได้เสนอแนวคิดไว้ว่า “การถ่ายเนื้อพอลิเมอร์เป็นลักษณะจำเพาะที่สำคัญของการสึกหรอแบบยึดติดของวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบฐาน” [23] ปฏิกิริยาการถ่ายเทความเสียดทานนั้นสามารถสังเกตเห็นได้จากวัสดุเกือบทุกชนิด โดยผลที่ตามมาของปรากฏการณ์การถ่ายเนื้อวัสดุอาจมีความแตกต่างกัน ถ้าขนาดของอนุภาคการถ่ายเนื้อวัสดุจากพื้นผิววัสดุหนึ่งไปยังวัสดุอื่นๆ มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร อัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นก็จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น [24–26] ในกรณีของการสึกหรอภายใต้สภาวะการควบคุมคงที่ การสึกหรอที่เกิดขึ้นจะปรากฏเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ของวัสดุที่อ่อนกว่าถ่ายเนื้อไปยังพื้นผิววัสดุที่แข็งกว่า ตัวอย่างเช่น การถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะ ในขณะที่เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ลงบนพื้นผิวโลหะนี้จะเกิดการหลุดออกของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากพื้นผิวโลหะควบคู่กันไปด้วย ถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์หลุดออกจากพื้นผิวโลหะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจะมีผลทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นแต่อย่างไรก็ตาม ถ้าชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ยังคงเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะ ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสที่กล่าวถึงนี้อาจมีผลต่อการเกาะยึดของชั้นฟิล์ม ซึ่งการแพร่กระจายของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะจะส่งผลทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดแต่การสึกหรอเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

#### 2.4.2 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear)

การสึกหรอแบบขัดถูเป็นรูปแบบการสึกหรอที่มีการตัดเฉือนเนื้อวัสดุเกิดขึ้น โดยเกิดจากวัสดุที่แข็งกว่าตัดเฉือนวัสดุที่อ่อนกว่า ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.7b ซึ่งหลักฐานการสึกหรอแบบนี้จะปรากฏเป็นรอยขีดข่วน ร่องรอยการครูดหรือขูดออกของเนื้อวัสดุที่นำไปสู่การสูญเสียเนื้อวัสดุ

กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบขัดถูนี้เกิดขึ้นจากจุดปลายความหยาบพื้นผิวที่แข็ง (Hard asperities) บนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสและหรืออนุภาคแข็งเคลื่อนที่ตัดเฉือนพื้นผิวพอลิเมอร์ โดยความหยาบพื้นผิวหรือความขรุขระของพื้นผิวเป็นปัจจัยที่กำหนดแรงเสียดทาน ซึ่งผลของการขัดถูจะแสดงออกมาในรูปของรอยขีดข่วน รอยแฉะและร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ อนุภาคการสึกหรอที่เกิดจากการขัดถูส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างเป็นเศษที่ถูกตัดเฉือนออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ คล้ายๆ กับเศษที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดในงานตัดเฉือนด้วยเครื่องมือกล แต่จะมีขนาดที่เล็กกว่า การสึกหรอแบบขัดถูมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูปร่างเรขาคณิตของจุดปลายความหยาบพื้นผิว (Asperity) ของวัสดุคู่สัมผัสที่แข็งกว่าและส่งผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้น โดยขึ้นอยู่กับรูปร่างและมุมปลายของจุดหรือบริเวณที่เกิดการขัดถูบนพื้นผิวของวัสดุคู่สัมผัส [22] ในขณะที่เกิดการขัดถู เมื่อจุดปลายความหยาบพื้นผิวหรืออนุภาคขัดถูกระทำกับพื้นผิวพอลิเมอร์มีผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียดถู ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบที่สำคัญ คือ แบบที่หนึ่งเกิดการเขาระเบือนร่องบนพื้นผิวพอลิเมอร์ ซึ่งบ่อยครั้งจะมีการกล่าวอ้างถึงการไถครูดที่เกิดจากการผลัด

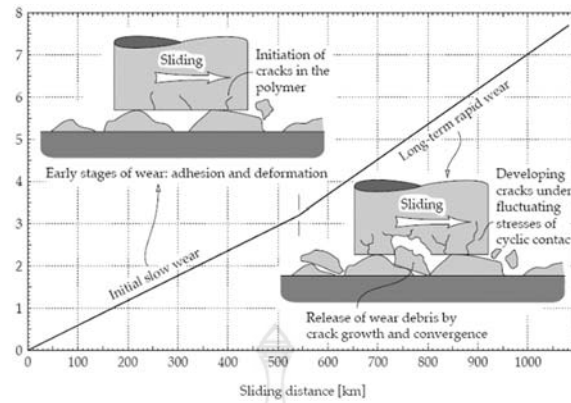
หรือดันท่อนุภาคและวัสดุไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นรอยไถครูดทางยาวและดันเนื้อวัสดุออกด้านข้างที่ส่งผลให้เกิดการก่อตัวเป็นสันโค้งๆ กับรอยไถครูดและต่อมามีการพัฒนาเกิดเป็นร่องโดยไม่มีเนื้อวัสดุถูกเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิว แบบที่สองเรียกว่า “เกิดการตัดเฉือน” เนื่องจากมีลักษณะคล้ายๆ กับการตัดเฉือนในระดับไมโคร ซึ่งเนื้อวัสดุถูกตัดเฉือนออกเป็นอนุภาคการสึกหรอขนาดเล็กที่ถูกขจัดออกมาเป็นชิ้นเล็กๆ (Chip)

### 2.4.3 การสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear)

การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเมื่อวัสดุได้รับความเค้นวัฏจักร ส่งผลให้เกิดความเครียด (Strain) ภายในเนื้อวัสดุบริเวณใต้ชั้นผิวและก่อให้เกิดเป็นรอยร้าวเล็กๆ ภายในเนื้อวัสดุขนานกับพื้นผิว ดังลักษณะรูปแบบการสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 2.7c และเมื่อไหร่ก็ตามที่รอยร้าวเหล่านี้มีขนาดเพิ่มขึ้นจนถึงขนาดวิกฤติจะทำให้เกิดการหลุดออกมาของแผ่นชั้นส่วนย่อยหรือเกล็ดที่เป็นอนุภาคการสึกหรอ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้มักถูกกล่าวถึงว่าเป็นการสึกหรอที่เกิดจากการแตกออกของชั้นพื้นผิว (Delamination wear)

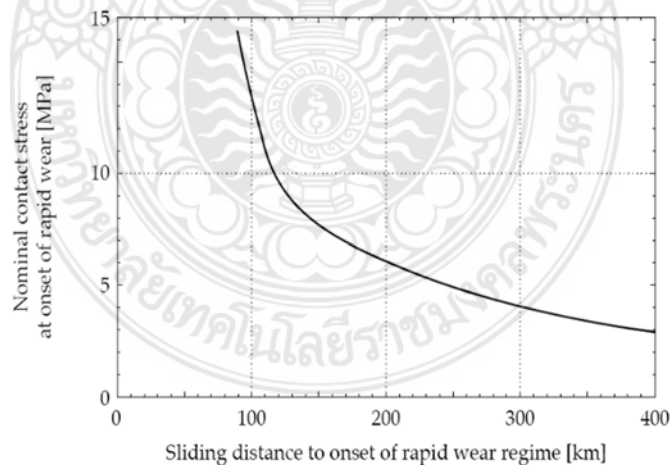
กลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์แบบนี้เกิดขึ้นจากการแพร่ขยายของรอยร้าวบริเวณที่มีการแปรรูปซ้ำๆ จากการเสียดทาน โดยอนุภาคการสึกหรอ (Wear debris) เกิดจากการขยายตัวและการฉีกขาดของรอยร้าวขนาดเล็กบนพื้นผิวพอลิเมอร์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการสั่นไถล โดยการสึกหรอแบบล้าตัวนี้เกิดขึ้นหลังจากพอลิเมอร์สัมผัสกับการเสียดทานเป็นเวลานาน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อพอลิเมอร์เนื่องจากความเค้นภายในที่เกิดขึ้นซ้ำๆ และสะสมภายใน โดยความเค้นที่เกิดขึ้นซ้ำและสะสมอยู่ภายในไม่สามารถขจัดออกให้หมดไปได้ แต่จะมีปริมาณสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และเป็นตัวเร่งที่พัฒนาไปสู่การเกิดการแตกร้าวของพอลิเมอร์ การแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายอาณาบริเวณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณความเค้นสะสมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขบวนการที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้เรียกว่า “ความล้าเสียดทาน (Friction fatigue)” และมีความแตกต่างจากความล้าของวัสดุก่อน เนื่องจากความล้าเสียดทานเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณพื้นผิวและใต้พื้นผิวของวัสดุเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การแตกร้าวจากความล้านี้จะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณจุดเล็กๆ บนพื้นผิวของวัสดุที่เป็นจุดสัมผัสความเค้นหรือเกิดการดึงแปรรูปสูงสุด จากทฤษฎีและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ภายในใต้อาณาบริเวณที่รับภาระจะเป็นตำแหน่งจุดสัมผัสความเค้นสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์จะทนต่อวัฏจักรความเค้นจากการสั่นไถลกลับไปกลับมาซ้ำๆ จำนวนหลายๆ รอบ และต่อมาส่งผลให้บริเวณผิวสัมผัสเกิดการสึกหรอแบบล้าตัว โดยพฤติกรรมการสึกหรอแบบล้าตัวนี้สามารถสังเกตเห็นได้จากตัวอย่าง UHMWPE ที่มีการสั่นไถลด้านกับพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะที่มีความเรียบผิวสูง โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการสั่นไถลเสียดสีเป็นระยะทางหลายร้อยกิโลเมตร [27] ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.8

ความเสียหายหรือการสึกหรอของพื้นผิวจากการสึกหรอแบบล้าตัว พบว่า เกิดขึ้นหลังจากพื้นผิวพอลิเมอร์สั่นไถลเป็นระยะทางไกลๆ โดยอัตราการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นพร้อมๆ กับการขยายตัวของรอยร้าวและอนุภาคการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะของการสึกหรอจะอยู่ในรูปของเศษอนุภาคการสึกหรอที่แตกออกเป็นเศษลอนชิ้นเล็กๆ บนชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัสที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของขบวนการสึกหรอแบบยึดติด [27]



รูปที่ 2.8 แสดงอัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ UHMWPE เนื่องจากเริ่มเกิดการสึกหรอแบบล้าตัว หลังจากผ่านการสั่นไถลต้านกับวัสดุคู่สัมผัสโลหะด้วยระยะทางต่างๆ [27]

การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอจากการสึกหรอแบบยึดติดเป็นการสึกหรอแบบล้าตัวนั้นถูกควบคุมด้วยความเค้นสัมผัส (Contact stress) ตัวอย่างเช่น ในกรณีที่มีความเค้นสัมผัสต่ำกว่า 1 MPa การสั่นไถลเป็นระยะทางอนันต์ จะทำให้การสึกหรอแบบล้าตัวเกิดขึ้นเสมอ และนอกจากนี้การสึกหรอแบบล้าตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นกับการรับภาระที่สูงสั่นไถลบนพื้นผิวที่เรียบและไถลด้วยระยะทางไกลๆ อีกด้วยซึ่งรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการทดสอบการล้าตัวของวัสดุ UHMWPE ที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการสึกหรอแบบล้าตัวภายใต้ความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นต่อระยะทางของการไถล

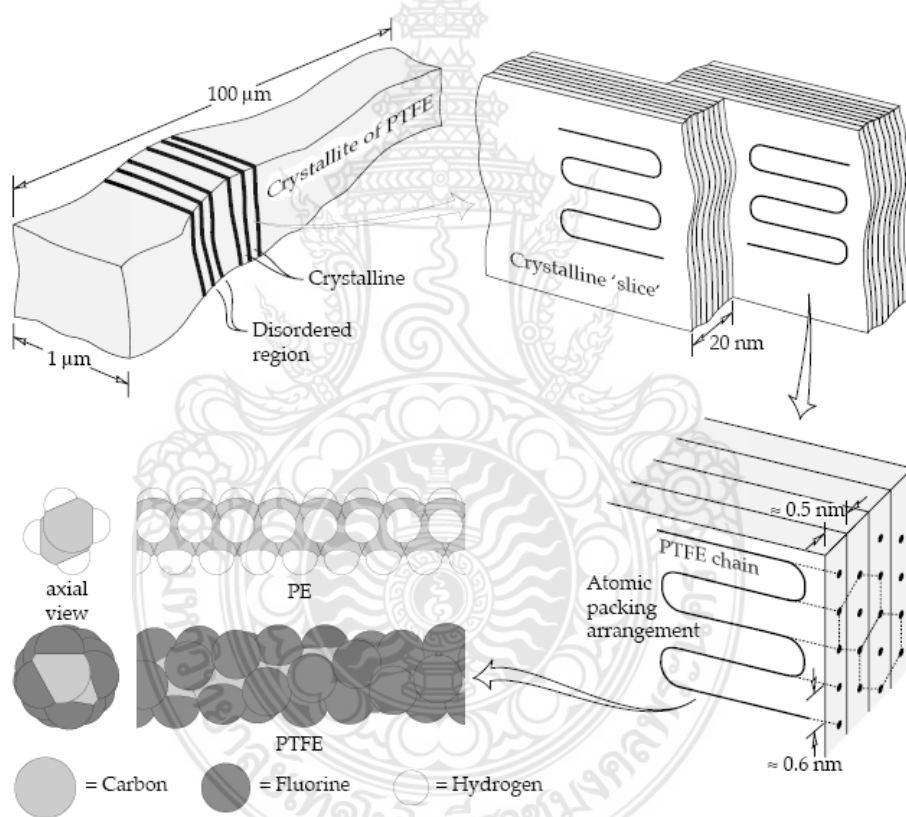


รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอแบบล้าตัวและความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้น [27]

การสึกหรอของวัสดุโดยทั่วไปจะมีความแตกต่างของปรากฏการณ์ของการสึกหรอที่เกิดขึ้น 3 ระยะ [28] คือ การสึกหรอระยะเริ่มต้น (Running-in) การสึกหรอระยะคงตัวหรือสม่ำเสมอคงที่ (Steady state) การสึกหรอระยะรุนแรง (Wear out) สำหรับในกรณีของการสึกหรอที่เกิดขึ้นในระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสระหว่างโลหะ-พอลิเมอร์ ในระยะแรกจะหมายถึงการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์บ้าง ถ้า

เนื้อลงบนพื้นผิวโลหะ โดยสมบัติทางด้านโทรโปโลยีของระบบการเสียดทานของวัสดุพื้นผิวคู่สัมผัสนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะ ซึ่งประกอบด้วยสมบัติพื้นฐานทางกายภาพทางเคมี และทางกลของวัสดุ ความแข็งแรงของการเชื่อมประสานหรือเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวของโลหะ บริเวณหรือส่วนของพื้นที่พื้นผิวโลหะที่ถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ ความรุนแรงของปฏิกิริยาเกาะยึดติดบนพื้นผิวโลหะ ซึ่งสมบัติจำเพาะต่างๆ เหล่านี้ถูกยืนยันด้วยผลการทดลองและรายงานผลการศึกษาวิจัยที่นำเสนอโดยนักวิจัยหลายๆ ท่าน [21, 29, 30]

ดังที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า พอลิเมอร์เกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวแข็งของโลหะด้วยวิธีการดูดซับ [31] ซึ่งสามารถสันนิษฐานได้ว่า ส่วนประกอบที่เกาะยึดติดแนบอยู่ด้วยกันของแรงเสียดทานขึ้นอยู่กับ การดูดซับในระดับไมโครโมเลกุล (Micro molecules) ที่จำกัดการเคลื่อนที่ของหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) โดยการจำกัดการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลจะมีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อพฤติกรรมทางด้านโทรโปโลยีของพอลิเมอร์

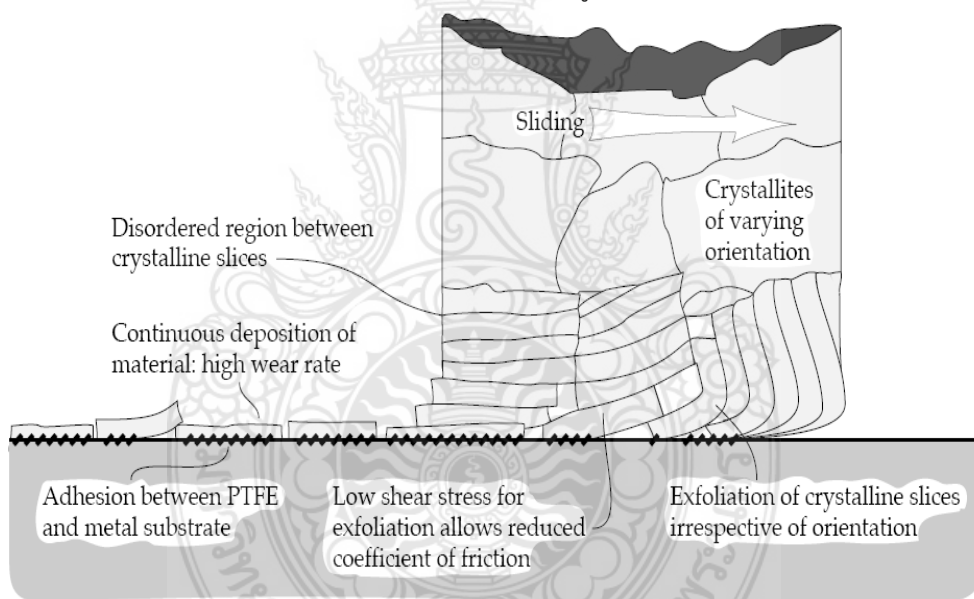


รูปที่ 2.10 โครงสร้างผลึกของ PTFE และโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE และ PE [32-35]

สำหรับการอธิบายการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของการลื่นไถลแล้วส่งผลให้เกิดการสึกหรอของพอลิเมอร์ ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการก่อตัวของชั้นฟิล์มพอลิเตตราฟลูออโรเอทีลีนหรือเพฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างผลึกดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะที่แสดงในรูป เป็นตัวอย่างชั้นฟิล์ม PTFE ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศที่มีการยึดเกาะแนบติดกับพื้นผิวโลหะอย่างแข็งแรง [36] ปรัชญาการยึดเกาะแนบติดที่เกิดขึ้นนี้ มีความเข้าใจว่าเป็นปฏิกิริยาทางเคมีของบริเวณจุดที่สัมผัสกัน

ระหว่างฟลูออรีน (Fluorine) และคาร์บอนกับพื้นผิวโลหะที่ลื่นไถลต้านกัน [36, 37] ถึงแม้ว่าอาจจะมีความเป็นไปได้ที่ว่า การเกาะยึดแน่นติดที่แข็งแรงสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสโลหะกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ แต่โครงสร้างโมเลกุลที่มีลักษณะเฉพาะของ PTFE ทำให้เกิดกลไกของการถ่ายเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ที่เป็นลักษณะเฉพาะสำหรับ PTFE

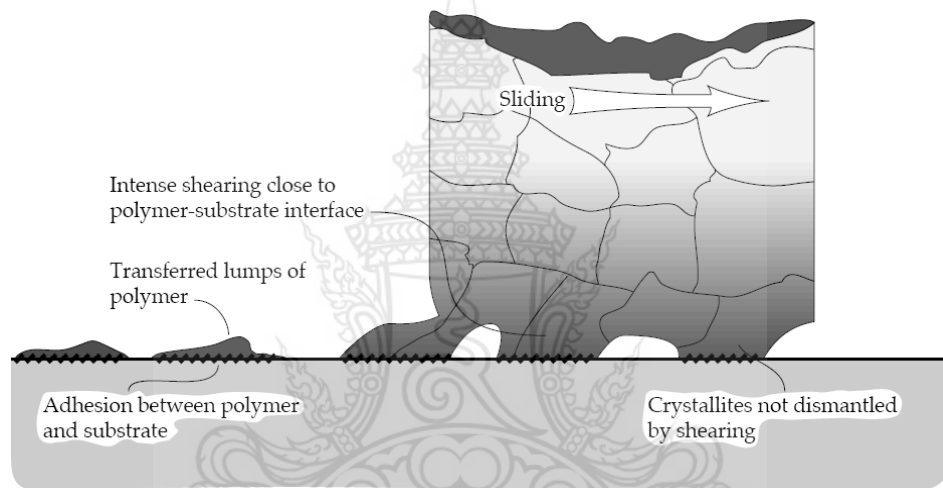
จากการที่มีช่องว่างหรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่ส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกทำให้มั่นใจได้ว่า โมเลกุลของ PTFE สามารถเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ PTFE ที่อยู่ภายใต้ความเค้น สำหรับในส่วนของโครงผลึกของ PTFE จะประกอบด้วยชั้นของส่วนที่เป็นผลึกถูกชั้นกลางด้วยชั้นของเนื้อวัสดุอสัณฐาน (Amorphous) ที่ไม่เป็นระเบียบ (Disordered) ซึ่งอ่อนแอและเสียรูปได้ง่าย ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 13 ส่งผลให้ PTFE เกิดการแปรรูปได้ง่ายในชุดของชั้นแผ่นผลึกและอสัณฐานที่ต่อเนื่องกัน [33] โดยบริเวณของ PTFE ที่ลื่นไถลสัมผัสกับพื้นผิวที่แข็งกว่าจะเกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุในรูปของชั้นแผ่นเนื้อวัสดุที่ลื่นไถลออกมา ซึ่งส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำแต่มีอัตราการสึกหรอสูง [34, 35] กลไกการสึกหรอของ PTFE มีลักษณะดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การสึกหรอและการสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ที่ถ่ายเนื้อบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสของวัสดุ PTFE [19]

กลไกการถ่ายชั้นฟิล์ม (Film transfer mechanism) พอลิเมอร์บนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัสมีพฤติกรรมคล้ายๆ กับการถ่ายชั้นฟิล์มพอลิเมอร์ของ PTFE ซึ่งปัจจุบันยังไม่พบในพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ โดยปริมาณชั้นฟิล์มพอลิเมอร์และพอลิเมอร์คอมโพสิตที่สะสมบนพื้นผิวโลหะที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นจะกระตุ้นให้เกิดขบวนการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) เมื่อมีการลื่นไถลต้านกับพื้นผิวของแข็ง [38] แต่กลไกที่ทำให้เกิดการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนมีข้อยกเว้นสำหรับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) และ Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) [33] เนื่องพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะคล้ายกับ PTFE ทำให้

เป็นที่เข้าใจว่ามีสาเหตุมาจากลักษณะจำเพาะของรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่เรียบ (Smooth molecular profile) หรือการขาดแคลนกลุ่มอะตอมที่อยู่ด้านข้างโครงสร้างโมเลกุลและการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ [39] แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการลื่นไถลของ PTFE HDPE และ UHMWPE มีอิทธิพลมาจากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตย์ (Static coefficient of friction) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (Kinetic coefficient of friction) ประมาณ 50% [40] เนื่องจากในช่วงแรกของการเริ่มต้นการลื่นไถลมีความจำเป็นต้องใช้แรงที่สูงกว่าเป็นพิเศษสำหรับการเริ่มก่อตัวเพื่อสร้างชั้นฟิล์มพอลิเมอร์และถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส สำหรับในส่วนของกลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) จะมีลักษณะของการเกิดพฤติกรรมถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นเป็นก้อนพอลิเมอร์ที่เกิดจากการหลุดออกมาของแผ่นผลึกและเกิดการเกาะยึดแนบติดกับพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส



รูปที่ 2.12 กลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อน (Lumpy transfer) ที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์โดยส่วนใหญ่ [18]

ขนาดของก้อนเนื้อพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากกลไกการถ่ายเนื้อพอลิเมอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยประมาณ  $1 \mu\text{m}$  [40] เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่เกิดการสัมผัสมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของฟิล์มของ PTFE ที่ถ่ายเนื้อลงบนพื้นผิวโลหะคู่สัมผัส ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับภาระของก้อนพอลิเมอร์เป็นการรับภาระของฟิล์ม PTFE ที่มีขนาดเล็ก ลักษณะหรือรูปแบบของการถ่ายเนื้อชั้นฟิล์มพอลิเมอร์นี้ไม่ทำให้ลักษณะจำเพาะของการสึกหรอและความเสียดทานของการลื่นไถลสัมผัสดีขึ้น ซึ่งในความเป็นจริงที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่แสดงพฤติกรรมถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ออกมาเป็นก้อนจะไม่ใช่วัสดุรองรับ (Bearing materials) ที่มีประสิทธิภาพมากนัก

เมื่อไหร่ก็ตามที่วัสดุพอลิเมอร์ลื่นไถลต้านกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ พอลิเมอร์ที่มีการเกาะยึดแนบติดกันอย่างอ่อนแอหรืออ่อนแอกว่า จะเกิดการสึกหรอมากกว่า โดยเกิดการก่อตัวถ่ายเนื้อเป็นชั้นฟิล์มบนพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงของการเกาะยึดแนบติดเข้าด้วยกันมากกว่า ซึ่งพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของกลไกการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอที่สังเกตพบในวัสดุที่ไม่ใช่พอลิเมอร์ [41]

#### 2.4.4 การสึกหรอแบบไตรโบเคมี (Tribochemical wear)

การสึกหรอแบบไตรโบเคมีเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การขยายตัวของชั้นฟิล์มถ่ายเนื้อพอลิเมอร์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างพื้นผิวต่างๆ ที่มีการสัมผัสกันและสภาพแวดล้อมที่ล้อมรอบ หนึ่งในรูปแบบส่วนใหญ่ของการสึกหรอแบบแบบไตรโบเคมีคือ การสึกหรอในลักษณะไตรโบออกซิเดชัน ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากการเสียดทานเป็นตัวเร่งให้เกิดการขยายปริมาณออกไซด์ฟิล์ม โดยออกไซด์ฟิล์มแยกออกจากพื้นผิววัสดุเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้นจนถึงความหนาวิกฤติ กลายเป็นอนุภาคการสึกหรอ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.7d

กลไกการสึกหรอแบบไตรโบเคมีเกิดจากการขาดหรือแยกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และหมู่เคมีที่อยู่บริเวณด้านข้างของสายโซ่หลัก และต่อมาจะเกิดการก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนเข้ามาแทนที่ การก่อตัวของอนุมูลอิสระและไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะและกลายเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาไตรโบออกซิเดชัน (Tribo-oxidation) บนพื้นผิวโลหะแล้วถ่ายทอดไปยังพื้นผิวพอลิเมอร์โดยอยู่ในรูปของอนุภาคที่ถ่ายทอดในระดับไมโคร และนอกจากนี้ ปฏิกิริยาไตรโบเคมีที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวขัดขวางการเกาะยึดติดของอนุภาคที่เกิดการถ่ายทอดในระดับไมโครกับพื้นผิวสัมผัสของลูกกลิ้ง [42]

### 2.5 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางด้านไตรโบโลยี

#### 2.5.1 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางกล

##### การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถทำได้ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ กล่าวคือ การทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพลาสติกที่มีลักษณะแข็ง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (Plasticized PVC) และพอลิเอทิลีน



รูปที่ 2.13 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D

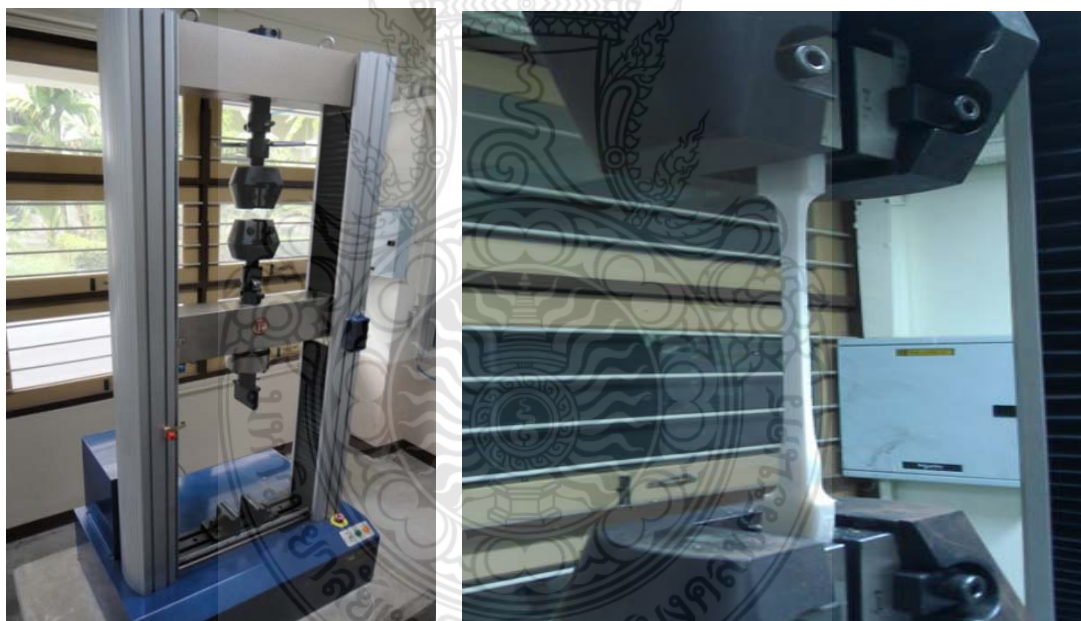


สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.13

#### การทดสอบความต้านแรงดึง

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 5 kN ยี่ห้อ IE-Tension รุ่น IE-T5k ของห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบน ความหนาไม่เกิน 7 mm โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638



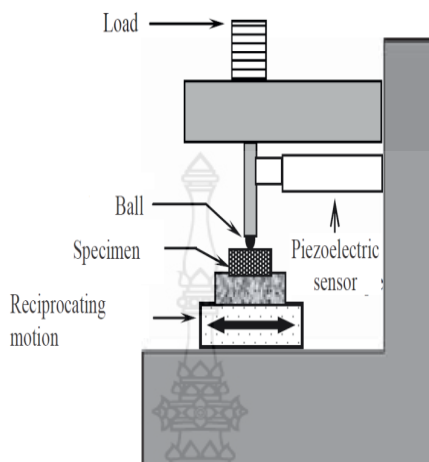
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบแรงดึง การจับยึดชิ้นทดสอบและการดึงชิ้นทดสอบ

#### 2.5.2 ทฤษฎีการทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยี

การทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยีเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอของวัสดุด้วยเครื่องไทรโบมิเตอร์ ซึ่งสามารถทำการทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติหรือควบคุมบรรยากาศ และนอกจากนี้ยังสามารถทำการทดสอบแบบได้ในสภาวะที่มีสารหล่อลื่นและปราศจากสารหล่อลื่น รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างลักษณะของเครื่องไทรโบมิเตอร์ชนิดหนึ่งสำหรับห้องปฏิบัติการที่ทำการทดสอบด้วยหลักการ Ball on disk ที่มีระบบการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและหลังสลับกัน การกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบโดยทั่วไปประกอบด้วย แรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบ



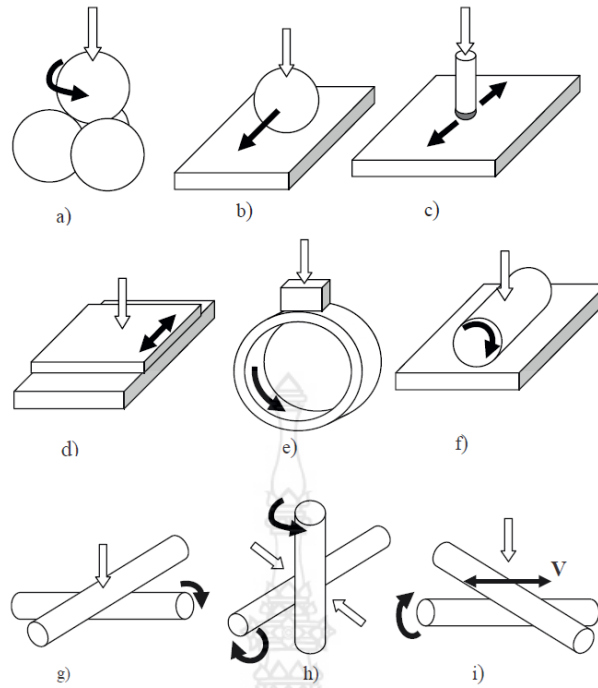
ความเร็วของการลื่นไถล และสภาวะแวดล้อมของการทดสอบ (ความชื้น และการควบคุมบรรยากาศ หรือ ความดันตามธรรมชาติและความดันของก๊าซที่เติมเข้าไปในระบบการทดสอบ) สำหรับการวัดผลการทดสอบ โดยทั่วไปจะเป็นการวัดแรงเสียดทาน อุณหภูมิของพื้นผิววัสดุ ความต้านทานการสัมผัสและความต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 2.15 เครื่องทดสอบการสึกหรอ Ball on disk tribometer [19]

การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสึกหรอขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานวัสดุที่ต้องการนำไปประยุกต์ใช้ ซึ่งวิธีการทดสอบมีมากมายหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของการสัมผัสของวัสดุคู่สัมผัสที่แตกต่างกัน ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.16

การทดสอบการสึกหรอของวัสดุด้วยวิธีการแบบ Block on ring ชิ้นงานทดสอบจะอยู่ในรูปของก้อนสี่เหลี่ยมที่ถูกวางและกดลงบนวงแหวนทดสอบที่หมุนอยู่กับที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งสามารถปรับและควบคุมความเร็วรอบของการทดสอบได้ตามต้องการ สำหรับในส่วนของารวัดเพื่อประเมินอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบนั้น สามารถวัดประเมินได้จากความกว้างของรอยสึกหรอ โดยผลการทดสอบออกมาเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงพื้นที่รอยสึกหรอต่อหน่วยแรงกดคูณระยะทางที่ทำการทดสอบ ( $\text{mm}^2/\text{Nm}$ ) ในช่วงของการสึกหรอระยะคงตัว และนอกจากนี้การประเมินอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบยังสามารถประเมินได้จากน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่สูญเสียและสามารถแปลงผลการทดสอบออกมาในรูปปริมาณที่สูญเสีย (Volume loss) ของชิ้นทดสอบเทียบปริมาตรที่สูญเสียของวัสดุวงแหวนคู่สัมผัส ซึ่งวิธีการทดสอบนี้สามารถนำไปใช้สำหรับการทดสอบวัสดุได้หลายประเภทรวมทั้ง โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และผิวเคลือบ โดยวิธีการทดสอบแบบ block on ring มีลักษณะของการทดสอบดังแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 2.17



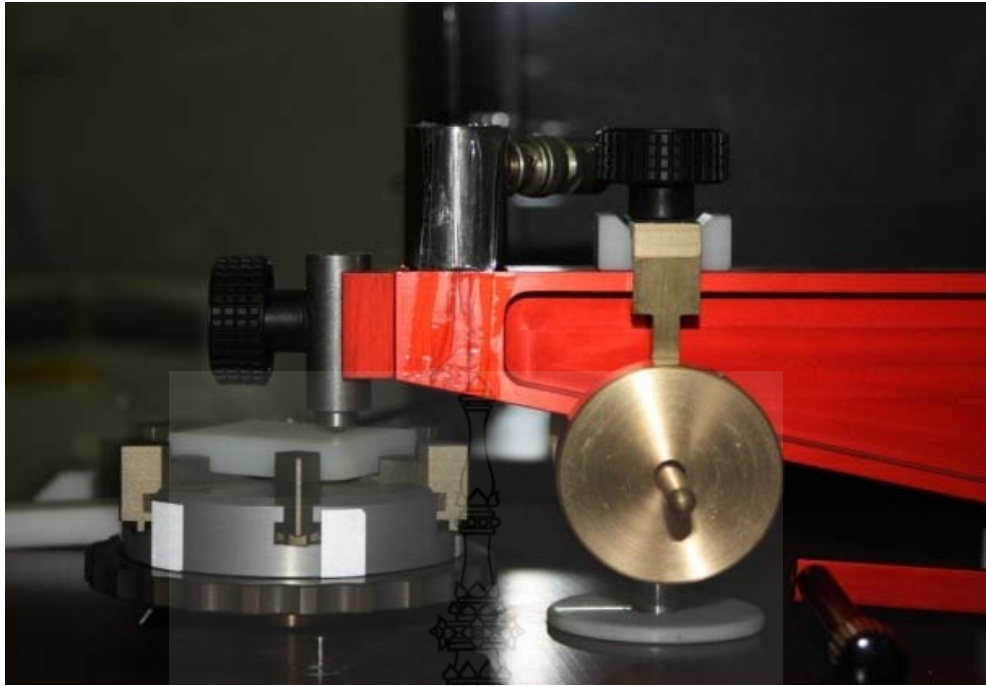
รูปที่ 2.16 ลักษณะรูปร่างของการสัมผัสของการทดสอบไทรโบมิเตอร์ [19] a) Four ball b) Sphere/plane c) Pin on disk d) Plane/plane e) Plane/cylinder f) Cylinder/plane g-i) Cylinder/ cylinder



รูปที่ 2.17 การทดสอบการสึกหรอของวัสดุด้วยวิธีการแบบ Block on ring

**การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน**

การทดสอบ Ball on disk เป็นวิธีการทดสอบโดยการใช้หัวกดลูกบอลเหล็กกล้าทรงกลมที่ถูดยึดอยู่กับที่และมีแรงกดลูกบอลให้กดสัมผัสเสียดสีกับชิ้นทดสอบที่หมุนอยู่กับที่ด้วยความเร็วรอบที่กำหนด ซึ่งหลักการของการทดสอบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.18 การทดสอบด้วยวิธีการ Ball on disk สามารถนำมาใช้ทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอระหว่างวัสดุคู่สัมผัส

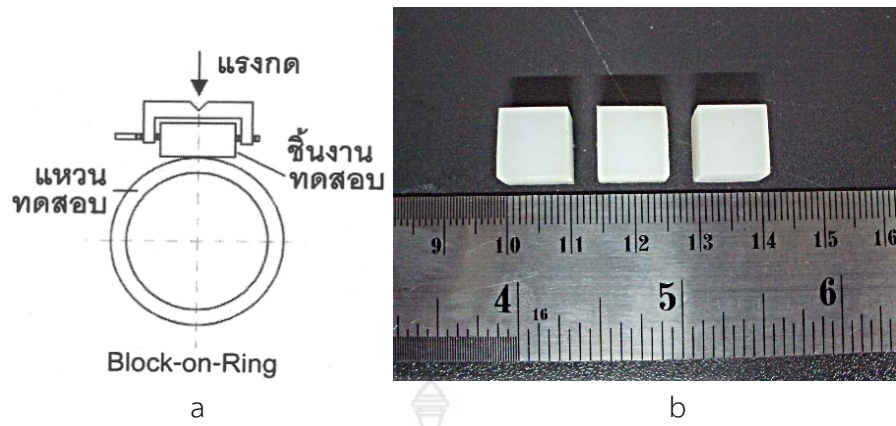


รูปที่ 2.18 เครื่องทดสอบการสึกหรอ (Ball on disk tribometer)

การดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ดำเนินการในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบด้วยเครื่อง Ball on disk tribometer (TRIBO technic, France) ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G99-95a and DIN 50324 โดยทำการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่นด้วยลูกบอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm แรงกดลูกบอล 5 N และ ความเร็วของการเสียดสี 0.3 m/sec

#### การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบดังลักษณะไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 2.19a โดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.19b วงแหวนที่ใช้ในการทดสอบทำจากเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน  $0.2 \mu\text{m}$  ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ของห้องปฏิบัติการโทรโบลีอุตสาหกรรมการผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.20 โดยสภาวะของการทดสอบเป็นการทดสอบแบบแห้งปราศจากสารหล่อลื่น กำหนดความเร็วของการเสียดทาน 0.3 m/sec แรงกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N และทำการทดสอบด้วยระยะเวลา 180 นาที วิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบจากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg และนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดชิ้นทดสอบและระยะทางของการทดสอบ (Wear rate =  $\frac{V_{\text{loss}}}{Nm}$ )



รูปที่ 2.19 a) ไดอะแกรมเครื่องทดสอบการสึกหรอ b) ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบการสึกหรอ



รูปที่ 2.20 a) เครื่องทดสอบการสึกหรอ b) การจับยึดชิ้นทดสอบขณะทำการทดสอบการสึกหรอ

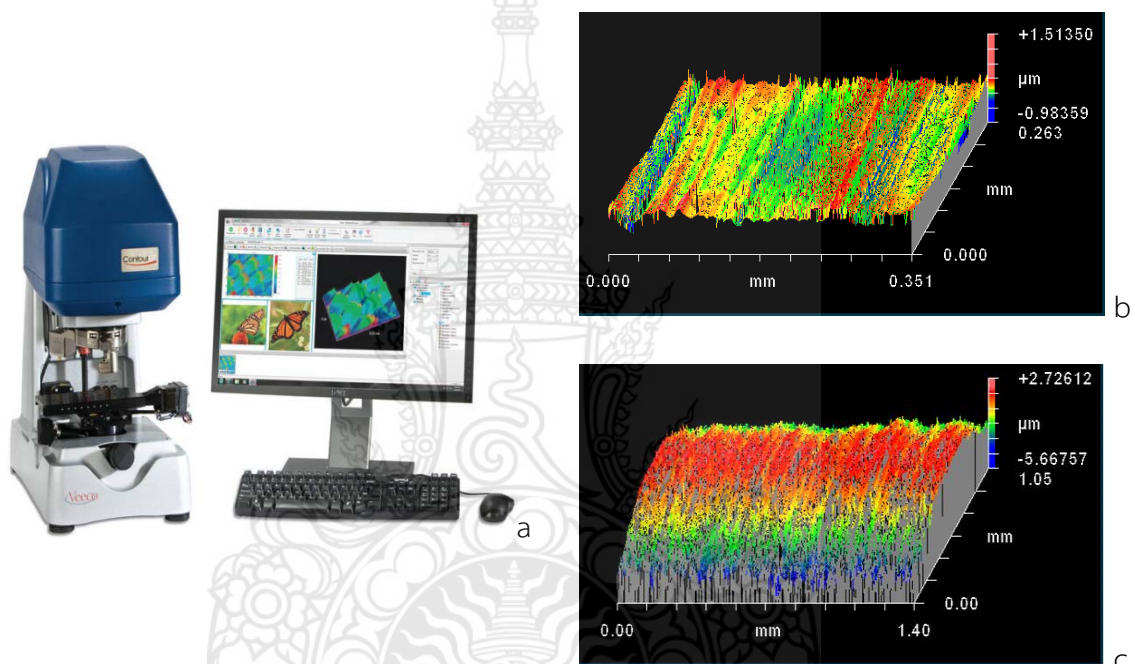


รูปที่ 2.20 เครื่องชั่งน้ำหนัก AND รุ่น HR-200 ความละเอียด 0.1 mg สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ



### การทดสอบความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอ

ความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ เป็นข้อมูลผลการทดสอบที่จำเป็นสำหรับใช้ประกอบการอธิบายพฤติกรรมการสึกหรอและอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ ซึ่งในการดำเนินการโครงการนี้ คณะผู้วิจัยจะทำการวัดด้วยเครื่อง 3D Optical Surface profilometer (Veeco Instruments Inc, New York, USA) สถาบันมาตรวิทยา โดยเครื่องวัดดังกล่าวนี้ มีประโยชน์สำหรับการวัดค่าความหยาบพื้นผิว แสดงลักษณะภูมิศาสตร์พื้นผิวและรายละเอียดลักษณะของพื้นผิวการสึกของชิ้นทดสอบ หลังจากการทดสอบการสึกหรอ รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะของเครื่อง 3D Optical Surface profilometer และรายละเอียดลักษณะของพื้นผิวการสึกของชิ้นทดสอบและลูกกลิ้งคู่สัมผัส



รูปที่ 2.20 a) ลักษณะของเครื่อง 3D Optical Surface profilometer b) รายละเอียดลักษณะของพื้นผิวการสึกของชิ้นทดสอบ และ c) รายละเอียดลักษณะของพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัส

### 2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเช่น เฟือง รอกลิ้น หรือชิ้นส่วนที่ผลิตมาจากโลหะนั้นย่อมเกิดการสึกหรอและผุกร่อนได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะ การเสียดสีที่รุนแรง การเกิดความเป็นกรดเป็นด่าง การหล่อลื่นและอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับความสึกหรอของ UHMWPE composite และ UHMWPE บริสุทธิ์ ภายใต้สภาวะที่กล่าวมา ซึ่งก่อนที่จะปรับปรุงสมบัติต่างๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับความสึกหรอของพอลิเอทิลีนเชิงประกอบ (UHMWPE composite) อยู่บ้าง และยังไม่มีการศึกษาและวิจัยที่เกี่ยวกับความสึกหรอของ UHMWPE ที่ผสมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านการสึกหรอที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

(25-100°C) และสารหล่อลื่น (เบอร์ SAE 40 SAE 20W50, น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ เกรด SJ - SM / CH4 - CI4, น้ำมันเกียร์ API GL-1, SAE 90, 140, จาระบี) คณะผู้วิจัยพบว่าไม่มีรายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคเปิดเผยออกมามากนัก ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าทางวิชาการส่วนใหญ่จะเป็นรายละเอียดเกี่ยวกับอัตราการสึกหรอของพอลิเมอร์วิศวกรรมชนิดต่างๆ ซึ่งคณะผู้วิจัยได้สรุป เปรียบเทียบ และเพื่อความสะดวกในการเข้าใจจึงได้แสดงรายละเอียดผลการสืบค้นข้อมูลไว้ในตารางที่ 2 โดยแบ่งออกตามประเภทของวัสดุโครงสร้างพื้นฐาน วัสดุเสริมแรง ขนาดอนุภาคของวัสดุเสริมแรง ปริมาณการผสมวัสดุเสริมแรงที่เหมาะสม อัตราการสึกหรอ สภาวะต่างๆ ของการทดสอบการสึกหรอ (เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ชนิดของวัสดุผิวคู่สัมผัส แรงกดขึ้นทดสอบ และความเร็วของการลื่นไถลของการทดสอบ)

จากตารางที่ 2.2 วัสดุที่ได้ถูกนำมาวิจัยเป็นจำนวนมากได้แก่ PTFE, Epoxy, PEEK, PPS มีรายงานที่เกี่ยวกับ UHMWPE composite อยู่ไม่น้อยมาก เช่น UHMWPE ที่ผสม Carbon nanotubes (CNT) [58] ด้วยขนาด 10-50 นาโนเมตร ซึ่งทดสอบความสึกหรอด้วยเครื่อง Ball on disk tribometer, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ball, 5 N, 0.3 m/s พบว่ามีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าในกรณีที่ไม่เติม Carbon nanotubes ถึง 94.3% ซึ่งเป็นผลที่ดีมาก แต่ก็ยังเป็นผลจากการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะที่คณะผู้วิจัยต้องการศึกษา และยังไม่สอดคล้องกับความต้องการในภาคอุตสาหกรรมอย่างเพียงพอ การใช้สารเติมแต่ง Carbon nanotubes มีข้อด้อยตรงที่ Carbon nanotubes มีราคาสูง ยิ่งขนาดเล็กลงมากเท่าไรก็ยิ่งมีราคาสูงเท่านั้น หากสามารถเปลี่ยนไปใช้สารเติมแต่งอื่นที่ให้ผลการสึกหรอใกล้เคียงหรือดีกว่าการใช้ Carbon nanotubes ในขณะที่ราคาต่ำกว่าย่อมส่งผลดีในเชิงพาณิชย์



ตารางที่ 2.2 สรุปสมบัติทางด้านโทรโบลยีของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ

Serial Number	Matrix	Filler material	Size of filler material (nm)	Optimum filler content		Coefficient of friction			Specific wear rate ( $10^{-6}$ mm <sup>3</sup> /Nm)			Equipment used, Counterface material, Load/pressure used, Sliding velocity, Remark (if any)	Ref.
				With lowest COF	With lowest wear	Without Filler	With Filler	Change (%)	Without Filler	With Filler	Change (%)		
1	PTFE	ZnO	50	15 wt%	15 wt%	0.202	0.209	+3.4	1125.3	13	-98.8	Block-on-ring tribometer, stainless steel, 200 N, 0.431 m/s	[5]
2	PTFE	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40	20 wt%	20 wt%	0.125	0.219	+44.1	715	1.2	-99.8	Reciprocating tribometer, stainless steel, 260 N, 50 mm/s	[6]
3	PTFE	CNT	20-30	30 vol.%	20 vol.%	0.2	0.17	-15.0	800	2-3	-99.6	Block-on-ring tribometer, stainless steel, 200 N	[7]
4	PTFE	Nano-attapulgit	10-25	5 wt%	5 wt%	0.22	0.2	-9.1	625.8	31.2	-95	Block-on-ring tribometer, steel, 200 N, 0.42 m/s	[8]
	PTFE	2M acid treated Attapulgit	10-25	5 wt%	5 wt%	0.22	0.2	-9.1	625.8	49	-99.2	Block-on-ring tribometer, steel, nano-attapulgit was treated with hydrochloric acid	[8]
5	Epoxy	TiO <sub>2</sub>	10	7 wt%	3 wt%	0.5	0.4	-25.9	26×10 <sup>3</sup>	1.6×10 <sup>3</sup>	-93.7	Pin-on-ring tribometer, carbon steel, 1 MPa.0.4 m/s	[9]
6	Epoxy	TiO <sub>2</sub>	300	-	4 vol.%	-	-	-25.9	40	14	-65	Pin-on-ring tribometer, carbon steel, 1 MPa.1 m/s	[10]
7	Epoxy	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13	-	2 vol.%	-	-	-25.9	5.9	3.9	-33.9	Pin-on-ring tribometer, carbon steel, 1 MPa.0.4 m/s	[11]
8	Epoxy	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	<20 nm	0.8 vol.%	0.8 vol.%	0.57	0.38	-33.3	38	2	-94.7	Pin-on-ring tribometer, carbon steel, 3 MPa.0.4 m/s	[12]
9	Epoxy	SiO <sub>2</sub>	9	2.2 vol.%	2.2 vol.%	0.58	0.45	-22.4	200	45	-77.5	Pin-on-ring tribometer, carbon steel, 3 MPa.0.4 m/s	[13,14]
	Epoxy	SiO <sub>2</sub> -g-PAAM	9	2.2 vol.%	2.2 vol.%	0.58	0.35	-39.7	200	11	-94.5	Pin-on-ring tribometer, carbon steel, SiO <sub>2</sub> nano-particle were modified with PAAM	[13,14]
10	Epoxy	MWCNT-untreated	10-30	-	-	-	-	-	9	12.5	+38.8	Ball-on-prism tribometer, 30N, 28.2 mm/s, mixed with four-blade stirrer	[15]
	Epoxy	MWCNT-untreated	10-30	-	1 wt%	-	-	-	9	4.5	-50	Ball-on-prism tribometer, CNTs were treated with nitric acid	[15]
	Epoxy	MWCNT-untreated	10-30	-	1 wt%	-	-	-	31	3	-90.3	Ball-on-prism tribometer, mixed using speed mixer, CNTs were treated with nitric acid	[15]

ตารางที่ 2.2 สรุปสมบัติทางด้านโทรโพลีของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ (ต่อ)

Serial Number	Matrix	Filler material	Size of filler material (nm)	Optimum filler content		Coefficient of friction			Specific wear rate ( $10^{-6}$ mm <sup>3</sup> /Nm)			Equipment used, Counterface material, Load/pressure used, Sliding velocity, Remark (if any)	Ref.
				With lowest COF	With lowest wear	Without Filler	With Filler	Change (%)	Without Filler	With Filler	Change (%)		
11	Epoxy	SiC	61	-	-	0.6	0.44	-26.7	290	6	-98	Pin-on-ring tribometer, 3 MPa. 0.4 m/s	[43]
	Epoxy	SiC-g-PGMA	61	-	-	0.6	0.44	-31.7	290	2.9	-99	Pin-on-ring tribometer, dry mixing and SiC nano-particle were modified with PGMA	[43]
	Epoxy	SiC-g-PGMA	61	-	-	0.6	0.39	-35	290	0.8	-99.7	Pin-on-ring tribometer, wet mixing and SiC nano-particle were modified with PGMA	[43]
12	Epoxy	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.8	1.6 wt%	1 wt%	1.1	1	-9.1	25	8	-68	Block-on-ring tribometer, carbon steel, 1 MPa, 1 m/s	[44]
	Epoxy	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -g- PAAM	3.8	0.8 wt%	0.3 wt%	1.1	0.78	-29.1	25	0.18	-99.3	Block-on-ring tribometer, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nano-particle were modified with PAAM	[44]
	Epoxy	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -c- PAAM	3.8	0.9 wt%	0.3 wt%	1.1	0.68	-38.2	25	0.18	-99.3	Block-on-ring tribometer, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nano-particle were modified with PAAM	[44]
13	Epoxy	SiC	62.2	1.9 wt%	0.3 wt%	1.1	0.9	-18.2	25	8.5	-66	Block-on-ring tribometer, carbon steel, 1 MPa, 1 m/s	[44]
	Epoxy	SiC-g- PAAM	62.2	1.8 wt%	0.3 wt%	1.1	0.62	-43.6	25	0.15	-99.4	Block-on-ring tribometer, SiC nano-particle were modified with PAAM	[44]
	Epoxy	SiC-C-PAAM	92.2	1.8 wt%	0.3 wt%	1.1	0.72	-34.5	25	0.15	-99.4	Block-on-ring tribometer, SiC nano-particle were modified with PAAM	[44]
14	Epoxy	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	16.8	1.7 wt%	0.3 wt%	1.1	0.95	-13.6	25	4.5	-82	Block-on-ring tribometer, carbon steel, 1 MPa, 1 m/s	[44]
	Epoxy	KH550 treated Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	16.8	1.0 wt%	0.3 wt%	1.1	0.8	-27.3	25	4.5	-82	Block-on-ring tribometer, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> nano-particle were modified with aminopropyltrimethoxysilane	[44]
15	PEEK	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	<50	7.5 wt%	7.5 wt%	0.38	0.25	-34.2	7	1.3	-81.4	Block-on-ring tribometer, plain carbon steel, 196 N, 0.445 m/s	[45]
16	PEEK	ZrO <sub>3</sub>	10	7.5 wt%	7.5 wt%	0.38	0.29	-23.7	7.5	3.9	-48	Block-on-ring tribometer, plain carbon steel, 196 N, 0.445 m/s	[46, 47]



ตารางที่ 2.2 สรุปสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ (ต่อ)

Serial Number	Matrix	Filler material	Size of filler material (nm)	Optimum filler content		Coefficient of friction			Specific wear rate ( $10^{-6}$ mm <sup>3</sup> /Nm)			Equipment used, Counterface material, Load/pressure used, Sliding velocity, Remark (if any)	Ref.
				With lowest COF	With lowest wear	Without Filler	With Filler	Change (%)	Without Filler	With Filler	Change (%)		
17	PEEK	SiO <sub>2</sub>	<100	7.5 wt%	7.5 wt%	0.37	0.21	-43.2	7.5	1.4	-81.3	Block-on-ring tribometer, plain carbon steel, 196 N, 0.445 m/s	[48]
18	PEEK	SiC	<100	20 wt%	10 wt%	0.38	0.2	-47.4	7.5	3.4	-54.7	Block-on-ring tribometer, plain carbon steel, 196 N, 0.445 m/s	[49, 50]
19	PEEK	CNF	150	-	10 wt%	-	-	-	2-3	0.1-0.2	-94	Ball-on-prism tribometer, steel, 21.2 N, 28.2 mm/s	[51]
20	PEEK	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	5 wt%	5 wt%	0.32	0.35	+9.4	13	3.5	-73.1	Block-on-ring tribometer, medium carbon steel, 196 N, 0.42 m/s	[52]
21	Polyester	Nano-clay platelets	-	3 wt%	3 wt%	0.52	0.35	-32.6	$8 \times 10^2$	$1 \times 10^2$	-87.5	Pin-on-dick tribometer, tool steel, 0.4 MPa, 0.3 m/s	[53]
22	PET	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38	2 wt%	2 wt%	0.32	0.3	-6.3	17.4	9.5	-45.4	Reciprocating tribometer, steel, 340 N, 25 mm/s. The crystallinity of PET also effects the wear coefficient	[54]
23	PS	MWCNT	10-20	1.5 wt%	1.5 wt%	0.42	0.31	-26.2	130	8	-93.8	Block-on-ring tribometer, plain carbon steel, 50 N, 0.431 m/s	[55]
24	PPESK	TiO <sub>2</sub>	40	1 vol.%	1.75 vol.%	0.55	0.43	-21.8	80.12	4.86	-93.9	Block-on-ring tribometer, mild carbon steel, 200 N, 0.431 m/s	[56]
25	BMI	SiC	<100	8 wt%	6 wt%	0.36	0.24	-33.3	6.8	2.2	-67.6	Block-on-ring tribometer, carbon steel, 196 N, 0.42 m/s	[57]
26	UHMWPE	CNT	10-50	0.5 wt%	0.5 wt%	0.05	0.11	+120	0.35 mg	0.02 mg	-94.3	Ball-on-disk tribometer, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ball, 5 N, 0.3 m/s	[58]
27	PPS	CuO	30-50	10 vol.%	2 vol.%	0.43	0.34	-20.9	0.324 mm <sup>3</sup> /km	0.078 mm <sup>3</sup> /km	-78.4	Pin-on-disk tribometer, hardened tool steel, 0.65 MPa, 1 m/s	[59]
28	PPS	TiO <sub>2</sub>	30-50	1 vol.%	2 vol.%	0.43	0.35	-18.6	0.324 mm <sup>3</sup> /km	0.162 mm <sup>3</sup> /km	-50.6	Pin-on-disk tribometer, hardened tool steel, 0.65 MPa, 1 m/s	[59]
29	PPS	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33	10 vol.%	2 vol.%	0.455	0.415	-8.8	0.46 mm <sup>3</sup> /km	0.3 mm <sup>3</sup> /km	-34.8	Pin-on-disk tribometer, hardened tool steel, 0.65 MPa, 1 m/s	[60]
30	PI	CNT	10-50	>5 wt%	>10 wt%	0.38	0.28-0.3	-21.1	4.4 mm <sup>3</sup> /km	2.5 mm <sup>3</sup> /km	-43.2	Ball-on-ring tribometer, plain carbon steel, 290 N, 0.431 m/s	[61]

## บทที่ 3

### รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย

การดำเนินการศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปวัสดุ UHMWPE บริสุทธิ์ ด้วยกรรมวิธี Hot compression molding process ที่ให้ค่าสมบัติทางกลสูงสุด (ค่าความเค้นคราก) และสมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงสุด (วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอที่ต่ำที่สุด) เปรียบเทียบกับขึ้นทสอบวัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ หลังจากได้ข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูป จึงดำเนินการอัดขึ้นรูปวัสดุ UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ที่เป็นอนุภาคออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ขนาดอนุภาค 0.05  $\mu m$  (50 nm) 0.3  $\mu m$  (300 nm) 0.5  $\mu m$  (500 nm) 1  $\mu m$  (1000 nm) 5  $\mu m$  และ 10  $\mu m$  เพื่อหาปริมาณการผสม  $Al_2O_3$  ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE composite ซึ่งโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่น โดยอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ประกอบด้วย อุณหภูมิห้อง 25°C 50°C และ 75°C สำหรับในส่วนของสารหล่อลื่นที่ทำการทดสอบ ประกอบด้วยสารหล่อลื่น เบอร์ SAE 40 SAE 20W50, น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ เกรด SJ - SM / CH4 - CI4, น้ำมันเกียร์ API GL-1, SAE 90, 140, และจาระบี)

สำหรับในส่วนของขั้นตอนการดำเนินงานประกอบด้วย การขึ้นรูปขึ้นทสอบที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ การเตรียมขึ้นทสอบสำหรับการศึกษาวิเคราะห์และทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมี ปริมาณความเป็นผลึก โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล สมบัติความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานจะได้อธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัย

1. วัสดุ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งผู้จำหน่ายภายในประเทศไม่มีข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับสมบัติต่างๆ ที่บ่งชี้ถึงขนาดโมเลกุล แต่จะบอกคร่าวๆ ว่าเป็น UHMWPE หรือเรียกกันโดยทั่วไปในตลาดว่า PE1000

2. วัสดุ UHMWPE ที่ใช้ในการทดลองศึกษาวิจัยนี้เป็นผง UHMWPE เกรด SLL-6-6020 ที่มีมวลโมเลกุล (Molecular weight) เท่ากับ  $6.5 \times 10^6$  g/mol และขนาดอนุภาคเท่ากับ 80-100  $\mu m$  ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Corporation Limited ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีลักษณะและรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.  $Al_2O_3$  ขนาดอนุภาคต่างๆ ประกอบด้วย

- 0.05  $\mu m$  (50 nm) เป็น Gamma B Alumina ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Leco จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

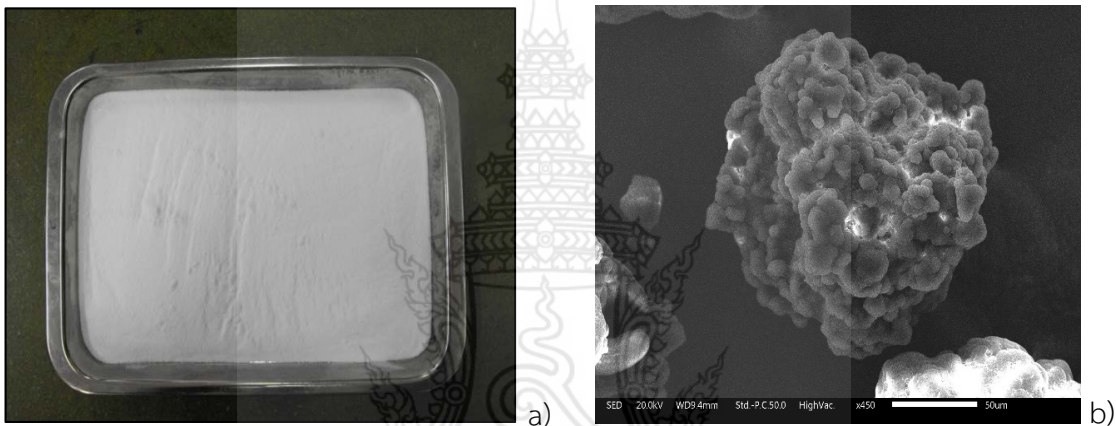
- 0.3  $\mu\text{m}$  (300 nm) เป็น Alpha A Alumina ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Leco จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 0.5  $\mu\text{m}$  (500 nm) เป็น Alpha A Alumina ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Leco จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

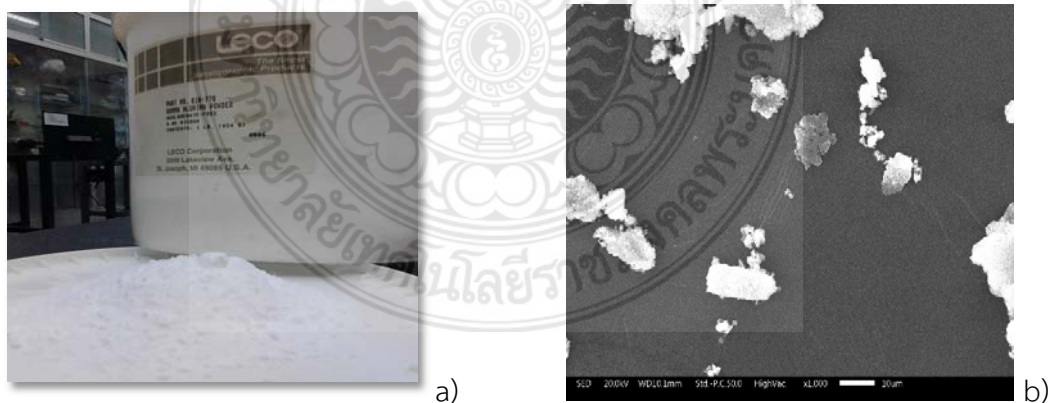
- 1  $\mu\text{m}$  (1000 nm) เป็น Alpha C Alumina ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Leco จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 5  $\mu\text{m}$  เป็น Levigated Alumina ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Leco จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา

- 10  $\mu\text{m}$  เป็น Levigated Alumina ผลิตภัณฑ์ของบริษัท Leco จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.1 a) ผง UHMWPE b) ลักษณะรูปร่างของผง UHMWPE จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 a) ผลิตภัณฑ์ผง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  b) ลักษณะรูปร่างของผง  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ขนาดอนุภาค 0.05  $\mu\text{m}$  (50 nm) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate particle)

### 3.2 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมผง UHMWPE และผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ชนิดต่างๆ ประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.1 g (ยี่ห้อ AND รุ่น EK-1200i) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg (ยี่ห้อ AND รุ่น HR200) และเตาอบลมร้อน (ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L)

2. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ ประกอบด้วย แม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูป และเครื่อง Compression press

3. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการเตรียมขึ้นทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับตัดแต่งขึ้นทดสอบได้ขนาดตามที่ต้องการ ได้แก่ เลื่อยสายพาน เครื่องกัด และกระดาษทรายสำหรับขัดเตรียมขึ้นทดสอบ

4. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งประกอบด้วย เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง และเครื่องทดสอบความแข็ง Shore D

5. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านโพรโบลยี ซึ่งประกอบด้วย เครื่องทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีการ Block on ring ที่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุคู่สัมผัสได้ในระหว่างที่ทำการทดสอบการสึกหรอ ชุดกล้องถ่ายภาพรอยสึกหรอ และเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1 mg

6. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย เครื่อง FT-IR spectroscopy เครื่อง Differential Scanning Calorimeter กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscopy) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

### 3.3 การเตรียมวัสดุผง UHMWPE และ UHMWPE ผสมอนุภาค $Al_2O_3$ ขนาดต่างๆ สำหรับการขึ้นรูป

การเตรียมผง UHMWPE และ UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ขนาดต่างๆ มีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดความชื้นออกจากผง UHMWPE และ UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ก่อนที่จะนำไปทำการอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression press ซึ่งขั้นตอนการเตรียมนี้ ดำเนินการโดยการนำผงไปทำการอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}C$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.3 หลังจากนั้นจึงนำผง UHMWPE และ UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ใส่เข้าไปในแม่พิมพ์และเครื่อง Compression press เพื่อทำการอัดขึ้นรูปในทันที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกับความชื้นในบรรยากาศที่ทำให้ผง UHMWPE และ UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  เกิดความชื้น

สำหรับในส่วนของการเตรียมผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ก่อนที่จะนำเข้าสู่ตู้อบลมร้อน จะต้องทำการผสม UHMWPE กับฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  โดยเริ่มจากการการนำฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$

ไปทำให้เกิดการกระจายตัว (De-agglomerate) ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อป้องกันและแยกฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ไม่ให้จับตัวเป็นกลุ่มก้อน โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการกระจายตัว ดังลักษณะการทำให้เกิดการกระจายที่แสดงในรูปที่ 3.4 หลังจากนั้นจึงทำการปั่นผสมฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ร่วมกับ UHMWPE ด้วยเครื่อง High speed homogenizer ด้วยความเร็วรอบ 32,000 รอบต่อนาที เป็น เวลา 10 นาที ดังลักษณะการปั่นผสมที่แสดงในรูปที่ 3.5 โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์เป็นตัวกลางช่วยในการปั่นผสม เนื่องจากผง UHMWPE มีค่าความหนาแน่นสูงกว่า เมทิลแอลกอฮอล์ส่งผลให้ UHMWPE สามารถจมลงในเมทิลแอลกอฮอล์ได้ และนอกจากนี้ เมทิลแอลกอฮอล์ยังสามารถกำจัดออกได้ง่ายจากกระเหยออกได้ตามธรรมชาติ

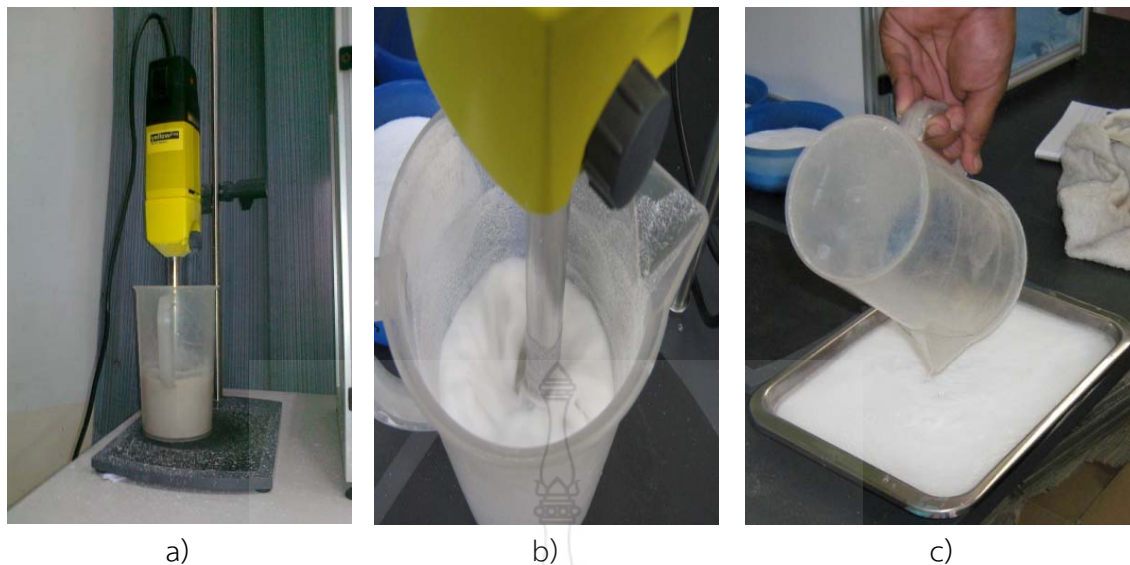


รูปที่ 3.3 a) ตู้อบลมร้อนและการอบผง UHMWPE b) UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.4 a) เครื่อง Ultrasonic disperser b) การทำให้เกิดการกระจายตัวของฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$





รูปที่ 3.5 เครื่อง High speed homogenizer และการปั่นผสม UHMWPE กับฟิลเลอร์

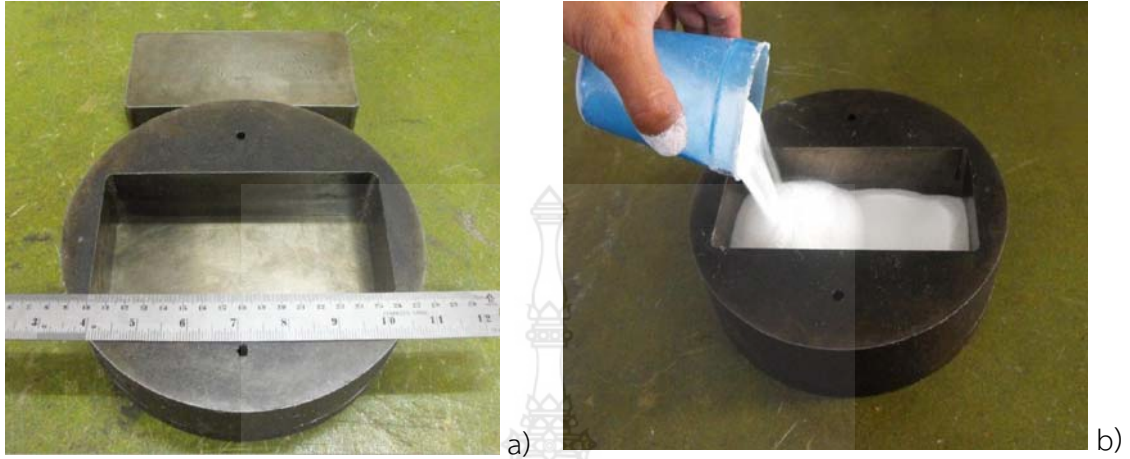
รายละเอียดขั้นตอนการเตรียมผง UHMWPE สำหรับการอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดลองนี้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ชั่งตวงน้ำหนักฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ตามปริมาณการผสมที่กำหนด
2. ชั่งตวงน้ำหนักผง UHMWPE
3. ละลายฟิลเลอร์ในเมทิลแอลกอฮอล์ ด้วยอัตราส่วนฟิลเลอร์ 10 g ต่อเมทิลแอลกอฮอล์ 50 ml
4. นำผงฟิลเลอร์ที่ละลายในเมทิลแอลกอฮอล์ไปทำให้เกิดการกระจายสลายตัวและละลายในเมทิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser เป็นเวลา 10 นาที ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.4b)
5. เทผงฟิลเลอร์อนุภาค  $Al_2O_3$  ที่ละลายในเมทิลแอลกอฮอล์ผสมกับผง UHMWPE ตามอัตราส่วนที่กำหนด เติมเมทิลแอลกอฮอล์ 500 ml แล้วปั่นผสมด้วยเครื่อง High speed homogenizer ด้วยความเร็วรอบ 32,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.5a) – 3.5b)
6. หลังจากการปั่นผสมเทผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ใส่ถาด แล้ววางทิ้งไว้ในบรรยากาศเพื่อให้เมทิลแอลกอฮอล์เกิดการระเหยจนแห้งหมด ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.5c)
7. นำผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ เข้าตู้อบ เพื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}C$  ด้วยระยะเวลาของการอบ 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.3b)

### 3.4 การอัดขึ้นรูปชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสมอนุภาค $Al_2O_3$ ขนาดต่างๆ

ผง UHMWPE หลังจากผ่านการอบแห้งจะถูกนำไปทำการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด  $160 \times 80 \times 50$  มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ด้วยเครื่อง Compression press ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.7 ของห้องปฏิบัติการวัสดุโพลีเมอร์คอมโพสิต หน่วยวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ

วิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และขึ้นทดสอบวัสดุ  
ก้อน UHMWPE ที่ได้จากการอัดขึ้นรูป มีความหนาประมาณ 10 มม. ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 a) แม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ b) ผง UHMWPE ที่เทเข้าไปในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป



รูปที่ 3.7 เครื่องอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ



รูปที่ 3.8 ลักษณะของขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ได้จากการอัดขึ้นรูป



### 3.5 การศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี

การศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของพอลิเมอร์เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจพิสูจน์เกี่ยวกับโมเลกุลของสารด้วยเครื่อง FT-IR spectroscopy ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็งของเหลว และก๊าซ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดในช่วงประมาณ 12800 ถึง  $10\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งความยาวคลื่น (wave number) สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วง Far IR ( $200$  ถึง  $10\text{ cm}^{-1}$ ) Mid IR ( $4000$  ถึง  $200\text{ cm}^{-1}$ ) และ Near IR ( $12800$  ถึง  $4000\text{ cm}^{-1}$ )

FT-IR spectroscopy ย่อมาจาก Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เป็นเทคนิคการกระตุ่นสารด้วยพลังงานแสงช่วงแสงอินฟราเรด (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังที่กล่าวถึงข้างต้น ซึ่งเป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันคร่าวๆ ในสารที่ไม่ทราบว่าเป็นสารอะไร เช่น สารที่วิเคราะห์นี้อาจจะมี หมู่ hydroxyl (-OH) methyl (-CH<sub>3</sub>) หรือ carbonyl (-CO) แต่ถ้าจะใช้เทคนิคนี้ในการระบุว่าเป็สารชนิดใดนั้น จะต้องนำผลที่ได้ ซึ่งเป็นสเปกตรัม (spectrum) ของสารนั้นไปเทียบกับสเปกตรัมของสารที่ทราบอยู่แล้ว (Reference) ถ้ามีสเปกตรัมเหมือนกันก็จะเป็นสารชนิดเดียวกันที่เปรียบเสมือนลักษณะการเปรียบเทียบลายนิ้วมือ

การดำเนินการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของชิ้นทดสอบ UHMWPE ที่ดำเนินการในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยส่งตัวอย่างชิ้นทดสอบไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR spectroscopy ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ที่สาขาวิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น และที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 3.6 การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

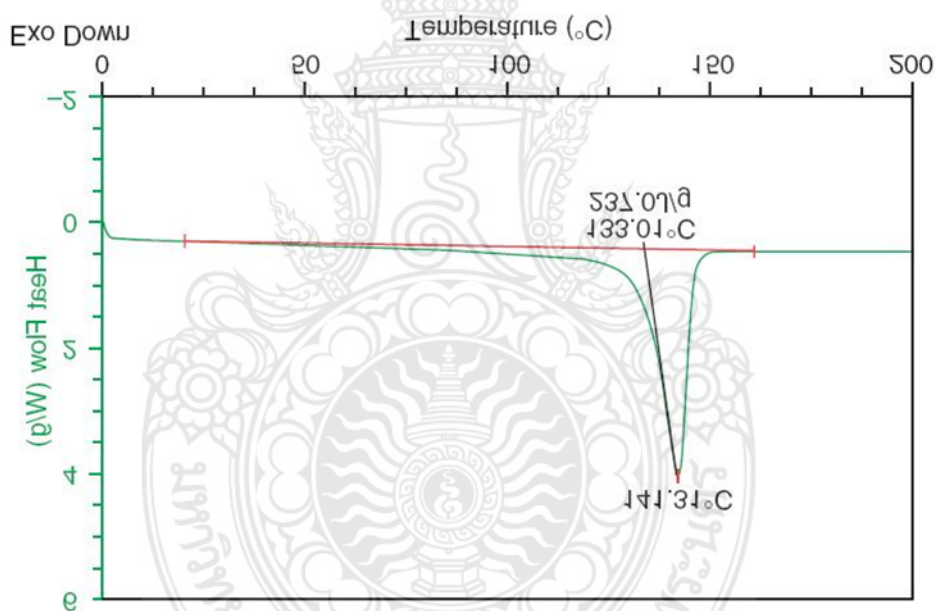
#### 3.6.1 การศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก

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

ในการวิเคราะห์ชิ้นงานหรือสารตัวอย่าง สารตัวอย่างจะถูกวางบนถาดอลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิง ซึ่งเป็นถาดอลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับสารตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน

ตัวอย่างเทคนิคการทดสอบพื้นฐานทั่วไปสำหรับ UHMWPE ซึ่งประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางความร้อน, จุดหลอมละลายและร้อยละของปริมาณความเป็นผลึก ตามที่ได้กล่าวถึงไปแล้วอย่างคร่าวๆ เกี่ยวกับการเปลี่ยนสถานะเป็นแก้ว (glass transition) ของ UHMWPE จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ

ประมาณ  $-160^{\circ}\text{C}$  และนักวิจัยส่วนใหญ่มักจะไมทำการทดสอบสมบัตินี้ ในการทดสอบ UHMWPE น้ำหนักของชิ้นทดสอบต่ำสุดมีค่าประมาณ 5–10 mg โดยชิ้นทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูง (ประมาณ 0.1 mg) หลังจากนั้นชิ้นทดสอบจะถูกปิดผนึกไว้ในภาตสำหรับวางชิ้นงานที่เป็นอลูมิเนียม ซึ่งภาตสำหรับวางชิ้นงานจะวางคู่กับภาตเปล่า โดยที่ภาตทั้งสองจะมีขดลวดให้ความร้อน ในการให้ความร้อนนั้นโดยปกติจะให้ความร้อนในอัตรา  $10^{\circ}\text{C}/\text{minute}$  จากช่วงอุณหภูมิ  $0\text{--}200^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ให้ความร้อน อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนจะแสดงที่จอภาพของเครื่อง DSC ซึ่งตัวอย่าง DSC trace ของชิ้นทดสอบ UHMWPE- GUR 1050 powder มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.9 ที่แสดงให้เห็นปฏิกิริยาการดูดซับพลังงานความร้อนขณะหลอมละลายที่อุณหภูมิ  $141^{\circ}\text{C}$  ปฏิกิริยาการดูดซับพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมของอุณหภูมิจากในช่วง  $20\text{--}160^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta H_{\text{endotherm}}$ ) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิการหลอมละลายของ UHMWPE บริสุทธิ์ ( $\Delta H_f = 291 \text{ J/g}$ ) หลังจากนั้นจึงทำการคำนวณหาร้อยละของปริมาณความเป็นผลึก ซึ่งค่าที่ได้คือ  $\chi = 81\%$ . ตามสมการ



รูปที่ 3.9 DSC กราฟของวัสดุ UHMWPE- GUR 1050 powder (first heat) [1]

ปริมาณความเป็นผลึกของชิ้นทดสอบขึ้นอยู่กับพลังงานของปฏิกิริยาการดูดซับความร้อนในการหลอม (Melting endothermic) และพลังงานในการการหลอมละลาย UHMWPE บริสุทธิ์ ที่มีค่าเท่ากับ  $291 \text{ J/g}$ , ดังนั้น ร้อยละของปริมาณความเป็นผลึกที่ได้จึงมีค่าเท่ากับ 81% ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ  $20\text{--}160^{\circ}\text{C}$

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

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกของ UHMWPE ที่ดำเนินการในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยส่งตัวอย่างชิ้นทดสอบไปทำการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetric ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 3.6.2 การศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบเป็นการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ได้จากการอัดขึ้นรูป เพื่อวิเคราะห์สภาวะของการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างจุลภาค ซึ่งลักษณะของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบมีผลต่อสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก่อน UHMWPE

การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ดำเนินการในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยส่งตัวอย่างชิ้นทดสอบไปทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) กำลังขยายสูง ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่

3.10



รูปที่ 3.10 a) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 b) การเคลือบทองคำลงบนพื้นผิวชิ้นทดสอบเพื่อเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM

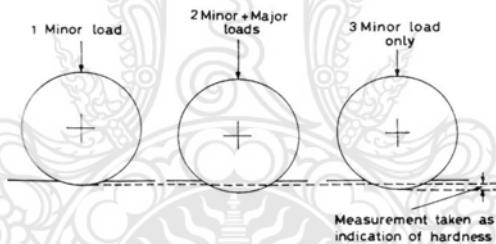
### 3.7 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกล

#### 3.7.1 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง (Hardness) ในที่นี้หมายถึงการต้านทานการเปลี่ยนรูป (deformation) ของวัสดุ ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบจะไม่ใช้ค่าสัมบูรณ์แต่จะเป็นค่าในเชิงเปรียบเทียบ (relative term)

การทดสอบความแข็งสำหรับพอลิเมอร์ ที่นิยมทำการทดสอบโดยทั่วไป สามารถทำการทดสอบได้ 2 วิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ (ตารางที่ 3.1) กล่าวคือ การทดสอบแบบ Rockwell จะใช้กับพอลิเมอร์หรือพลาสติกที่มีลักษณะแข็งหรือมีความแข็งสูง เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมธิลเมทาคริเลต และไนลอน เป็นต้น ในขณะที่การทดสอบแบบ Durometer จะใช้กับพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่า ตัวอย่างเช่น ยางชนิดต่างๆ รวมทั้งพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดที่เติมสารเพิ่มสภาพพลาสติก (plasticized PVC) และพอลิเอธิลีน

**หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell** คือ การวัดความลึกของลูกบอลเหล็กกล้าที่ใช้เป็นตัวกดวัด (indenter) โดยในการทดสอบ จะมี 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.11 โดยเริ่มจากการวางน้ำหนักกรอง (minor load) ประมาณ 10 กิโลกรัม ลงบนลูกบอลเหล็กกล้าเพื่อให้เกิดแรงกดลงสัมผัสกับผิวชิ้นงานทดสอบ จากนั้นจึงทำการ set zero (ภายในเวลา 10 วินาที มิฉะนั้นค่าความแข็งอาจจะเปลี่ยนแปลง เนื่องจากความเป็น viscoelastic ของพอลิเมอร์)



รูปที่ 3.11 แสดงหลักการของวิธีการทดสอบความแข็งแบบ Rockwell

หลังจากนั้นจึงเพิ่มแรงหลัก (Major load) ให้กับลูกบอลเหล็กกล้าและทำการกดแช่เป็นเวลานาน 15 นาที เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการคืนตัว (recover) แล้วจึงอ่านค่าความแข็งจากสเกลของเครื่องวัด โดยจะมีหน่วยกำกับเป็นสัญลักษณ์ R, L, M, E อยู่ข้างหลังตัวเลข โดยขึ้นอยู่กับชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงที่ใช้กด ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1

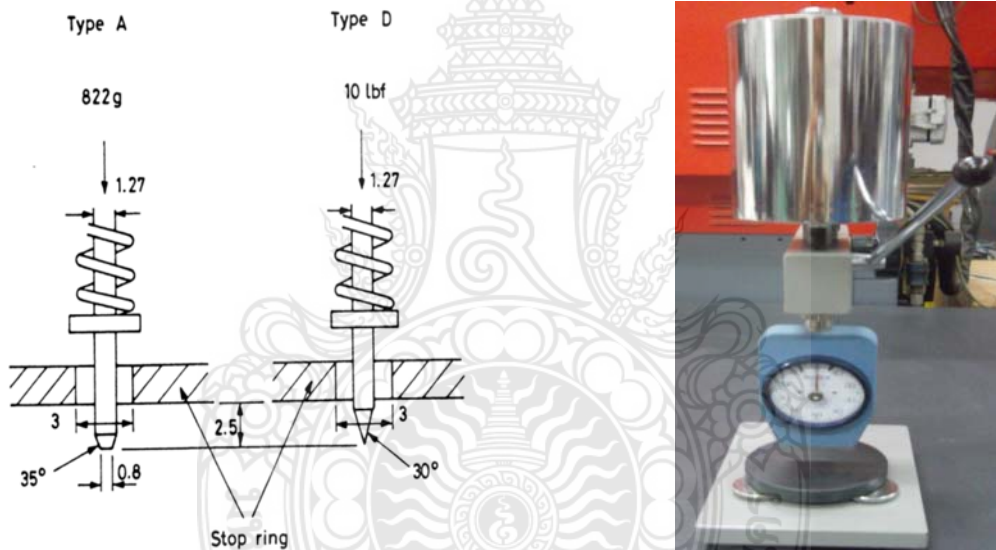
ตารางที่ 3.1 ชนิดของลูกบอลเหล็กกล้าและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบค่าความแข็งแบบต่างๆ

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

สเกล R และ L จะใช้สำหรับพลาสติกที่มีค่าความแข็งต่ำ สำหรับในส่วนของสเกล M และ E จะใช้สำหรับพลาสติกที่มีความแข็งสูง โดยในแต่ละสเกลที่ใช้ในการทดสอบนั้น ถ้าหากตัวเลขที่อ่านได้จากหน้าปัดมีค่าเกิน 115 จะถือว่าความไว (sensitivity) ของการวัดนั้นสูญเสียไป และจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้สเกลทดสอบถัดไป

**หลักการพื้นฐานของการทดสอบความแข็งแบบ Durometer** การใช้ durometer วัดความแข็งพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการวางชิ้นงานบนผิวเรียบ กดเข็มหัววัดลงบนชิ้นงานจนกระทั่งสุดระยะของเข็มหัววัด (ถึงจุด stop ring) แล้วทำการอ่านค่าความแข็งจากหน้าปัดภายในระยะเวลาคงที่ (เช่นประมาณ 10 วินาที) ซึ่งตัวเลขที่อ่านค่าได้จาก durometer นี้จะไม่มีหน่วย

Durometer ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ Shore A และ แบบ Shore D ดังลักษณะของวิธีการที่แสดงในแผนภาพในรูปที่ 3.12 ซึ่งวิธีการทดสอบความแข็ง Durometer ทั้ง 2 แบบนี้จะแตกต่างกันในแง่ของรูปทรงและขนาดของหัวกด โดยทั่วไปแล้ว Shore A จะใช้กับวัสดุที่อ่อนกว่า ในขณะที่ Shore D จะใช้กับวัสดุที่แข็งกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะของหลักการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore A และ Shore D

รูปที่ 3.13 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D

สำหรับการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยเลือกการทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยแรงกดหรือน้ำหนักที่กดลงบนชิ้นทดสอบเท่ากับ 4550 กรัม การทดสอบทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13



### 3.7.2 การทดสอบความต้านแรงดึง

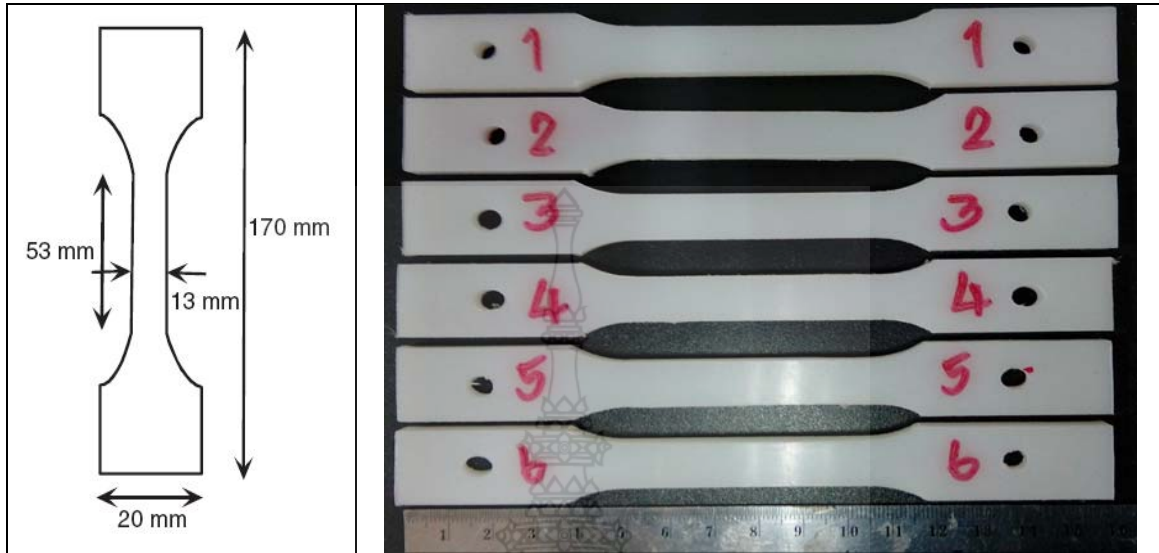
การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลที่ทำการศึกษานี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นคราก ความต้านแรงดึงสูงสุดและความยืดของชิ้นทดสอบ โดยทำการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงขนาด 10 kN ยี่ห้อ IE-Tension รุ่น IE-T5k ของห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.14



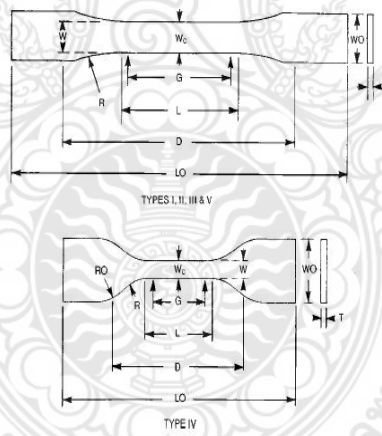
รูปที่ 3.14 a) เครื่องทดสอบแรงดึง b) การจับยึดชิ้นทดสอบและการดึงชิ้นทดสอบ c) ลักษณะการขาดของชิ้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึง

ลักษณะของชิ้นทดสอบที่เตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบแรงดึงมีลักษณะเป็นแผ่นแบน ความหนาไม่เกิน 7 mm. ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.15 โดยขนาดของชิ้นทดสอบอ้างอิงชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน

ASTM D 638 type I ซึ่งมีลักษณะกำหนดค่าพิกัดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ในการทดสอบแรงดึง กำหนดความเร็วในการดึงทดสอบเท่ากับ 50 mm/min



รูปที่ 3.15 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบแรงดึง



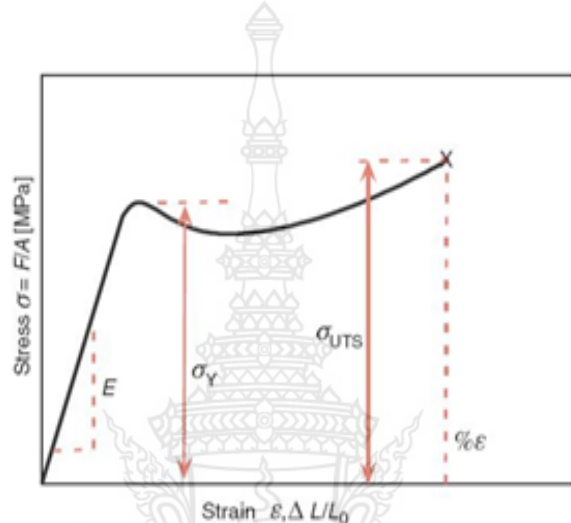
Specimen Dimensions for Thickness,  $T$ , mm [in.]<sup>a</sup>

Dimensions (see drawings)	7 [0.28] or under		Over 7 to 14 [0.28 to 0.55], incl		4 [0.16] or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>b</sup>	Type V <sup>c,d</sup>		
$W$ —Width of narrow section <sup>e,f</sup>	13 [0.50]	6 [0.25]	19 [0.75]	6 [0.25]	3.18 [0.125]	±0.5 [±0.02] <sup>g</sup>	
$L$ —Length of narrow section	57 [2.25]	57 [2.25]	57 [2.25]	33 [1.30]	9.53 [0.375]	±0.5 [±0.02] <sup>g</sup>	
$WO$ —Width overall, min <sup>g</sup>	19 [0.75]	19 [0.75]	29 [1.13]	19 [0.75]	...	+ 6.4 [ + 0.25]	
$WO$ —Width overall, min <sup>g</sup>	...	...	...	...	9.53 [0.375]	+ 3.18 [ + 0.125]	
$LO$ —Length overall, min <sup>h</sup>	165 [6.5]	183 [7.2]	246 [9.7]	115 [4.5]	63.5 [2.5]	no max [no max]	
$G$ —Gage length <sup>i</sup>	50 [2.00]	50 [2.00]	50 [2.00]	...	7.62 [0.300]	±0.25 [±0.010] <sup>g</sup>	
$G$ —Gage length <sup>i</sup>	...	...	...	25 [1.00]	...	±0.13 [±0.005]	
$D$ —Distance between grips	115 [4.5]	135 [5.3]	115 [4.5]	65 [2.5] <sup>2</sup>	25.4 [1.0]	±5 [±0.2]	
$R$ —Radius of fillet	76 [3.00]	76 [3.00]	76 [3.00]	14 [0.56]	12.7 [0.5]	±1 [±0.04] <sup>g</sup>	
$RO$ —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 [1.00]	...	±1 [±0.04]	

รูปที่ 3.16 ค่าพิกัดของส่วนต่างๆ ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638



หลังจากนั้นจึงทำการดึงขึ้นทดสอบให้แยกออกจากกันด้วยความเร็วของการดึงคงที่ การทดสอบแรงดึงจะต้องเฝ้าติดตามและบันทึกแรงดึง ( $F$ ) อัตราการยืดตัวของวัสดุ ( $\Delta L$ ) แล้วทำการแปลงกลับเป็นค่า Engineering stress และ strain ดังตัวอย่างกราฟผลการทดสอบแรงดึงที่แสดงในรูปที่ 3.17 ผลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงสามารถนำมาคำนวณย้อนกลับหาค่าความเค้นคราก (Yield strength,  $\sigma_y$ ) ความเค้นแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength,  $\sigma_u$ ) ความเค้น ณ จุดแตกหัก (breaking strength,  $\sigma_b$ ) และความยืด ณ จุดแตกหัก (elongation at break,  $\%E$ )



รูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

### 3.8 การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยี

#### 3.8.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

การวิเคราะห์ทดสอบทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบ คณะผู้วิจัยทำการดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์ทดสอบ โดยการดัดแปลงวิธีทดสอบแบบ Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบ ดังลักษณะไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3.18a) ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.18b) ของห้องปฏิบัติการไทรโบโลยีอุตสาหกรรมการผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งเครื่องทดสอบการสึกหรอดังกล่าวนี้นี้ขับเคลื่อนด้วย Servo motor และควบคุมการทำงานของ Servo motor ด้วย Servo drive ที่เชื่อมต่อกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังลักษณะการแสดงผลที่แสดงในรูปที่ 3.19 เพื่อดึงข้อมูลค่าทอร์ก (Torque,  $T$ ) ของ Servo motor ซึ่งเป็นความแรงเชิงมุมที่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างจุดหมุนที่กระทำตั้งฉากกับแรง ดังสมการที่ 3.2

$$T = Fr \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.2 สามารถแปลงค่ากลับมาเป็นค่าแรง  $F$  ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการหมุนของวงแหวนคู่สัมผัส ซึ่งแรง  $F$  นี้สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.3 ดังนี้

$$F = \frac{T}{r} \quad (3.3)$$

และนอกจากนี้แรง  $F$  ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการหมุนของวงแหวนคู่สัมผัส ยังสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.4

$$F = \mu N \quad (3.4)$$

จากสมการที่ 3.4 นี้สามารถแปลงค่ากลับมาเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุคู่สัมผัสได้ตั้งสมการที่ 3.5

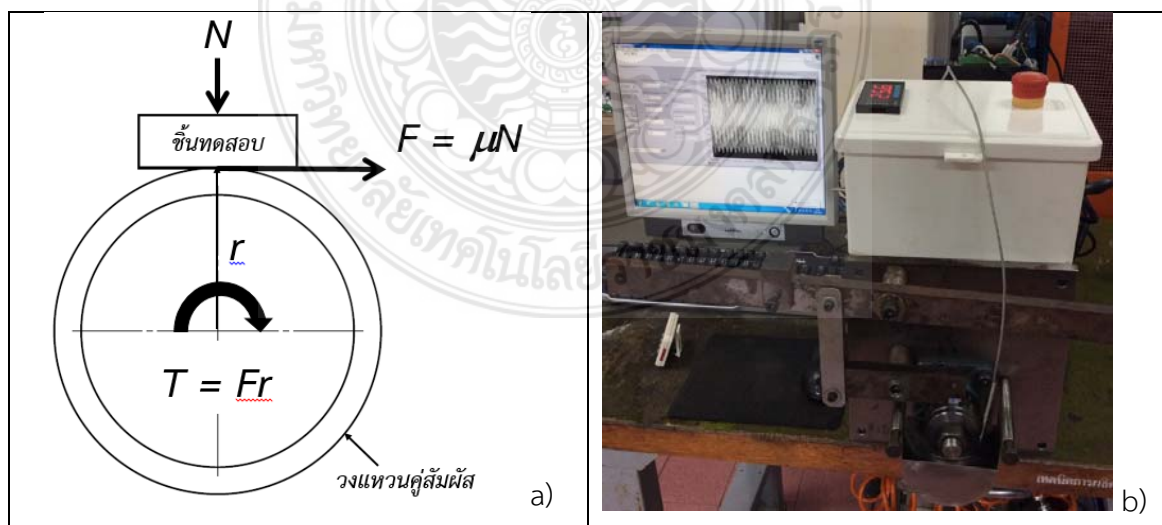
$$\mu = \frac{F}{N} \quad (3.5)$$

โดยที่  $N$  = น้ำหนักหรือแรงกระทำที่กดลงบนชิ้นทดสอบ หน่วย นิวตัน (N)

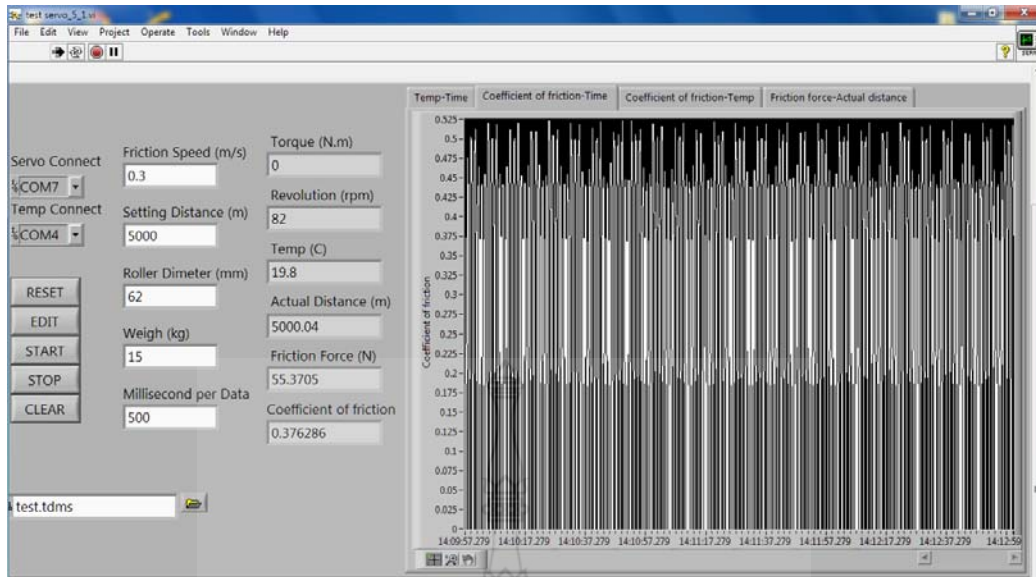
$F$  = แรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการหมุนของวงแหวนคู่สัมผัส หน่วย นิวตัน (N)

$T$  = ความเร่งเชิงมุมที่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างจุดหมุนที่กระทำตั้งฉากกับแรง หน่วย นิวตัน-เมตร (Nm)

$r$  = ระยะทางระหว่างจุดหมุนที่กระทำตั้งฉากกับแรง หรือรัศมีของวงแหวนคู่สัมผัส หน่วย นิเมตร (m)

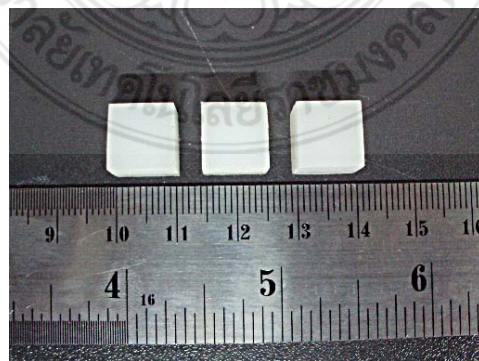


รูปที่ 3.18 a) หลักการของการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Block on ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 b) เครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ที่ใช้สำหรับการทดสอบ



รูปที่ 3.19 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อและควบคุมเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1

การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ดำเนินการในโครงการนี้ คณะผู้วิจัยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งพื้นผิวของชิ้นทดสอบถูกเตรียมขึ้นด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 มีความหยาบพื้นผิวอยู่ในช่วงประมาณ  $0.2\text{-}0.5 \mu\text{m}$  สำหรับในส่วนของวัสดุคู่สัมผัส คณะผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุคู่สัมผัสเป็นวงแหวนเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $62 \text{ mm}$  ความหยาบพื้นผิววงแหวน  $0.2 \mu\text{m}$  แรงกระทำหรือน้ำหนักกดลงบนชิ้นทดสอบ  $150 \text{ N}$  และกำหนดความเร็วของการเสียดทานระหว่างที่ทำการทดสอบเท่ากับ  $0.3 \text{ m/sec}$  โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะของการทดสอบแบบแห้งและแบบเปียกด้วยการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่น SAE 40 SAE 20W50, น้ำมันเครื่องสังเคราะห์เกรด SJ - SM / CH4 - CI4, น้ำมันเกียร์ API GL-1, SAE 90, 140 ดังตัวอย่างสารหล่อลื่นที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปในท้องตลาด ที่แสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ชิ้นทดสอบที่เตรียมสำหรับการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายและการสึกหรอ



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างสารหล่อลื่นที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปในท้องตลาด ที่ใช้สำหรับการทดลอง

### 3.8.2 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

การวิเคราะห์ทดสอบสมบัติความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบ วิเคราะห์จากอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ทำการทดสอบด้วยวิธี Block On Ring ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G77 ซึ่งมีหลักการของการทดสอบ ดังลักษณะไดอะแกรมที่แสดงในรูปที่ 3.18a) ด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอ IE-Wear1 ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.18b) ของห้องปฏิบัติการโทรโบโลยีอุตสาหกรรมการผลิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยกำหนดขนาดมิติของชิ้นทดสอบเท่ากับ  $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งพื้นผิวของชิ้นทดสอบถูกเตรียมขึ้นด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 2000 มีความหยาบพื้นผิวอยู่ในช่วงประมาณ  $0.2\text{-}0.5 \mu\text{m}$  สำหรับในส่วนของวัสดุคู่สัมผัส คณะผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุคู่สัมผัสเป็นวงแหวนเหล็กกล้า Bearing Steel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 mm ความหยาบพื้นผิววงแหวน  $0.2 \mu\text{m}$  แรงกระทำหรือน้ำหนักกดลงบนชิ้นทดสอบ 150 N และกำหนดความเร็วของการเสียดทานระหว่างที่ทำการทดสอบเท่ากับ 0.3 m/sec ด้วยระยะทางของการหมุนทดสอบ 5000 m. โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะของการทดสอบแบบแห้งและแบบเปียกด้วยการหล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่น SAE 40 SAE 20W50, น้ำมันเครื่องสังเคราะห์เกรด SJ - SM / CH4 - CI4, น้ำมันเกียร์ API GL-1, SAE 90, 140 ดังตัวอย่างสารหล่อลื่นที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปในท้องตลาด ที่แสดงในรูปที่ 3.21 เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ทดสอบทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบ สำหรับในส่วนของวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบนั้น วิเคราะห์จากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนและหลังการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.1



mg ที่แสดงในรูปที่ 3.22 และนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบมาคำนวณหาอัตราการสึกหรอในหน่วยของปริมาตรที่สูญเสียต่อน้ำหนักที่กดขึ้นทดสอบและระยะทางของการทดสอบ ( $\text{Wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nm}$ )

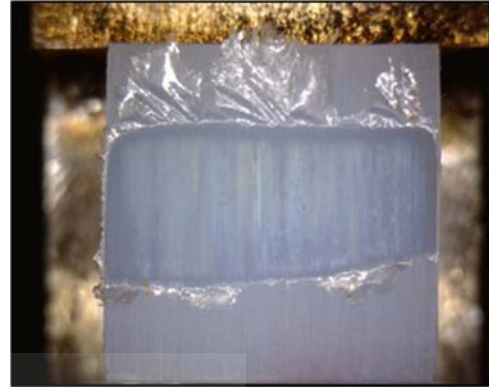
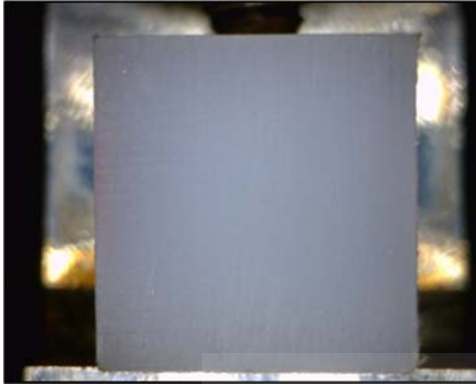


รูปที่ 3.22 เครื่องชั่งน้ำหนัก AND รุ่น HR-200 ความละเอียด 0.1 mg สำหรับชั่งตวงหาน้ำหนักที่สูญเสียของชิ้นทดสอบ

หลังจากชิ้นทดสอบผ่านการหมุนทดสอบจนได้ระยะทาง 500 km. ตามที่กำหนดแล้ว นำชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบและพิกเจอร์จับยึดชิ้นทดสอบไปทำการบันทึกภาพหลักฐานรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการสึกหรอ ดังตัวอย่างการถ่ายภาพรอยสึกหรอที่แสดงในรูปที่ 3.23 ซึ่งลักษณะรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบหลังจากการทดสอบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 ชุดอุปกรณ์บันทึกภาพรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 3.24 แสดงตัวอย่างลักษณะการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดขึ้นรูปร้อน

A. พื้นผิวก่อนทดสอบ

B. พื้นผิวหรือรอยการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบ

### 3.8.3 ขั้นตอนการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการทดสอบการสึกหรอประกอบด้วย

ขั้นตอนการทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการทดสอบการสึกหรอประกอบด้วย

1. เตรียมชิ้นทดสอบทดสอบการสึกหรอให้ได้ขนาด 10×10×10 mm.
2. นำชิ้นทดสอบทดสอบการสึกหรอมาชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก

ความละเอียด 0.1 มิลลิกรัมยี่ห้อ AND รุ่น HR-200

3. จับยึดชิ้นทดสอบด้วยฟิกเจอร์จับยึดชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบ การสึกหรอ
4. นำฟิกเจอร์ที่ได้จับยึดชิ้นทดสอบมาจับยึดเข้าเครื่องทดสอบ การสึกหรอ ภายใต้แรงกดขึ้น

ทดสอบ 150 N

5. เปิดเครื่องทดสอบให้ทำการหมุนเสียดสีชิ้นทดสอบด้วย ความของการเสียดทาน 0.3 m/s เป็นระยะทาง 10 km.

7. นำฟิกเจอร์จับยึดชิ้นทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ

8. บันทึกภาพรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ

9. นำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักที่สูญหายไป ของชิ้นทดสอบ

### 3.8.4 การคำนวณและวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ

อัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบหลังจากชิ้นทดสอบผ่านการทดสอบการสึกหรอสามารถหาได้จากการคำนวณหาอัตราการสูญเสียปริมาตรของชิ้นทดสอบเทียบกับแรงกดชิ้นทดสอบ คูณระยะทางของการทดสอบ ซึ่งสามารถหาคำนวณได้จากสมการ 3.6

$$\text{wear rate} = \frac{V_{\text{loss}}}{Nd} \quad (3.6)$$

โดย wear rate = อัตราการสึกหรอ หน่วย  $\text{mm}^3/\text{Nm}$

$V_{\text{loss}}$  = ปริมาตรที่สูญเสีย หน่วย  $\text{mm}^3$

$N$  = แรงกดขึ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการสึกหรอ หน่วย  $N$

$d$  = ระยะทางที่ทำการทดสอบ หน่วย  $m$

ซึ่ง  $V_{\text{loss}}$  ได้จากสมการ

$$V_{\text{loss}} = V_o - V_f \quad (3.7)$$

โดย  $V_o$  = ปริมาตรขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ

$V_f$  = ปริมาตรขึ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากปริมาตร ( $V$ ) ของขึ้นทดสอบได้จากสมการ

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (3.8)$$

ดังนั้น สมการอัตราการสึกหรอของขึ้นทดสอบคือ

$$\text{wear rate} = \frac{m_o - m_f}{\rho Nd} \quad (3.9)$$

โดย wear rate = อัตราการสึกหรอ หน่วย  $\text{mm}^3/\text{Nm}$

$m_o$  = มวลของขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบการสึกหรอ หน่วย  $g$

$m_f$  = มวลของขึ้นทดสอบหลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ หน่วย  $g$

$\rho$  = ค่าความถ่วงจำเพาะของขึ้นทดสอบ หน่วย  $g/\text{cm}^3$

$N$  = แรงกดขึ้นทดสอบขณะที่ทำการทดสอบการสึกหรอ หน่วย  $N$

$d$  = ระยะทางที่ทำการทดสอบ หน่วย



## บทที่ 4

### ผลการดำเนินการศึกษาวิจัย

รายละเอียดเนื้อหาในบทนี้เป็นผลการดำเนินการศึกษาวิจัยทั้งหมดที่ได้ดำเนินการในโครงการนี้ ประกอบด้วย การทดลองอัดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ UHMWPE บริสุทธิ์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Hot compression molding process โดยพิจารณาจากสมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงสุดเป็นหลักที่ให้ผลการทดลองออกมาเป็นค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดเปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบวัสดุอื่น UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ หลังจากนั้นจึงเป็นการดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูปผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์ที่เป็นอนุภาคนีออนออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ขนาดอนุภาค 0.05  $\mu m$  (50 nm) 0.3  $\mu m$  (300 nm) 0.5  $\mu m$  (500 nm) 1  $\mu m$  (1000 nm) 5  $\mu m$  และ 10  $\mu m$  เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบหาปริมาณฟิลเลอร์อนุภาคนีออนออกไซด์แต่ละขนาดอนุภาคที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของ UHMWPE composite ซึ่งโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและสารหล่อลื่น โดยอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ประกอบด้วย อุณหภูมิห้อง 25°C 50°C และ 75°C สำหรับในส่วนของการหล่อลื่นที่ทำการทดสอบ ประกอบด้วย สารหล่อลื่น เบอร์ SAE 40 SAE 20W50, น้ำมันเครื่องสังเคราะห์ เกรด SJ - SM / CH4 - CI4, น้ำมันเกียร์ API GL-1, SAE 90, 140, และจาระบี) โดยรายละเอียดผลการดำเนินการได้มีการแยกอธิบายตามกลุ่มการทดลองที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการทดลองอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบวัสดุอื่น UHMWPE เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบวัสดุอื่น UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

##### 4.1.1 เภคลักษณะทางเคมี (Chemical characteristic)

จากการศึกษาค้นคว้าสืบค้นข้อมูล IR spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่า มีการแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานที่ 3200–3600  $cm^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ  $-CH_2-$  stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 2891–2844  $cm^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching ในสายโซ่พอลิเมอร์, ที่ 1472  $cm^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-CH_2-$  bending ในสายโซ่พอลิเมอร์ และที่ 690–900  $cm^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งงออยู่นอกระนาบของสายโซ่พอลิเมอร์ [1]

เมื่อกล่าวถึงการวิเคราะห์ทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีของพอลิเมอร์ด้วย IR spectrum พบว่า สามารถนำไปเชื่อมโยงถึงการศึกษาการเสื่อมสภาพหรือการสลายตัวของพอลิเมอร์ (Degradation of Polymer) ซึ่งปัจจัยที่ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ประกอบด้วย อุณหภูมิ แสง รังสี และสารเติมแต่งบางชนิด ถ้าพอลิเมอร์ได้รับปัจจัยเหล่านี้เข้าไปแล้ว จะทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ขึ้น

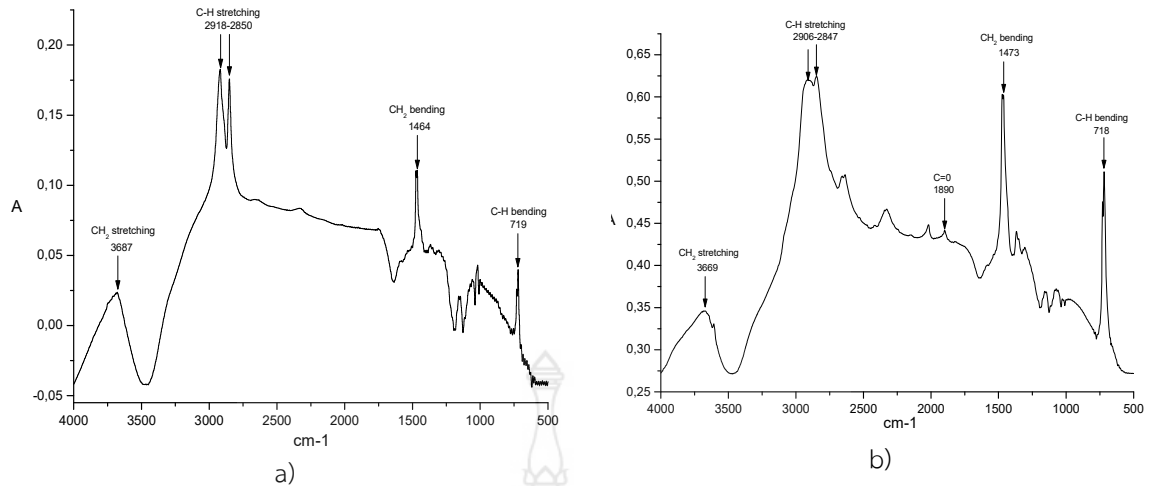
จากการศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบ IR spectrum ของชิ้นงานตัวอย่าง UHMWPE กับ IR spectrum มาตรฐานของ UHMWPE พบว่า การเสื่อมสภาพของ UHMWPE ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดพีคแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานดังต่อไปนี้ [2,3]

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  $1640\text{ cm}^{-1}$  และ  $966\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ vinyl ( $\text{C}=\text{C}$ ) และ trans-vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์
4. ที่  $910\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ terminal vinyl ( $-\text{CH}=\text{CH}_2-$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ และการถูกตัดภายในสายโซ่พอลิเมอร์

ผลการศึกษาวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีของผง UHMWPE บริสุทธิ์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวจากการวิเคราะห์ IR spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.1 a) แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่  $3687\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  stretching, ที่  $2918-2850\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่  $1464\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  bending และที่  $719\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending ซึ่งสัญญาณการสั่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้สอดคล้องตรงกับ IR spectrum มาตรฐานของ UHMWPE

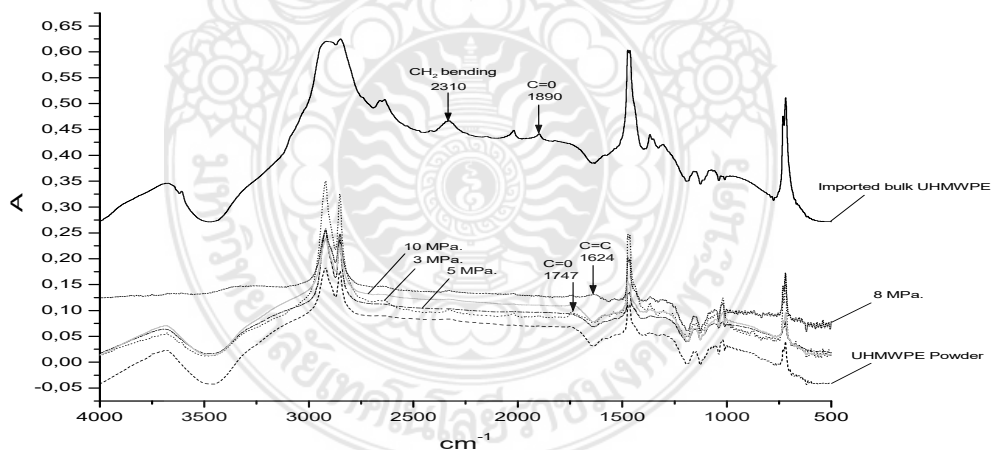
สำหรับในส่วนของวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบนี้มีลักษณะเป็นแท่งกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $75\text{ mm}$ . จากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่ได้รับการบริจาคจากผู้ประกอบในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งแท่ง UHMWPE มีมวลโมเลกุลเท่ากับ  $4.0$  กรัม/โมล และจากการวิเคราะห์ IR spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.1 b) แสดงให้เห็นค่าการดูดกลืนพลังงานที่  $3669\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  stretching, ที่  $2906-2847\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H stretching, ที่  $1473\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ  $-\text{CH}_2-$  bending, ที่  $730-718\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของ C-H bending, และที่  $1890\text{ cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl ( $\text{C}=\text{O}$ ) ที่มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์

ผลจากการวิเคราะห์ IR spectrum ของวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศเปรียบเทียบกับ IR spectrum มาตรฐานของ UHMWPE แสดงให้เห็นว่ากระบวนการขึ้นรูปมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



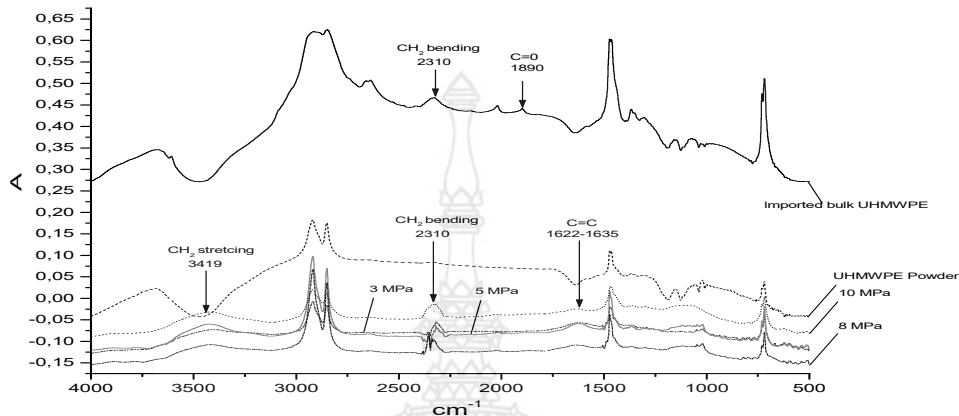
รูปที่ 4.1 IR spectrum: a) ผง UHMWPE บริสุทธิ์ b) วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 140 150 และ 160 °C ที่ความดัน 3 5 8 และ 10 MPa ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที พบว่า รายละเอียดผลการวิเคราะห์มีลักษณะพีค IR spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.2 – 4.4 และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์พีคต่างๆ ที่ปรากฏ ดังตารางที่ 4.1 โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 °C ด้วยความดัน 5 และ 10 MPa มีสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ของวัสดุก้อน UHMWPE ดังพีคที่ปรากฏในรูปที่ 4.2 สำหรับชิ้นทดสอบอื่นๆ จะพบพีคของหมู่ vinyl (C=C)

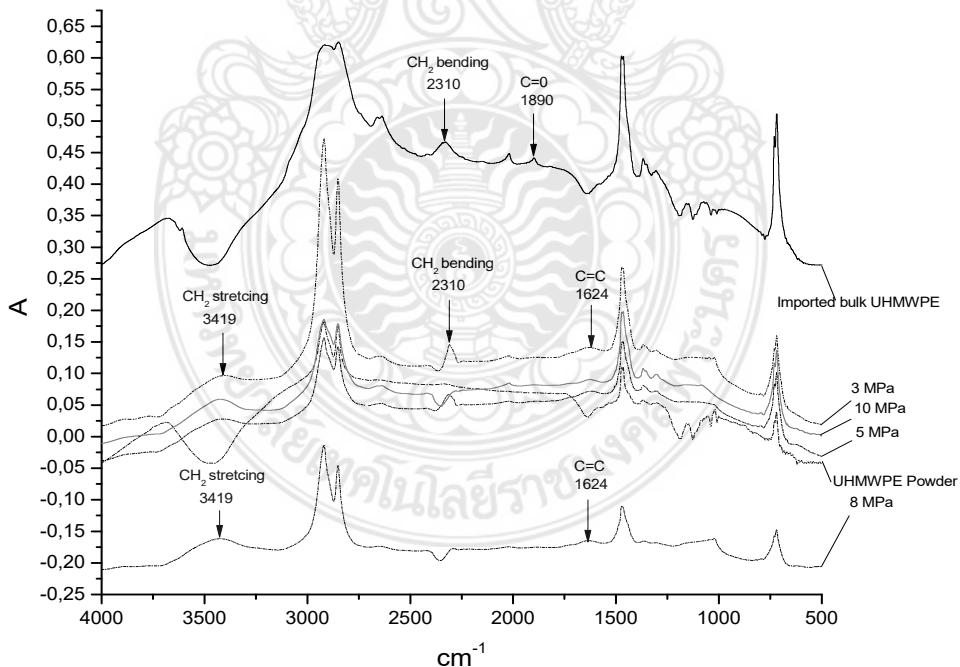


รูปที่ 4.2 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบ Imported bulk UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและของวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 140 °C ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที

สำหรับในกรณีของขึ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 และ 160°C ด้วยค่าความดันระดับต่างๆ พบว่า ไม่มีสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) แต่จะพบสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ( $-\text{CH}_2-$ ) หมู่ vinyl (C=C) และ trans-vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ดังพิกที่ปรากฏในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [4]



รูปที่ 4.3 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ Imported bulk UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศและของวัสดุก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 150 °C ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที



รูปที่ 4.4 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ Imported bulk UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศและของวัสดุก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 160 °C ภายใต้สภาวะความดันต่างๆ ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที

ตารางที่ 4.1 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของชั้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ

Sample	Forming condition			Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน ( $\text{cm}^{-1}$ )						หมายเหตุ
	Tem- p. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Pressur- e (MPa)	Exposure time (min.)	-CH <sub>2</sub> - stretchi- ng	C-H stretching	-CH <sub>2</sub> - bendin- g	C-H bendin- g	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
UHMWPE powder	—	—	—	3687	2918- 2850	1464	719	—	—	
Imported bulk UHMWPE	—	—	—	3669	2906- 2847	1473	730- 718	1890	—	Peak 1890 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
1	140	3	30	3419	2919- 2851	1464	719	—	1624	Peak 1624 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
2		5	30	3686	2918- 2850	1464	719	1747	—	Peak 1747 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
3		8	30	3258	2919- 2850	1464	719	—	1643	Peak 1643 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
4		10	30	3687	2918- 2850	1464	719	1736	—	Peak 1736 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
5	150	3	30	3398	2918- 2850	2311- 1464	719	—	1624	Peak 2311 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1624 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
6		5	30	3419	2918- 2850	2309- 1471	718	—	1622	Peak 2309 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1622 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
7		8	30	3418	2918- 2850	2336- 1471	718	—	1624	Peak 2336 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1624 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
8		10	30	3401	2918- 2850	2306- 1464	718	—	1635	Peak 2306 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1635 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
9	160	3	30	3412	2918- 2850	2310- 1463	718	—	1615	Peak 2310 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1615 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
10		5	30	3412	2918- 2850	2310- 1463	718	—	1615	Peak 2310 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1615 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
11		8	30	3419	2918- 2850	1471	718	—	1637	Peak 1637 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
12		10	30	3418	2918- 2850	1463	718	—	1621	Peak 1621 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

#### 4.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล (Physical and Mechanical Properties)

การศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุก้อน UHMWPE ที่ประกอบด้วยการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ความหนาแน่น และโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบ ที่ทำการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ยี่ห้อ Perkin

Elmer รุ่น Pyris Diamond ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 20-400 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 °C/min, ค่า enthalpy มาตรฐานสำหรับวัสดุ UHMWPE มีค่า  $\Delta H = 291\text{J/g}$  ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทดสอบมีค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C เวลาคง อุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 62.60% รองลงคือ สภาวะ การทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีปริมาณความเป็น ผลึกเท่ากับ 61.52% สำหรับในส่วนของวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีปริมาณความเป็น ผลึกเท่ากับ 53.31%

สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชิ้นทดสอบส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ ในช่วง 0.92-0.93 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศที่มี ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 g/cm<sup>3</sup> ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.2

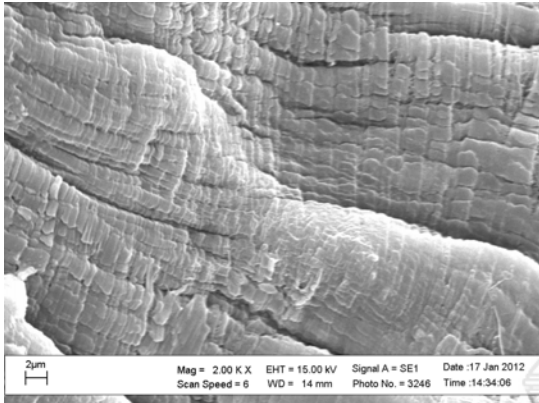
**ตารางที่ 4.2** แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการ ทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

Sample / Forming condition	Degree of crystallinity, $\chi$ (%)	Density, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)		Ultimate Strength, $\sigma_u$ (MPa)		Breaking Strength, $\sigma_b$ (MPa)		Elongation, $\epsilon$ (MPa)		Hardness (Shore D)	
		Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD
		e.		e.		e.		e.		e.		e.	
Imported bulk UHMWPE	53.51	0.93	0.01	20.87	1.01	22.93	2.27	22.93	2.27	396.67	37.43	63.47	2.19
140 °C 3 MPa. 30 min.	59.19	0.92	0.01	10.67	1.59	24.33	1.47	22.80	0.53	216.80	12.01	68.00	2.79
140 °C 5 MPa. 30 MPa.	50.54	0.92	0.01	12.00	2.65	26.17	2.02	23.53	0.81	228.70	16.67	65.00	3.22
140 °C 8 MPa. 30 MPa.	50.54	0.92	0.01	15.17	2.36	26.67	1.76	18.87	3.27	247.83	17.09	67.33	2.55
140°C 10 MPa. 30 MPa.	62.60	0.92	0.01	17.77	2.86	27.23	1.86	22.67	2.08	262.40	11.38	65.70	2.17
150 °C 3 MPa. 30 MPa.	51.82	0.92	0.01	18.94	0.74	27.83	1.15	22.73	2.03	262.60	13.60	64.33	2.40
150 °C 5 MPa. 30 MPa.	61.52	0.93	0.01	20.43	1.21	28.33	1.53	24.67	0.76	285.60	6.41	66.27	1.01
150 °C 8 MPa. 30 MPa.	56.18	0.93	0.01	19.17	2.02	27.73	2.73	21.33	1.44	253.80	13.03	67.03	1.10
150 °C 10 MPa. 30 MPa.	53.81	0.93	0.01	17.83	2.02	26.17	2.02	20.33	2.02	249.77	7.35	64.27	2.84
160 °C 3 MPa. 30 MPa.	52.54	0.93	0.01	17.00	2.18	25.57	1.69	19.50	3.18	245.07	15.31	70.23	1.17

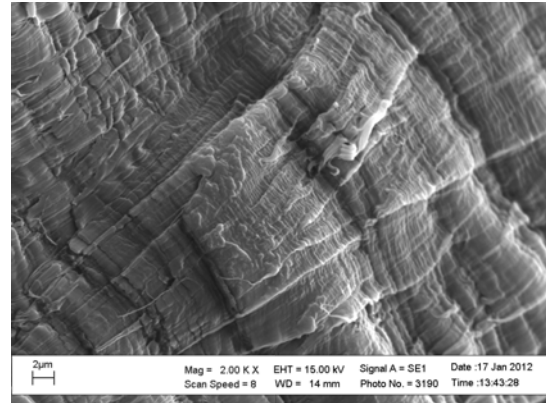


160 °C 5 MPa. 30 MPa.	49.54	0.92	0.01	16.98	1.80	27.23	1.99	20.77	1.97	232.00	19.83	64.33	1.99
160 °C 8 MPa. 30 MPa.	59.08	0.93	0.01	15.93	1.50	24.70	2.23	20.93	2.20	260.83	13.33	66.17	3.41
160 °C 10 MPa. 30 MPa.	55.74	0.92	0.01	15.83	2.25	24.67	2.36	22.40	2.62	276.83	15.00	66.23	1.45

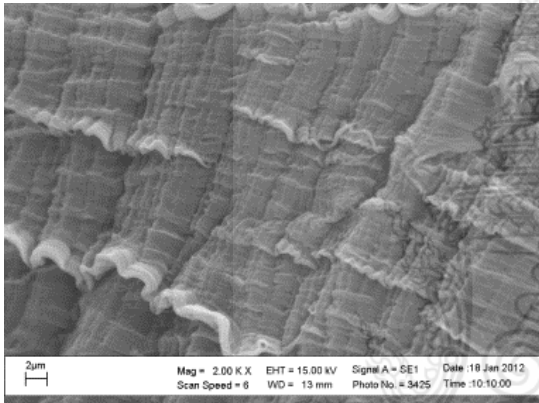
สำหรับในส่วนของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบที่ทำการศึกษาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1455VP ของภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผลจากการศึกษาวิเคราะห์ พบว่า โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or flake pattern) ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.5 ที่เกิดจากการเชื่อมต่อประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาค UHMWPE ที่ถูกกดอัดรีดให้ติดกันภายใต้อุณหภูมิและความดันที่ระดับต่างๆ และทำให้เกิดการเย็นตัวทันทีในระหว่างการอัดรีดผ่านชุดตายเย็นที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 องศา อัตราการไหล 150 ลิตร/นาที่ เมื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเชื่อมต่อประสานของผงอนุภาค UHMWPE เปรียบเทียบกับสมบัติของ UHMWPE ที่ไม่มีจุดไหลตัวและหลอมละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกันเหมือนกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นๆ พบว่า มีลักษณะคล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดสาคู แต่เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างจุลภาค พบว่า ชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 10 MPa มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่มีการเชื่อมต่อประสานหรือมีการหลอมละลายรวมกันเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างเม็ดอนุภาค UHMWPE มากกว่าชิ้นทดสอบอื่นๆ



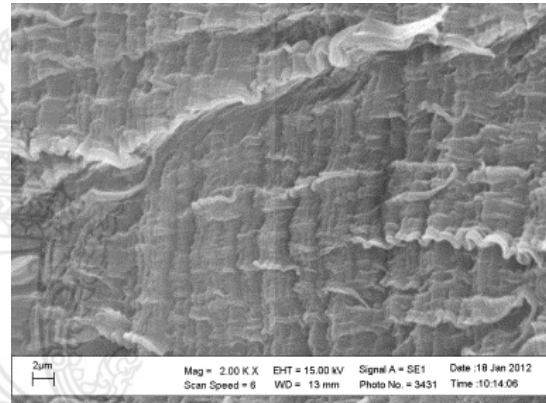
a) วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



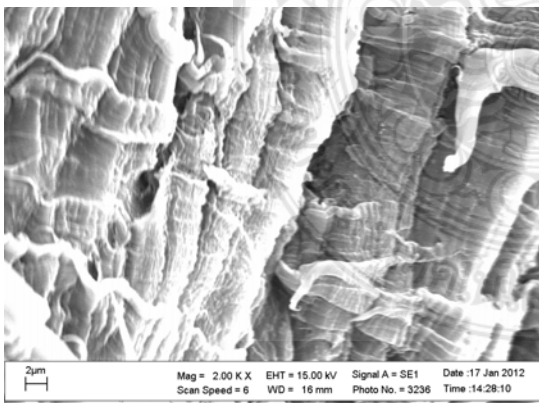
b) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 3 MPa



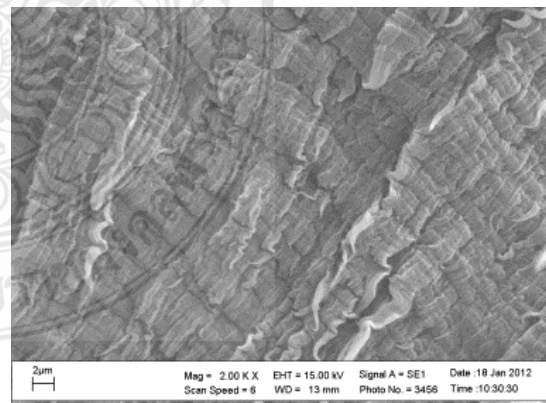
c) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 5 MPa



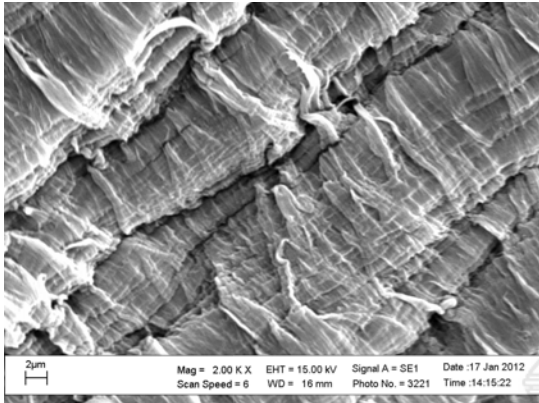
d) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 8 MPa



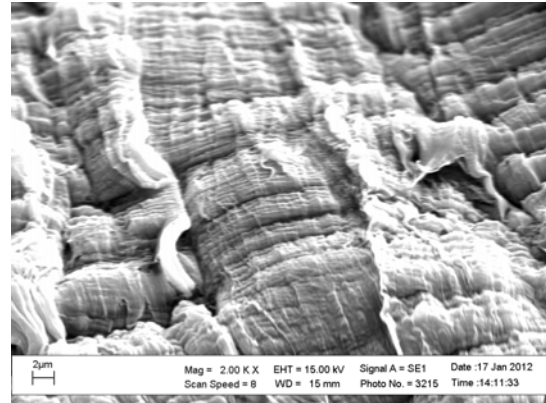
e) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 10 MPa



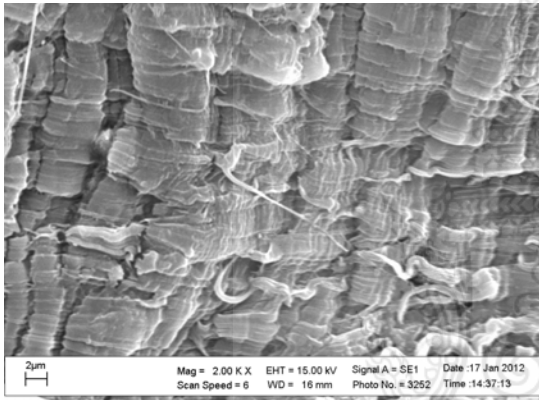
f) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 3 MPa



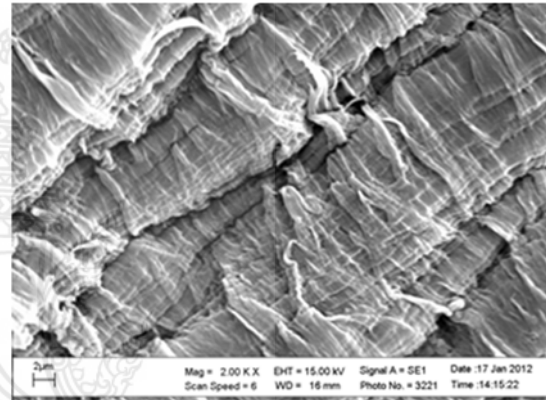
g) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 5 MPa



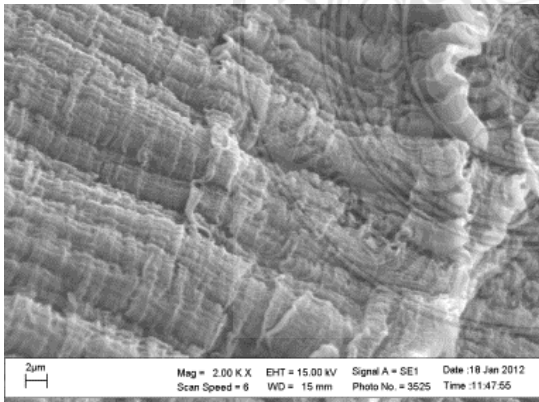
h) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 8 MPa



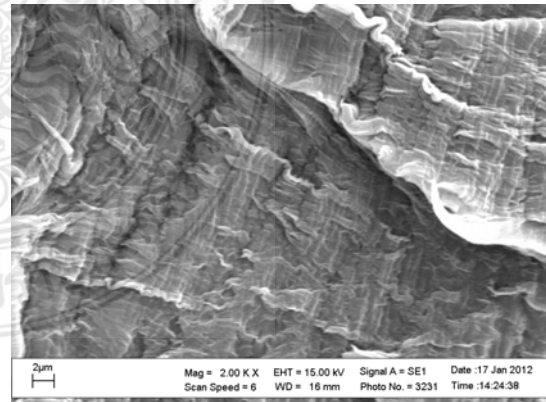
i) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 10 MPa



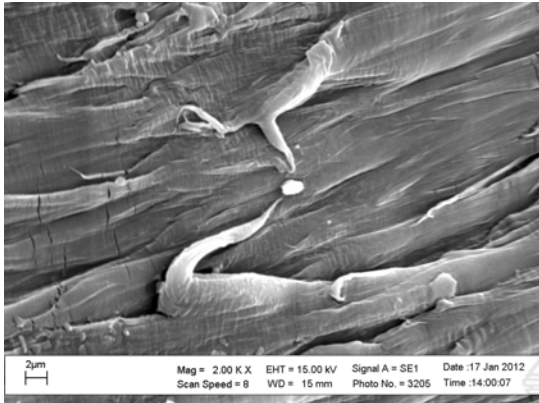
j) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 3 MPa



k) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 5 MPa



l) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 8 MPa



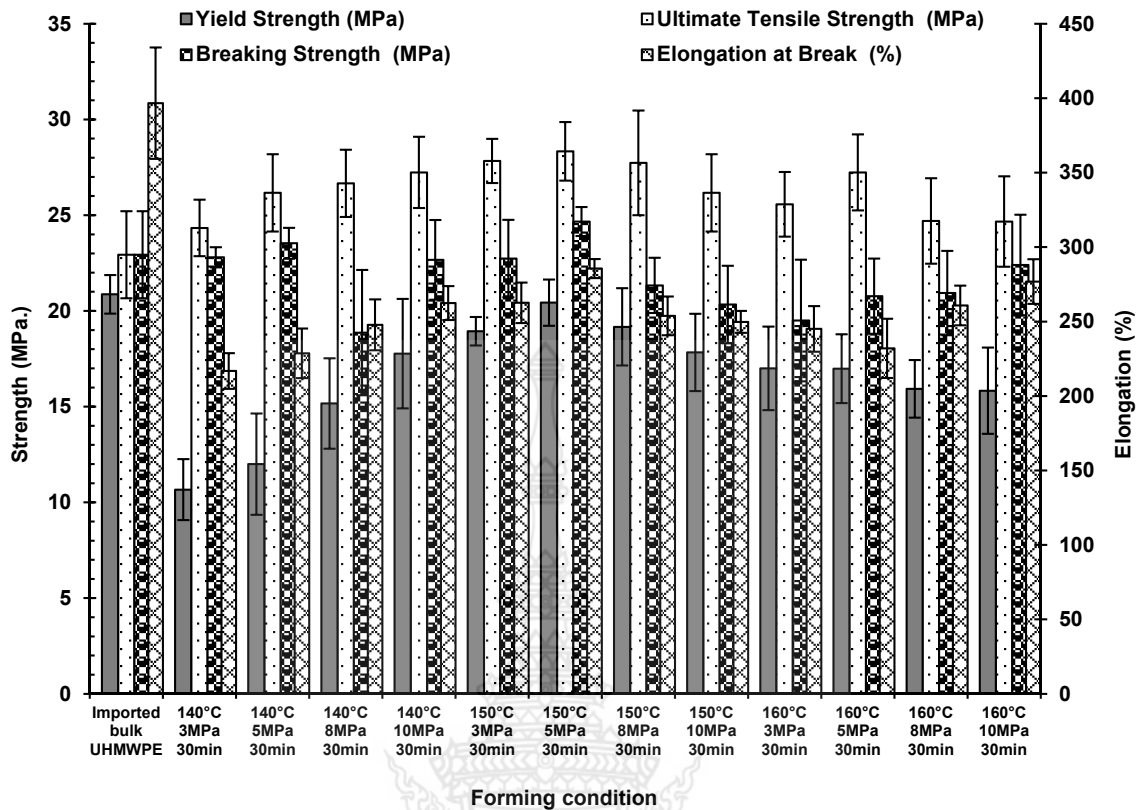
m) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 10 MPa

หมายเหตุ : ขึ้นทดสอบผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้เวลาระยะเวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที

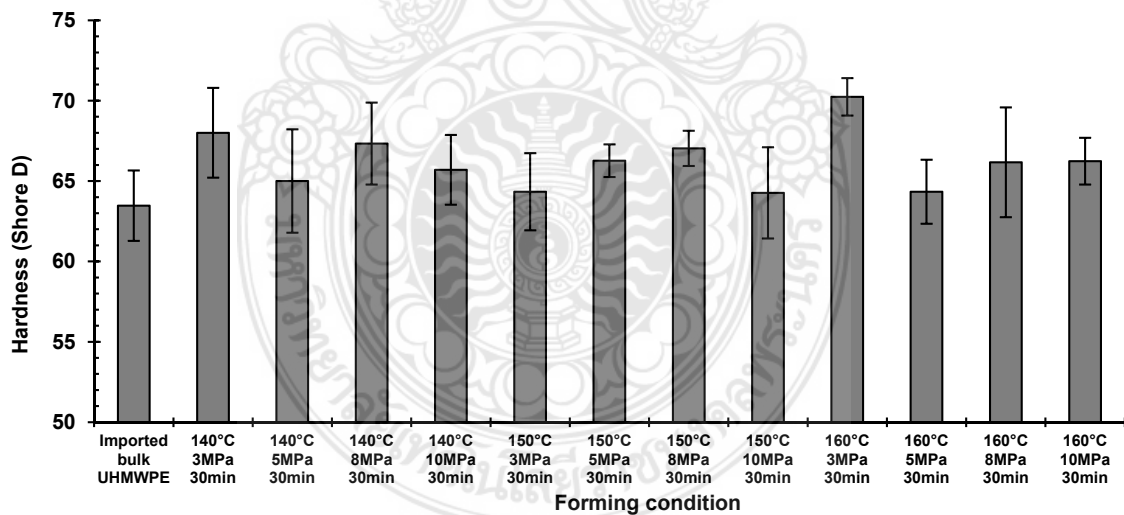
#### รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของขึ้นทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง พบว่า ขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ทำการทดลองอัดรีดขึ้นรูปทุกสภาวะการขึ้นรูป Ultimate tensile strength มีค่าสูงกว่าขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ แต่ Yield strength กลับมีค่าต่ำกว่าขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และในทำนองเดียวกัน Elongation ก็มีค่าต่ำกว่าเช่นกัน ดังกราฟผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาวะการอัดรีดขึ้นรูปที่ต่างกันมีผลทำให้ได้สมบัติทางกลต่างกัน โดยขึ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C ความดัน 5 MPa มีค่า Yield strength Ultimate tensile strength และค่า Elongation สูงสุด เท่ากับ  $20.43 \pm 1.21$  MPa  $28.33 \pm 1.53$  MPa และ  $285.60 \pm 6.41\%$  ตามลำดับ ในขณะที่ขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมีค่าเท่ากับ  $20.87 \pm 1.01$  MPa  $22.93 \pm 2.27$  MPa และ  $396.67 \pm 37.43\%$  ตามลำดับ สำหรับในกรณีของค่าความแข็ง พบว่า ขึ้นทดสอบที่ทำการทดลองอัดรีดขึ้นรูปส่วนใหญ่มีค่าความแข็งใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 66-70 shore D ซึ่งสูงกว่าขึ้นทดสอบ UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังกราฟผลการวิเคราะห์ทดสอบเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 4.7

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ IR spectrum และปริมาณความเป็นผลึก พบว่า ขึ้นทดสอบที่มีการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ และมีปริมาณความเป็นผลึกสูงมีค่า Yield strength และ Ultimate tensile strength สูง แต่ในทางกลับกันขึ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำจะมีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength ต่ำ และมีค่า Elongation ลดต่ำลงตามไปด้วยเช่นกัน และเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาค พบว่า ขึ้นทดสอบที่มีการผสมเป็นเนื้อเดียวกันหรือเม็ดอนุภาค UHMWPE เกาะยึดเชื่อมประสานติดกันได้สมบูรณ์กว่าจะมีค่า Elongation สูงกว่า



รูปที่ 4.6 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ



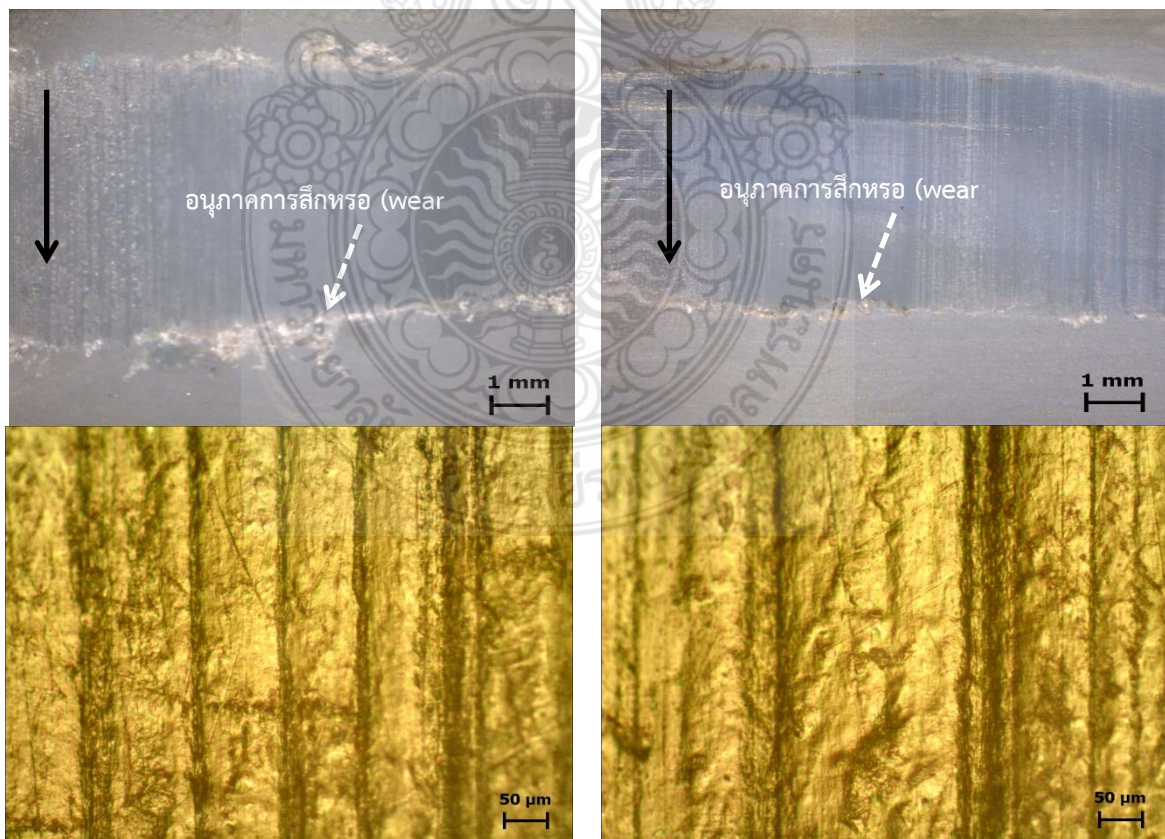
รูปที่ 4.7 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

#### 4.1.3. สมบัติทางด้านโทรโบลยี (Tribological Properties)

หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบด้วยระยะเวลาของการทดสอบ 180 นาที พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดมีการปรากฏของอนุภาคการสึกหรอ (wear debris) สะสมตัวอยู่บริเวณขอบรอย



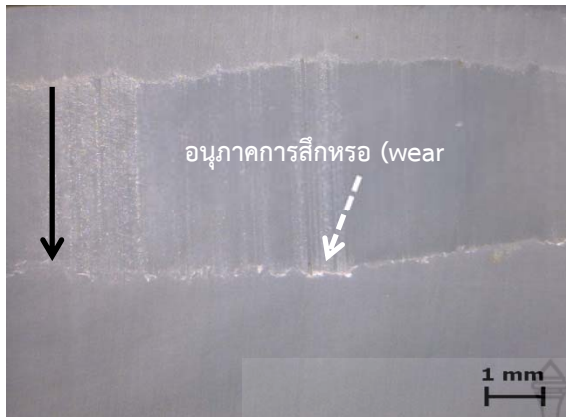
สึกหรอ (ลูกศรเส้นประสีขาว) ตามทิศทางการไหล (ลูกศรสีดำ) ของลูกกลิ้งวัสดุคู่สัมผัส โดยขึ้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ มีขนาดพื้นที่รอยสึกหรอและปริมาณการสะสมตัวของอนุภาค การสึกหรอมากที่สุด ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.8 และนอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและความ หยาบพื้นผิวของรอยสึกหรอ พบว่า บริเวณพื้นผิวของรอยสึกหรอยังปรากฏพื้นผิวที่มีลักษณะหยาบและ บางบริเวณมีลักษณะเป็นร่องที่เกิดจากการไหลครูดเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ ส่งผลให้สามารถสันนิษฐานรูปแบบ ของการสึกหรอที่เกิดขึ้นนี้ได้ว่า เป็นการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) ที่เกิดจากการถ่ายโอนเนื้อ พอลิเมอร์ไปยังพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัสและเกิดการเกาะยึดติดแน่นบนพื้นผิวลูกกลิ้งที่เรียกว่า การถ่ายโอน เยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์ (Polymer transfer film) ที่มีลักษณะเป็นชั้นเยื่อที่มีความบางมากๆ และเหนียว บนพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส โดยชั้นเยื่อบางๆ ของพอลิเมอร์สามารถช่วยลดการสึกหรอของวัสดุพอลิเมอร์หลัง ช่วงเวลาเริ่มต้นเกิดการสึกหรอ [5] และเมื่อขึ้นทดสอบผ่านการทดสอบด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ชั้นเยื่อ บางๆ ของพอลิเมอร์เกิดการสะสมตัวจนมีความหนาเพิ่มขึ้นและเหนียวขึ้นพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่ เกิดการเกาะยึดประสานติดกันออกจากชิ้นทดสอบ ส่งผลให้พื้นผิวชิ้นทดสอบบางบริเวณเกิดเป็นรอยหยาบ ขรุขระ และในช่วงเวลาเดียวกันนี้บางบริเวณของพื้นผิวลูกกลิ้งเกิดการสะสมตัวของเนื้อพอลิเมอร์ที่ฉีก ออกมาจากชิ้นทดสอบก่อตัวเป็นก้อนนูน (Lumpy) ยึดเกาะติดแน่นและยื่นโผล่พ้นออกมาจากพื้นผิว ลูกกลิ้งทำให้เกิดการไหลครูดลงไปเนื้อพอลิเมอร์ในระหว่างที่มีการไหลสัมผัสของลูกกลิ้งกับชิ้นทดสอบ ส่งผลให้เกิดเป็นร่องบนพื้นผิวรอยสึกหรอ [6] ดังลักษณะที่ปรากฏในรูปที่ 4.8



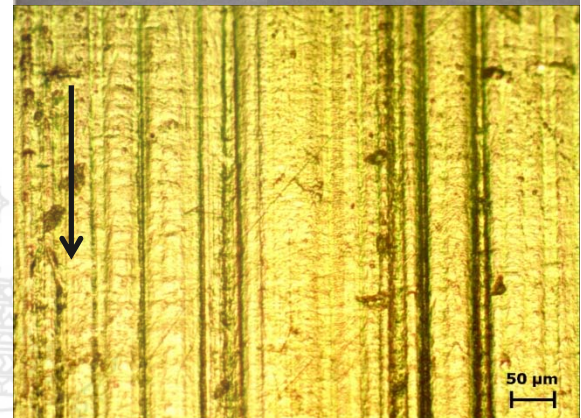
a) วัสดุก่อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

b) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 3 MPa

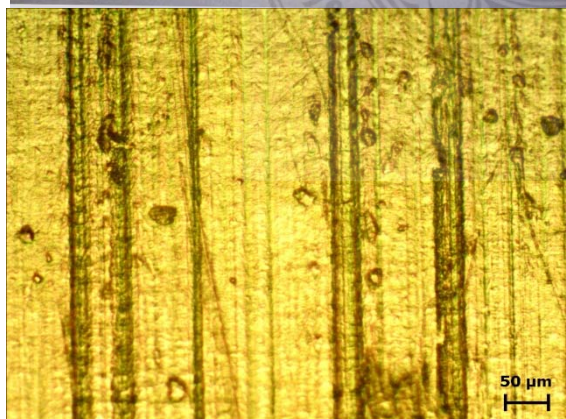
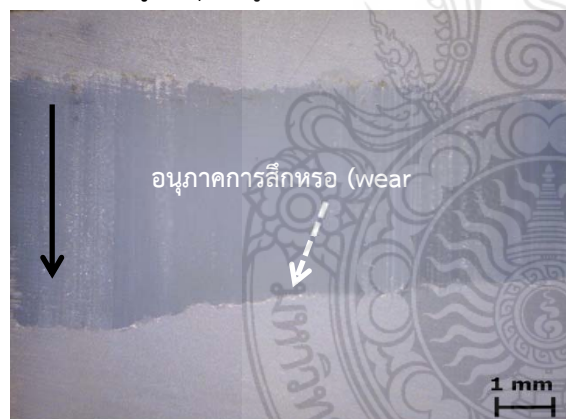




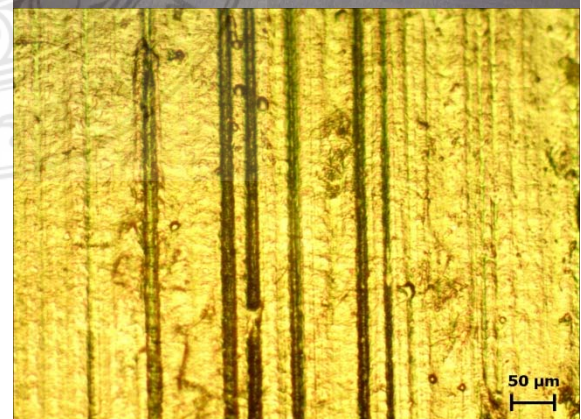
c) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 5 MPa



d) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 8 MPa

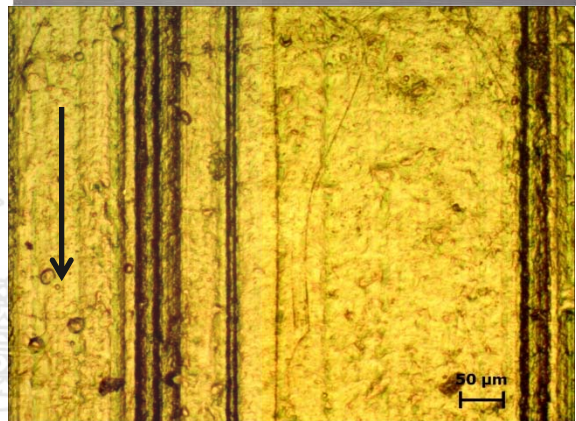
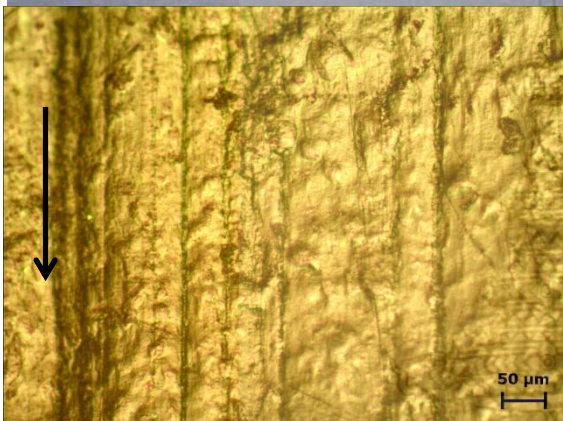
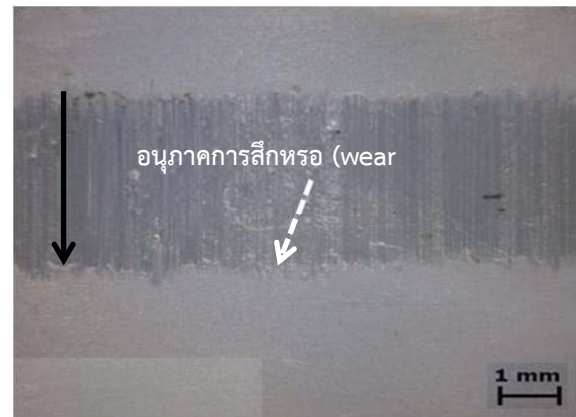


e) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 140°C ความดัน 10 MPa



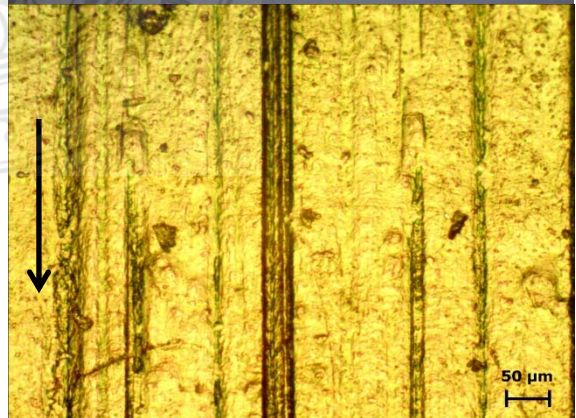
f) อัตราตื้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 3 MPa





g) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 5 MPa

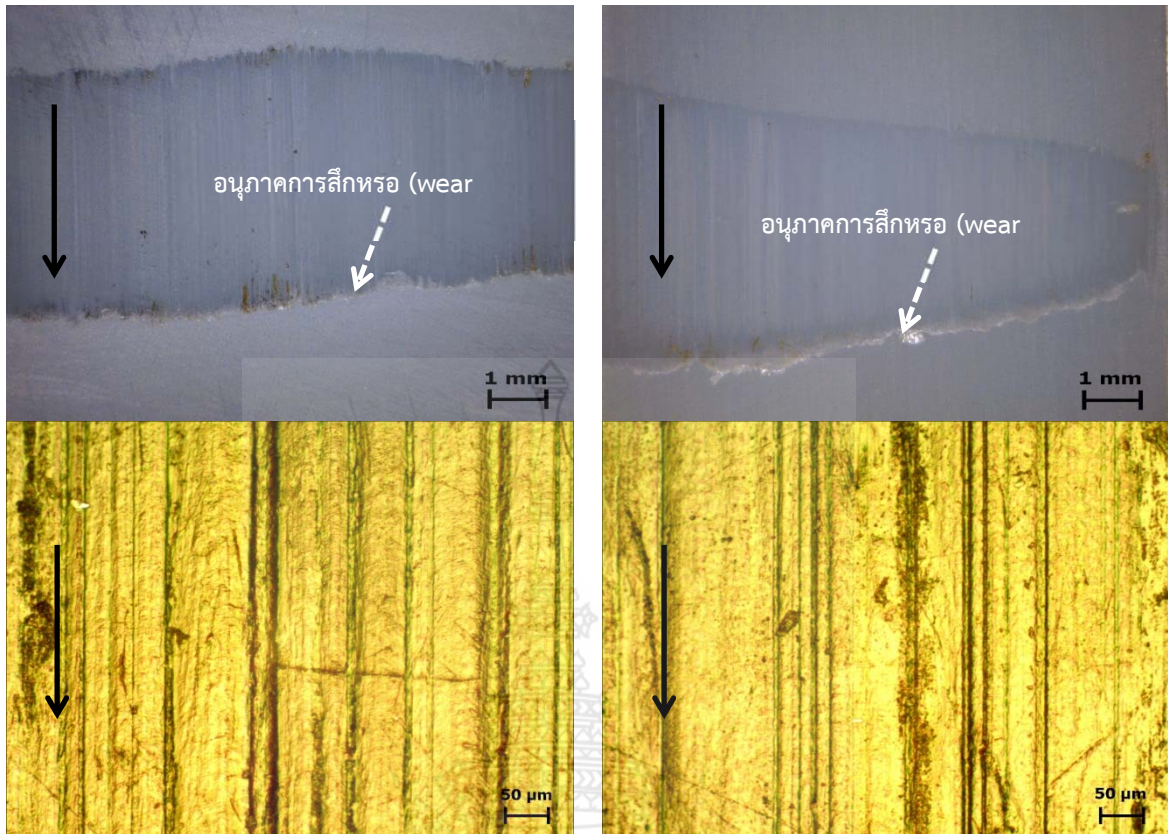
h) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 8 MPa



i) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C ความดัน 10 MPa

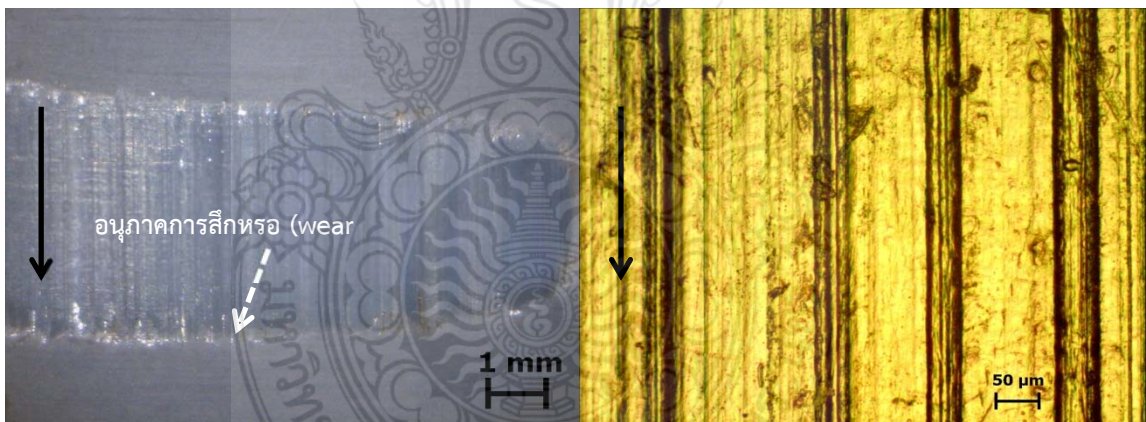
j) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 3 MPa





k) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 5 MPa

l) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 8 MPa



m) อัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C ความดัน 10 MPa

รูปที่ 4.8 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ หลังจากผ่านการทดสอบการสึกหรอ

จากการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE และ UHMWPE composite [6, 7, 8, 9] อนุภาคการสึกหรอที่ปรากฏนี้เกิดขึ้นจากการพฤติกรรมถ่ายโอนเนื้อพอลิเมอร์ (Polymer transfer) และการสลายตัว (degradation) ของพอลิเมอร์ที่มีสาเหตุมาจากการแตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์ (การล้าตัวของพอลิเมอร์ (polymer fatigue) หรือ การขีดถูที่เกิดจากการตัดเฉือนระดับไมโครของ

จุดปลายความหยาบพื้นผิวของพื้นผิวลูกกลิ้งคู่สัมผัส (abrasive micro cutting of roller counterface asperity)) แล้วเกิดการสะสมตัวบริเวณขอบรอยสึกหรือตามทิศทางการไหลของลูกกลิ้งคู่สัมผัสจากการทดสอบการสึกหรอ

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านโทรโพลีด้วยเครื่องมือต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.12-0.14 โดยชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงสุดเท่ากับ 0.14 และนอกจากนี้ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้าจากต่างประเทศยังมีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ได้ดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูป โดยมีค่าเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $4.00 \pm 0.29 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ สำหรับอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบที่ได้ดำเนินการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่สภาวะการขึ้นรูปต่างๆ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 โดยชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa มีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำสุด มีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $1.09 \pm 0.15 \text{ }\mu\text{m}$  ตามลำดับ รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่ผ่านการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 3 MPa และชิ้นทดสอบที่ผ่านการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 8 MPa ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า สภาวะของการขึ้นรูปมีผลต่ออัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมีความสัมพันธ์กัน โดยชิ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน

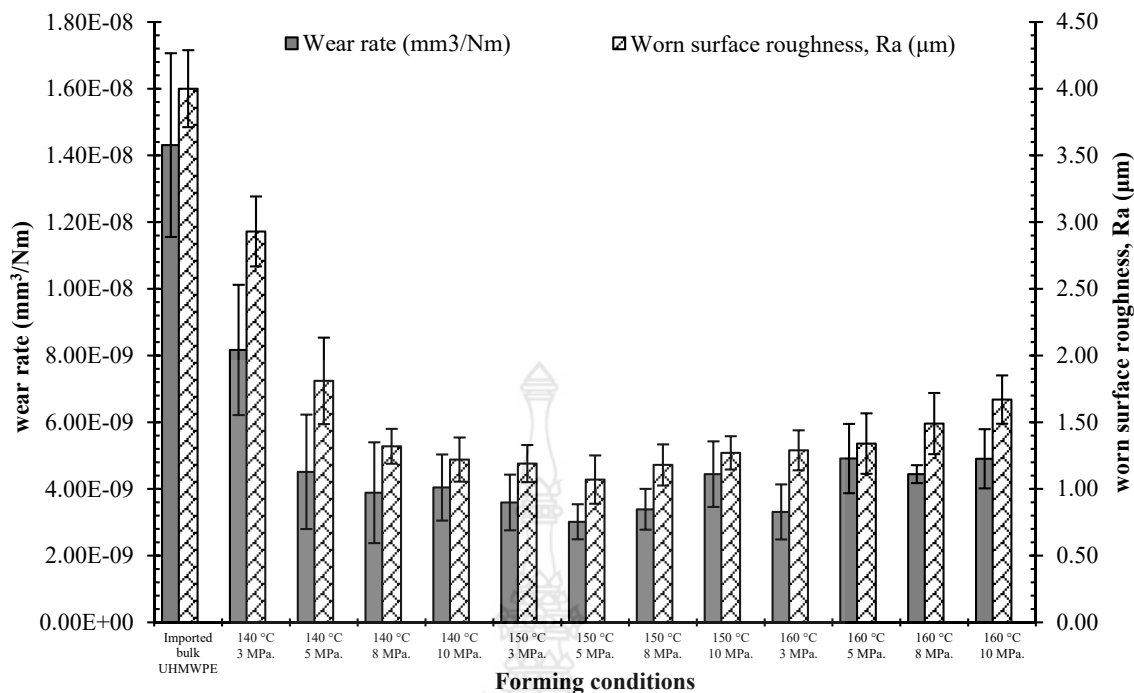
**ตารางที่ 4.3** แสดงสมบัติทางด้านโทรโพลีของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้าจากต่างประเทศ

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

160 °C 5 MPa. 30 MPa.	0.12	0.01	4.91E-09	1.04E-09	1.34	0.23
160 °C 8 MPa. 30 MPa.	0.12	0.01	4.44E-09	2.70E-10	1.49	0.23
160 °C 10 MPa. 30 MPa.	0.12	0.01	4.90E-09	8.87E-10	1.67	0.18

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ขึ้นทดสอบที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa เกิดการ Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่ 2309  $\text{cm}^{-1}$  และ 1622  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (-CH<sub>2</sub>-), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ ที่ส่งผลให้ขึ้นทดสอบมีอัตราการสึกหรอต่ำสุด ซึ่งพีคเหล่านี้ไม่ปรากฏในผงอนุภาค UHMWPE บริสุทธิ์และวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และนอกจากนี้ขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ยังพบพีคที่ 1890  $\text{cm}^{-1}$  ที่เป็นสัญญาณการสั่นของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอสูงกว่าขึ้นทดสอบที่ทำการทดลองอัดรีดขึ้นรูป

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึก สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่า ขึ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกสูง จะมีสมบัติทางกลสูงกว่าขึ้นทดสอบที่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำ และปริมาณความเป็นผลึกสูงยังส่งผลให้มีอัตราการสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน และนอกจากนี้สมบัติทางกลที่สูงและอัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้ยังมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha [10] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์ที่มีค่า Ultimate tensile strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline microstructure) เพราะค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ จะหมายถึง ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไถลมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นบางๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุสัมผัส [10]



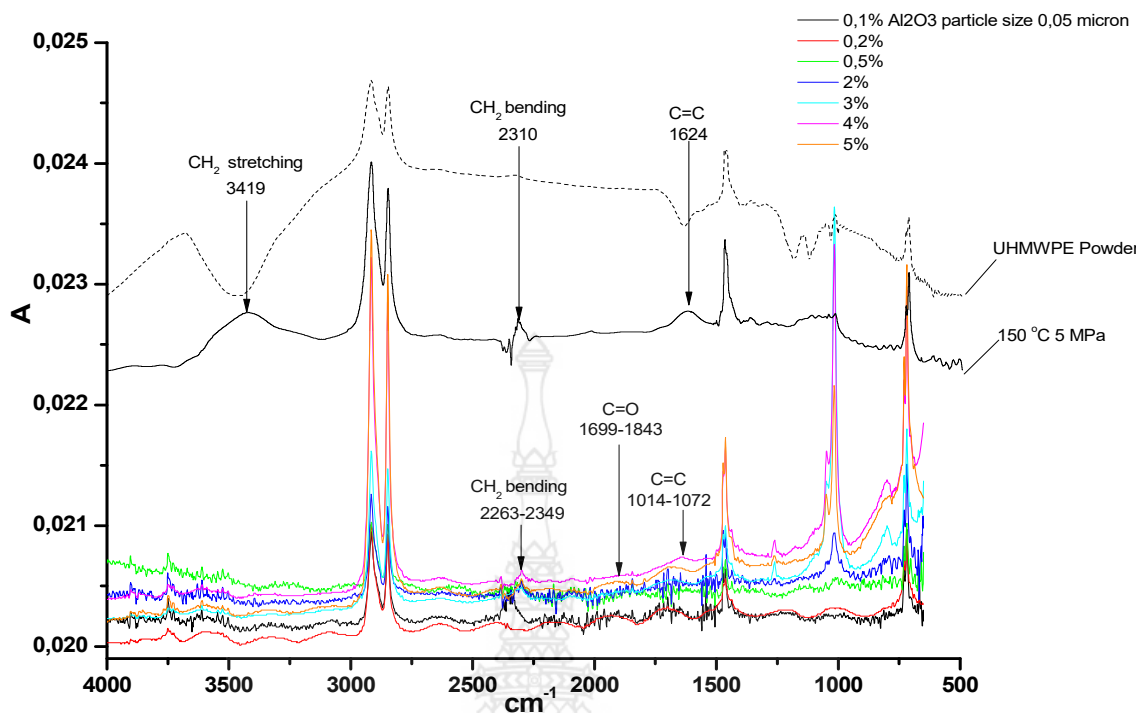
รูปที่ 4.9 อัตราการสึกหรอและความหยาบผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

## 4.2 ผลการทดลองขึ้นรูปชิ้นทดสอบ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm

### 4.2.1 เอลักษณะทางเคมี (Chemical characteristic)

จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 150 °C ที่ความดัน 5 MPa ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที พบว่า MWCNT มีผลทำให้พิกัดสัญญาณการดูดกลืนพลังงานของชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรายละเอียดผลการวิเคราะห์ที่มีลักษณะพิกัด IR spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.22 และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์พิกัดต่างๆ ที่ปรากฏ ดังตารางที่ 4.10 โดยพิกัดของชิ้นทดสอบส่วนใหญ่ที่ปรากฏมีสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene (-CH<sub>2</sub>-) หมู่ vinyl (C=C) และ trans-vinylene (-R<sup>1</sup>CH=CHR<sup>2</sup>-) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [4] และนอกจากนี้ยังมี carbonyl group (C=O) ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีผลทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง IR spectrum ที่ทำให้เกิดพิกัดใหม่ๆ เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบ UHMWPE จากการอัดรีดขึ้นรูปโดยปราศจากสารเติมแต่งใดๆ





รูปที่ 4.22 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$

ตารางที่ 4.10 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของชิ้นทดสอบวัสดุ ก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$

$\text{Al}_2\text{O}_3$ particle size $0.05 \mu\text{m}$ fraction (wt. %)	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน ( $\text{cm}^{-1}$ )						หมายเหตุ
	-CH <sub>2</sub> - stretching	C-H stretching	-CH <sub>2</sub> - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
UHMWPE powder	3687	2918-2850	1464	719	—	—	
0	3419	2918-2850	2309 1471	718	—	1622	Peak 2309 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1622 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.1		2911-2845	2349 1464	718	1699	—	Peak 2349 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1699 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
0.2		2916-2845	1464	718	1699	—	Peak 1699 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์
0.3		2931	2263 1493	728	1699	1072	Peak 2263 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1699 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1072 <i>trans</i> -vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.4		2982	2318	703	1840	1072	Peak 2318 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์

			1494				Peak 1840 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1072 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.5		2911-2845	2293 1461	715	1843	1006	Peak 2293 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1843 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1006 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
1		2911-2848	2313 1461	715	1840	1016 917	Peak 2313 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1840 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1016 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) และ Peak 917 terminal vinyl ( $-CH=CH_2$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
2		2911-2845	2293 1471	715	1843	1014	Peak 2293 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1843 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1014 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
3		2915-2845	2298 1461	715	—	1015	Peak 2298 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1015 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
4		2916-2848	2298 1464	718	—	1016	Peak 2298 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1016 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
5		2915-2848	2298 1461	718	—	1016	Peak 2298 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1016 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

#### 4.2.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล (Physical and Mechanical Properties)

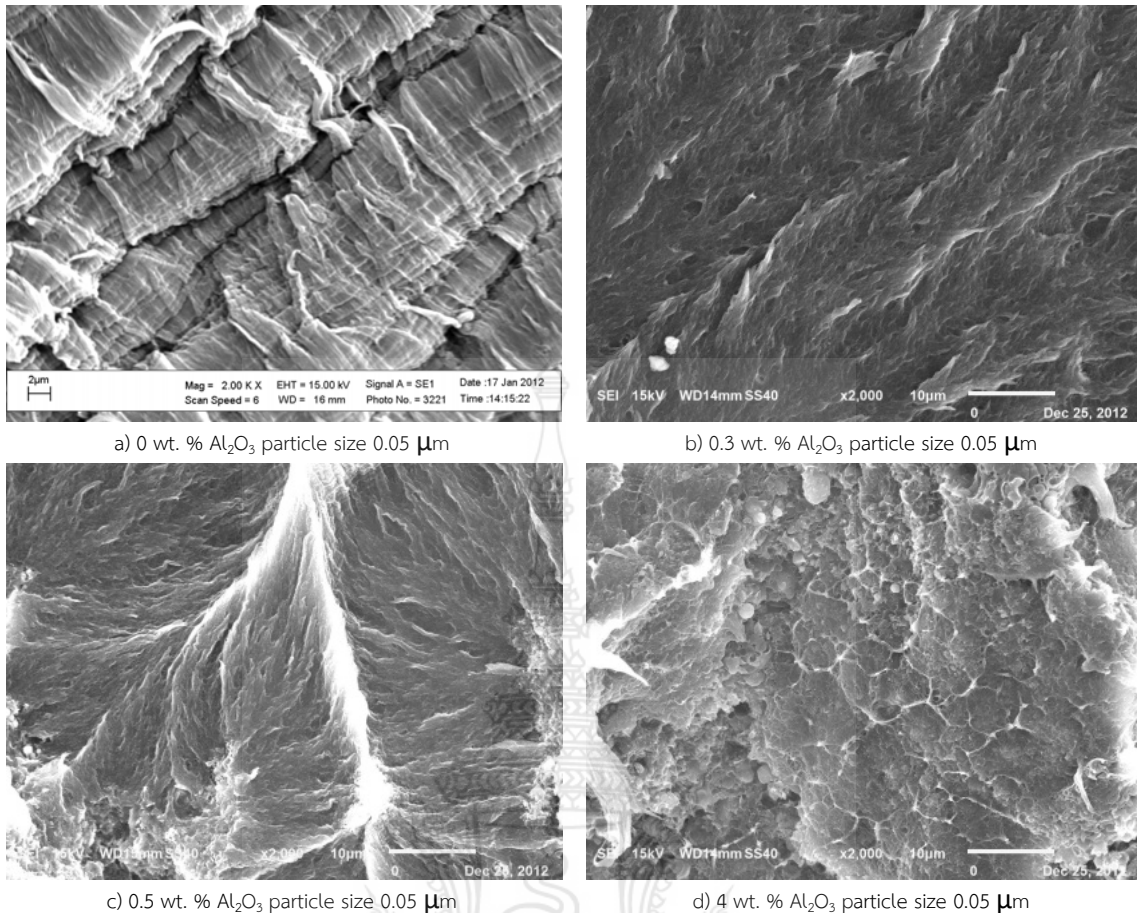
ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุก้อน UHMWPE มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 61.52% และปริมาณความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่อมีการผสม  $Al_2O_3$  particle size  $0.05 \mu m$  ซึ่งปริมาณการผสม  $Al_2O_3$  particle size  $0.05 \mu m$  ที่อัตราการผสมต่างๆ มีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 42-50 % ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.11 และจากการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงเปรียบเทียบกับค่าการดำเนินการทดลองต่างๆ ที่ได้ดำเนินการ พบว่า ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคของ  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผสม  $Al_2O_3$  particle size  $0.05 \mu m$  ส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง  $0.92-0.93 g/cm^3$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ

ตารางที่ 4.11 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.05 μm fraction (wt. %)	Degree of crystallinity, $\chi$ (%)	Density, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)		Ultimate Strength, $\sigma_u$ (MPa)		Breaking Strength, $\sigma_b$ (MPa)		Elongation, $\epsilon$ (MPa)		Hardness (Shore D)	
		Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD
0	61.52	0.93	0.01	20.43	1.21	28.33	1.53	24.67	0.76	285.60	6.41	66.27	1.01
0.1	47.56	0.92	0.01	21.17	3.40	32.93	3.09	27.40	3.81	262.00	8.67	66.60	0.93
0.2	43.91	0.92	0.01	24.63	2.97	33.67	1.26	26.33	2.93	224.83	10.97	66.77	1.01
0.3	44.47	0.92	0.01	23.17	3.55	34.73	2.80	26.77	2.40	229.00	6.09	66.83	1.70
0.4	45.65	0.92	0.01	21.90	1.77	31.40	3.67	27.20	2.42	220.93	10.85	66.98	0.77
0.5	45.42	0.93	0.01	21.67	1.61	25.60	2.16	24.40	1.04	223.47	16.86	67.05	1.13
1	50.11	0.93	0.01	20.80	2.65	25.00	4.33	22.93	4.33	217.27	1.54	67.23	1.30
2	44.65	0.93	0.01	20.83	2.52	23.37	3.87	21.77	2.56	217.93	9.53	67.32	1.31
3	46.42	0.93	0.01	19.33	2.36	26.33	3.06	23.70	1.92	224.47	6.26	67.67	1.37
4	45.53	0.93	0.01	18.17	2.52	21.33	2.84	19.67	2.08	219.23	3.27	67.77	1.55
5	42.24	0.93	0.01	14.00	4.27	22.07	2.93	18.83	4.16	213.10	10.45	67.90	1.40

ผลการศึกษาวិเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm พบว่า ปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm ด้วยปริมาณน้อยๆ ตั้งแต่ 0-0.5 wt. % ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างจุลภาคยังคงมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or flake pattern) คล้ายๆ กับการเชื่อมประสานติดกันของเม็ดสาคูเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านๆ มา ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.23 ที่เกิดจากการเชื่อมต่อประสานติดกันบริเวณขอบเกรนของเม็ดอนุภาคผง UHMWPE ที่ถูกกดอัดรีดให้ติดกันภายใต้อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa และทำให้เกิดการเย็นตัวทันทีในระหว่างการอัดรีดผ่านชุดตายเย็นที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 5 องศา อัตราการไหล 150 ลิตร/นาที แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm มีปริมาณตั้งแต่ 4 wt. % จะสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างจุลภาคและการสะสมก่อตัวเป็นกลุ่มเม็ดอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้อย่างชัดเจน ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.23 d) เนื่องจากเม็ดอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีขนาดใหญ่กว่าการทดลองที่ผ่านๆ มา และส่งผลทำให้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง

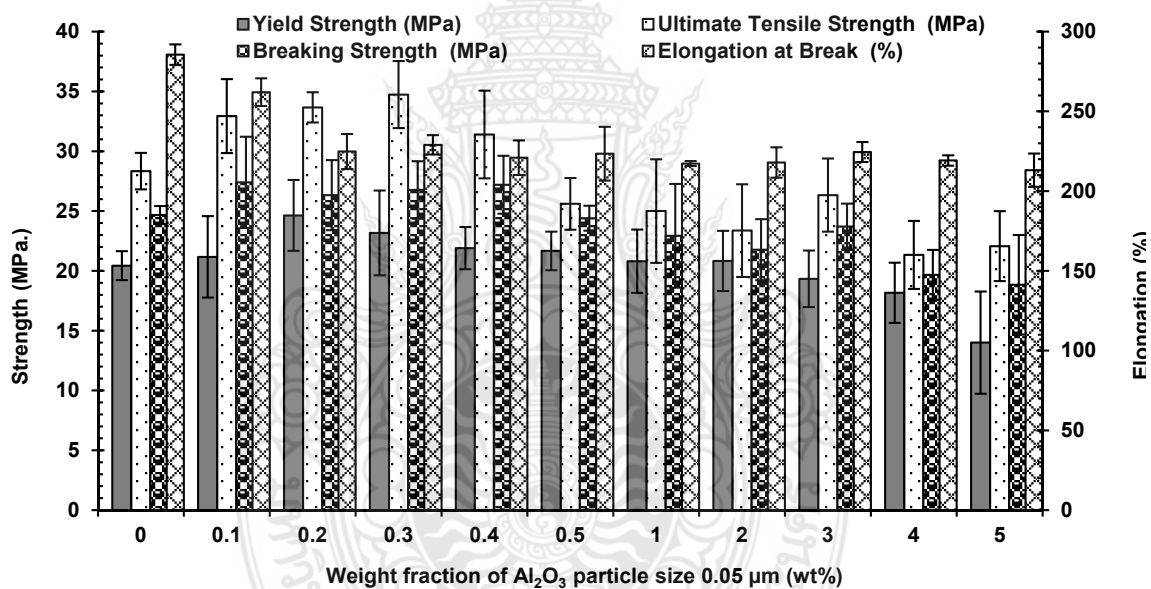
a) 0 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$ b) 0.3 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$ c) 0.5 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$ d) 4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$ 

**รูปที่ 4.23** โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชั้นทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง พบว่า ชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับ UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ ซึ่งสมบัติทางกลต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้น โดย Yield strength มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $24.63 \pm 2.97$  MPa ที่อัตราส่วนผสม 0.2 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  และ Ultimate tensile strength มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $34.73 \pm 2.80$  MPa ที่อัตราส่วนผสม 0.3 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  สำหรับในส่วนของค่า Elongation มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $262.00 \pm 8.67$  % ที่อัตราส่วนผสม 0.1 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชั้นทดสอบที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ และต่ำชั้นทดสอบที่มีการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofibers เนื่องจากอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ผสมเข้าไปมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านที่แสดงในหัวข้อที่ 4.3.2 และนอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้นกว่าที่กล่าวถึงในช่วง 0.2-0.3 wt. % มีผลทำให้สมบัติทางกลต่างๆ ของชั้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.24 และค่าที่แสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle

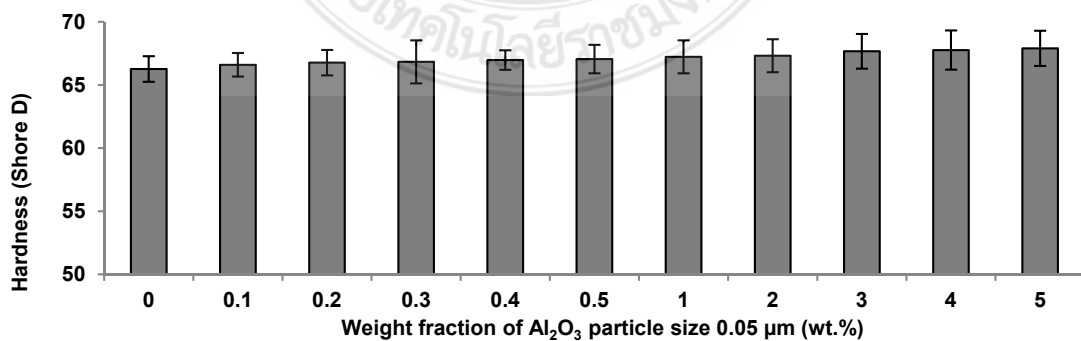
size  $0.05 \mu\text{m}$  ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงดึงควรมีปริมาณการผสมไม่เกิน 0.2-0.3 wt. % สำหรับในส่วนของผลการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง พบว่าปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $67.90 \pm 1.40$  shore D ดังกราฟแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งที่แสดงในรูปที่ 4.25 และตารางที่ 4.11

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ IR spectrum และปริมาณความเป็นผลึกพบว่า การเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีค่า Yield strength Ultimate tensile strength เพิ่มขึ้นในช่วงของปริมาณการผสม 0.2-0.3 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  แต่ elongation มีค่าลดลงเนื่องจากอิทธิพลของขนาดอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถยึดแน่นได้จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลง และนอกจากนี้ขนาดอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดใหญ่และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคยังมีผลต่อการลดลงของปริมาณความเป็นผลึกที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ทำให้สมบัติทางกลต่างๆ มีค่าลดลง



รูปที่ 4.24 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม

$\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$



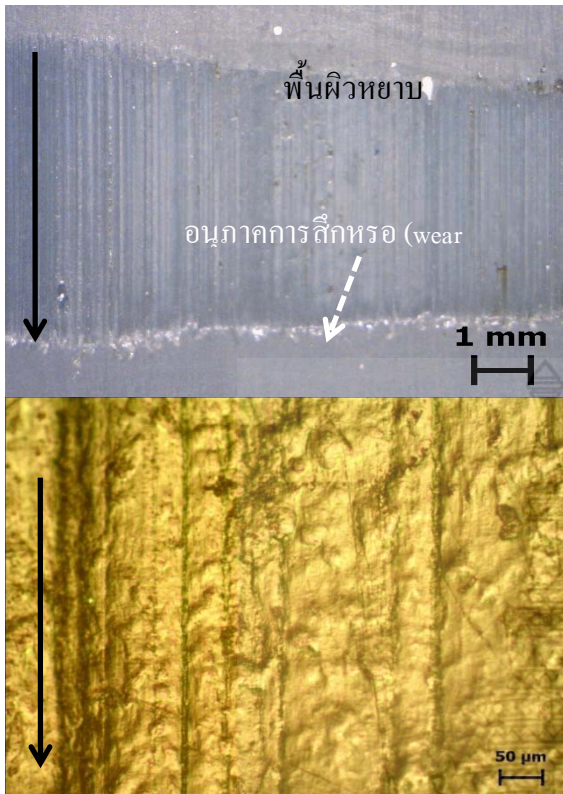
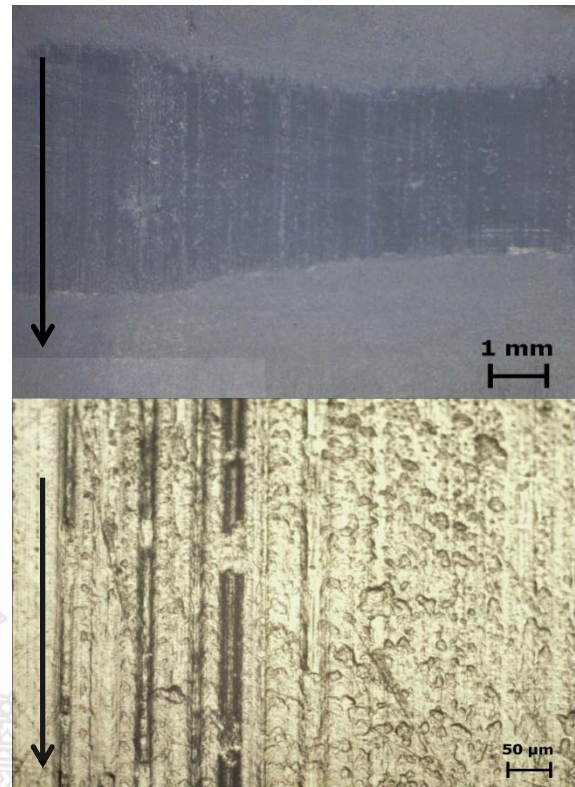
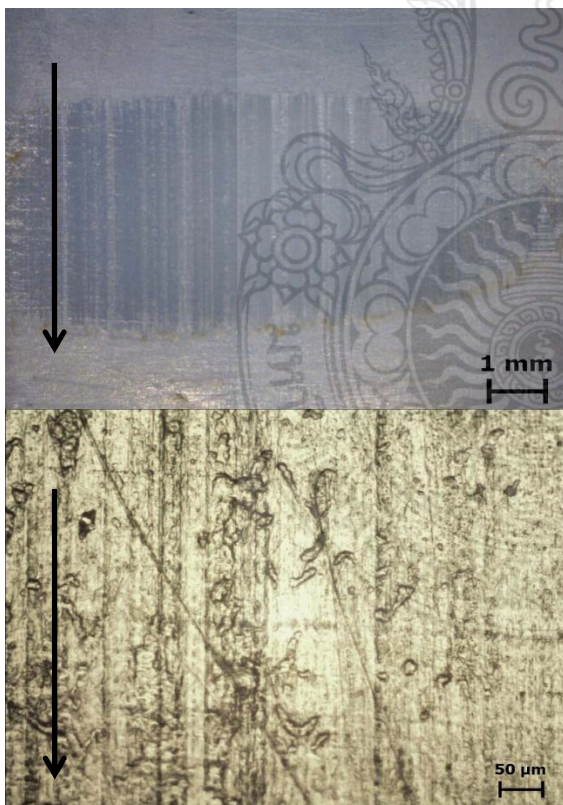
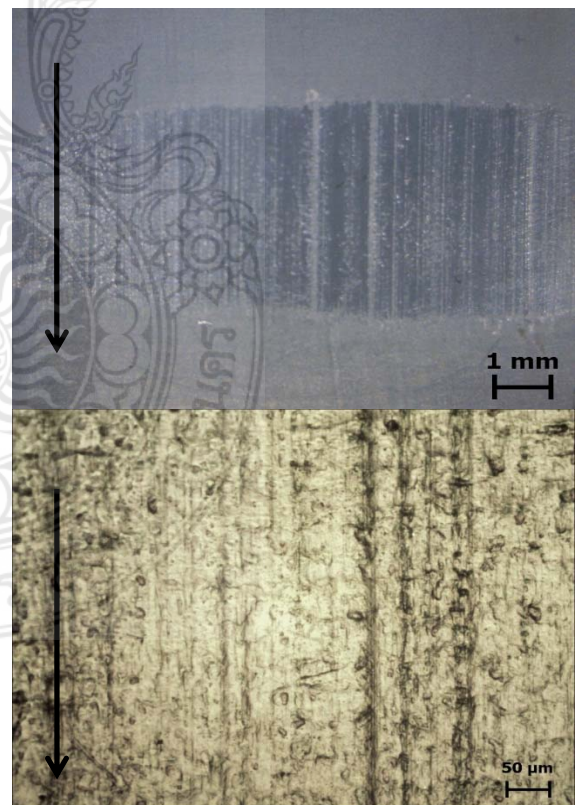
รูปที่ 4.25 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$

### 4.2.3 สมบัติทางด้านไทรโบโลยี (Tribological Properties)

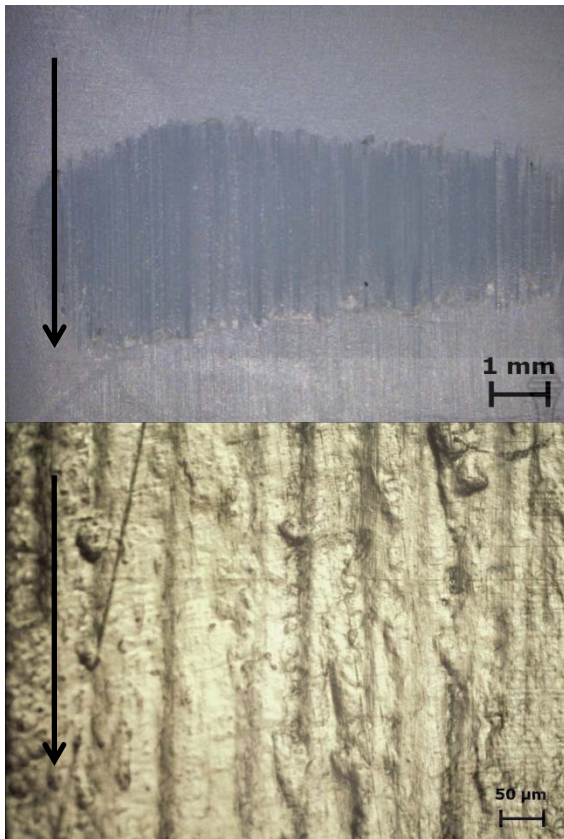
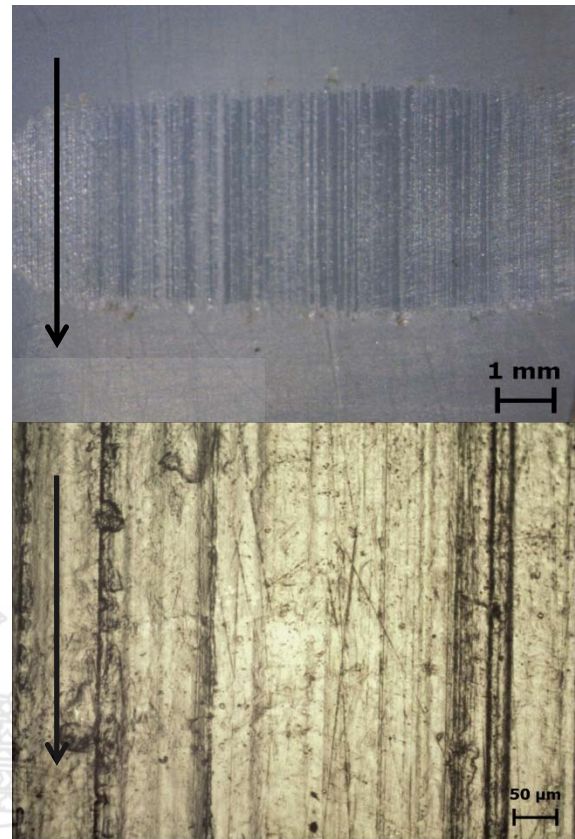
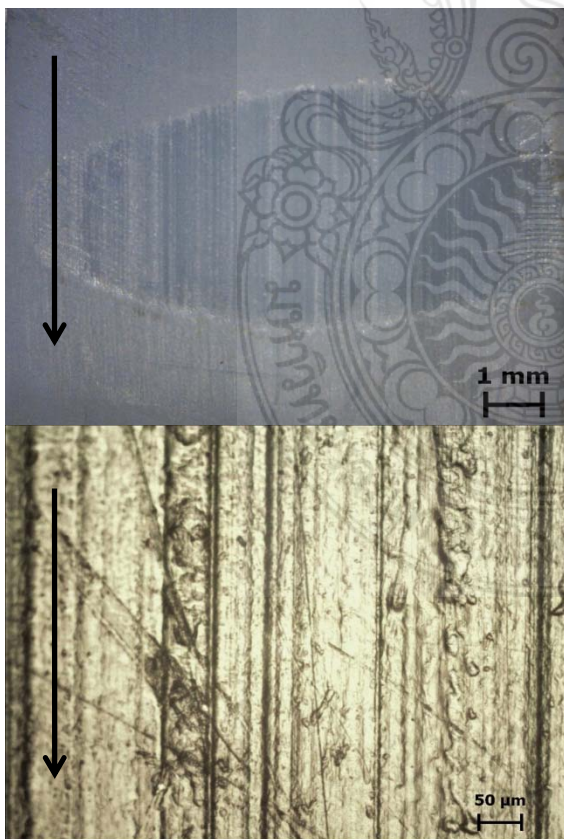
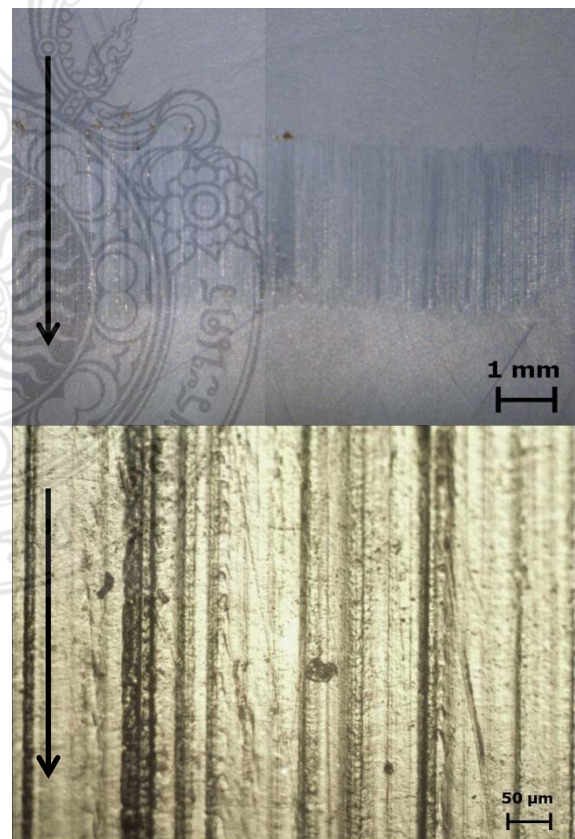
หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบด้วยระยะเวลาของการทดสอบ 180 นาที พบว่า ชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่รอยสึกหรอตามปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.26 และเมื่อวิเคราะห์พื้นที่รอยสึกหรอลงในรายละเอียดพื้นผิวรอยสึกหรอ พบว่า พื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ส่วนใหญ่มีลักษณะหยาบขรุขระจากพฤติกรรมการเฉือนฉีกพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่เกิดการเกาะยึดประสานติดกันออกจากชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้ยังพบร่องบนพื้นผิวของรอยสึกหรอที่เกิดจากการไถครูดลงในเนื้อพอลิเมอร์ตามทิศทางการไถล (ลูกศรเส้นเต็มสีดำ) ซึ่งจากหลักฐานที่ปรากฏทั้งหมดนี้ แสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบของการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) [5, 6]

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยีด้วยเครื่องมือต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าเท่ากันอยู่ในช่วง 0.12 โดยชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.12 และนอกจากนี้ยังมีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  โดยมีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $1.09 \pm 0.15 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $2.09 \times 10^{-9} \pm 3.39 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $0.79 \pm 0.05 \mu\text{m}$  ที่อัตราส่วนผสม 0.3 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  หลังจากนั้น ปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.12 และกราฟแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 4.26 ซึ่งจากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมีความสัมพันธ์กัน โดยชิ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน

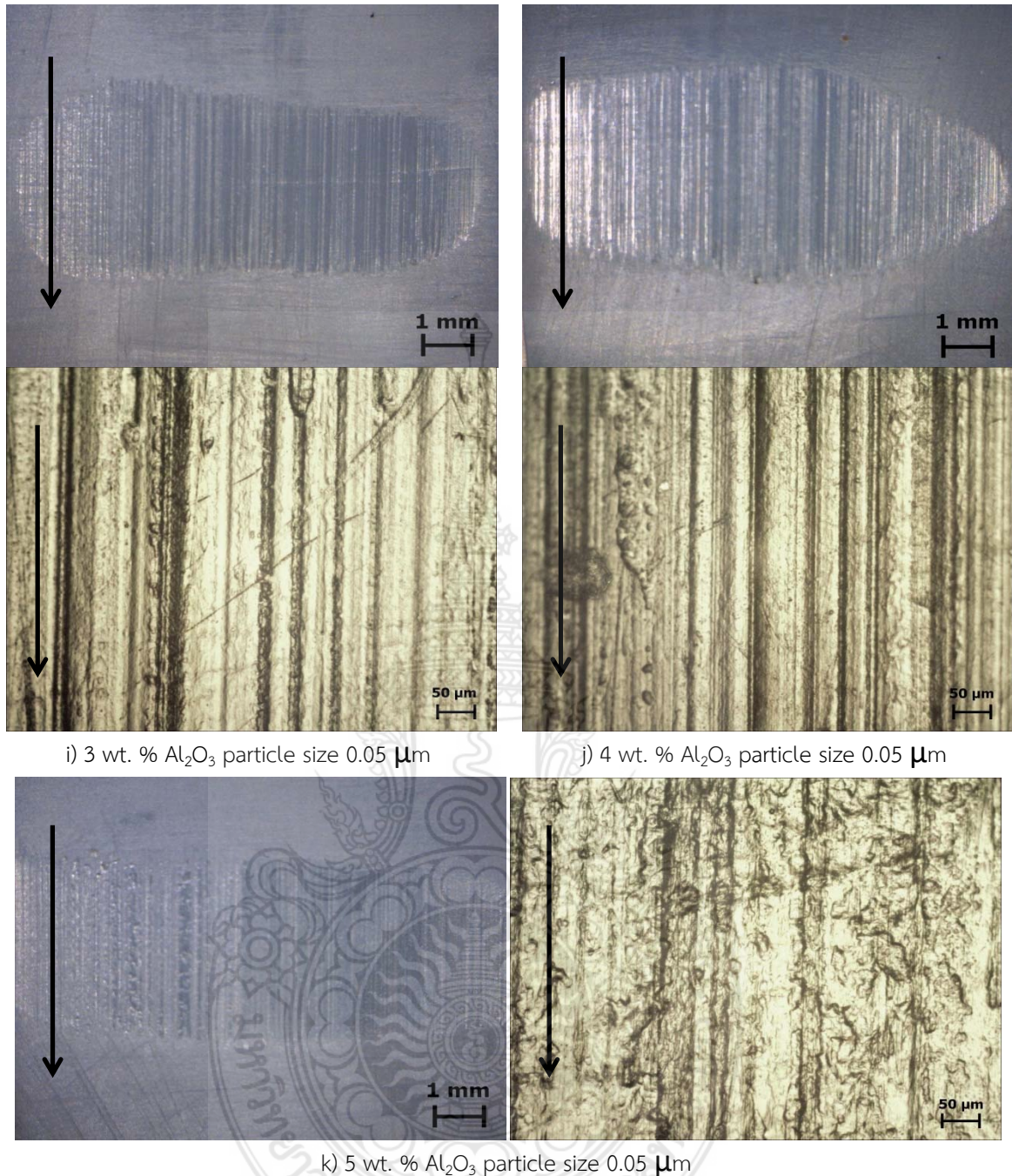


a) 0 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$ b) 0.1 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$ c) 0.2 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$ d) 0.3 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.05 \mu\text{m}$



e) 0.4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$ f) 0.5 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$ g) 1 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$ h) 2 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$



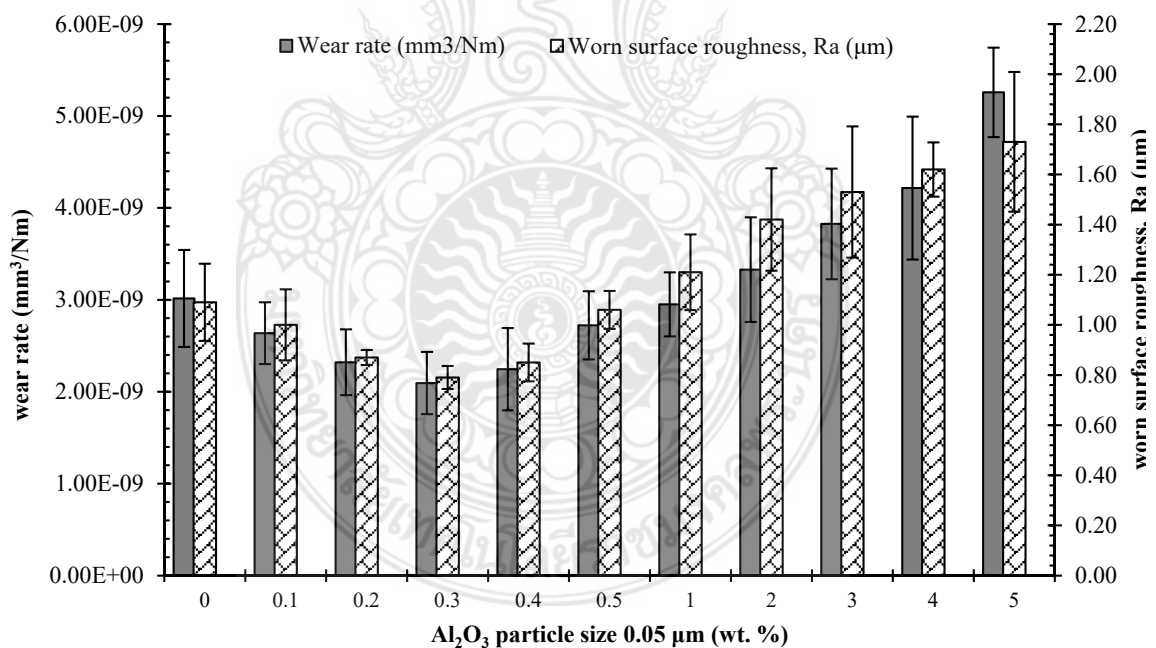


รูปที่ 4.26 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดเกิดการ Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่อยู่ในช่วง  $2263\text{-}2309\text{ cm}^{-1}$  และ  $1014\text{-}1622\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของหมู่  $(-\text{CH}_2-)$ , หมู่ vinyl  $(\text{C}=\text{C})$  ตามลำดับ ที่มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีสมบัติทางกลเพิ่มขึ้นและมีอัตราการสึกหรอลดต่ำลงแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$  ที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ บางชิ้นทดสอบยังพบพีคในช่วง  $1699\text{-}1843\text{ cm}^{-1}$  ของหมู่ carbonyl  $(\text{C}=\text{O})$  ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์เกิดขึ้นรวมอยู่ด้วยกัน

ตารางที่ 4.12 แสดงสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของชิ้นทดสอบวัสดุคู่กัน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$

$\text{Al}_2\text{O}_3$ particle size 0.05 $\mu\text{m}$ fraction (wt. %)	Coefficient of friction, $\mu$		Wear rate, K ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )		Worn surface Roughness, Ra ( $\mu\text{m}$ )	
	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
0	0.12	0.01	3.02E-09	5.27E-10	1.09	0.15
0.1	0.12	0.00	2.64E-09	3.36E-10	1.00	0.14
0.2	0.12	0.01	2.32E-09	3.58E-10	0.87	0.03
0.3	0.12	0.01	2.09E-09	3.39E-10	0.79	0.05
0.4	0.12	0.01	2.24E-09	4.48E-10	0.85	0.08
0.5	0.12	0.01	2.72E-09	3.71E-10	1.06	0.08
1	0.12	0.01	2.95E-09	3.48E-10	1.21	0.15
2	0.12	0.01	3.33E-09	5.69E-10	1.42	0.20
3	0.12	0.01	3.83E-09	6.02E-10	1.53	0.26
4	0.12	0.01	4.22E-09	7.78E-10	1.62	0.11
5	0.12	0.01	5.26E-09	4.87E-10	1.73	0.28



รูปที่ 4.27 อัตราการสึกหรอและความหยาบผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุคู่กัน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$

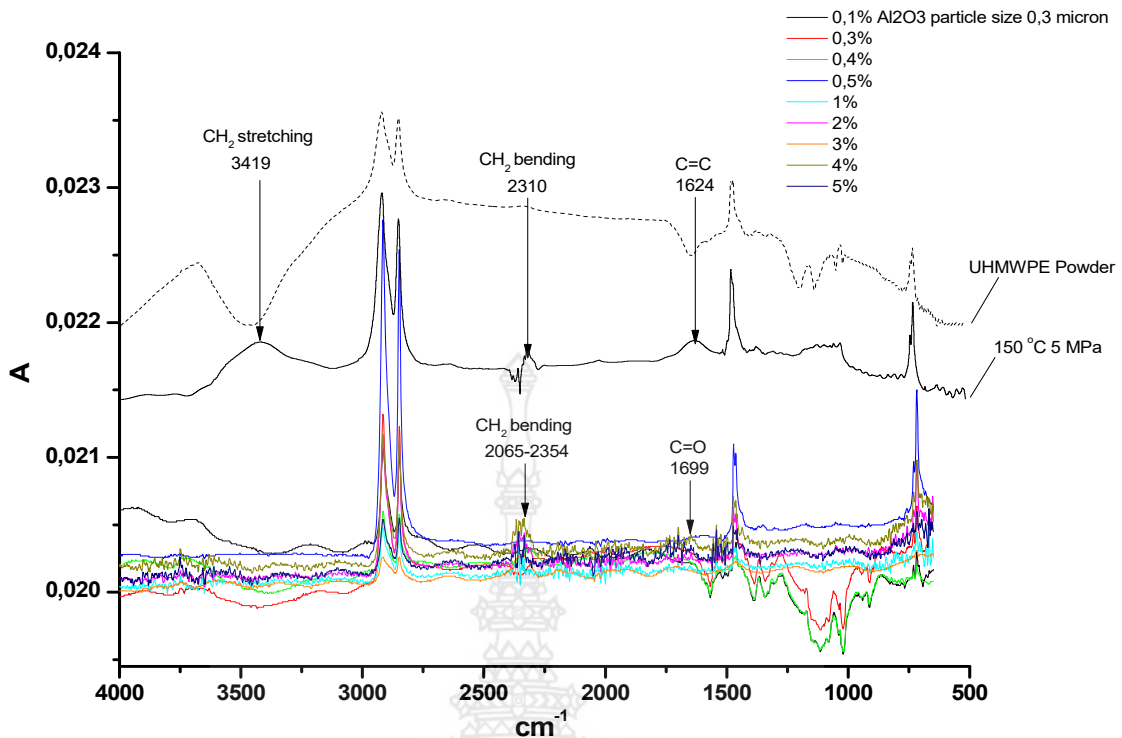
เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึก สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่าการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.05  $\mu\text{m}$  มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีปริมาณความเป็นผลึกและอัตราการสึก

หรือลดต่ำลง แต่สมบัติทางกลสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงไม่มีผลทำให้สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอลดลง ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่เป็นอิทธิพลมาจากขนาดอนุภาคของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา และนอกจากนี้สมบัติทางกลที่สูงขึ้นและอัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha [10] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์ที่มีค่า Ultimate tensile strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline microstructure) เพราะค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ จะหมายถึง ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไถลมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นบางๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส [10]

#### 4.3 ผลการทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบ UHMWPE ผสม $\text{Al}_2\text{O}_3$ particle size $0.3 \mu\text{m}$

##### 4.3.1 เอกลักษณะทางเคมี (Chemical characteristic)

จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ ขึ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.3 \mu\text{m}$  ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่ความดัน  $5 \text{ MPa}$  ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ  $30$  นาที พบว่า MWCNT มีผลทำให้พิกัดสัญญาณการดูดกลืนพลังงานของขึ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรายละเอียดผลการวิเคราะห์ที่มีลักษณะพิกัด IR spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.28 และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์พิกัดต่างๆ ที่ปรากฏ ดังตารางที่ 4.13 โดยพิกัดของขึ้นทดสอบส่วนใหญ่ที่ปรากฏมีสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ( $-\text{CH}_2-$ ) หมู่ vinyl ( $\text{C}=\text{C}$ ) และ trans-vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [4] และนอกจากนี้ยังมี carbonyl group ( $\text{C}=\text{O}$ ) ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีผลทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.3 \mu\text{m}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง IR spectrum ที่ทำให้เกิดพิกัดใหม่ๆ เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ UHMWPE จากการอัดรีดขึ้นรูป โดยปราศจากสารเติมแต่งใดๆ



รูปที่ 4.28 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.3 \mu\text{m}$

ตารางที่ 4.13 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.3 \mu\text{m}$

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size $0.3 \mu\text{m}$ fraction (wt. %)	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm <sup>-1</sup> )						หมายเหตุ
	-CH <sub>2</sub> - stretching	C-H stretching	-CH <sub>2</sub> - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
UHMWPE powder	3687	2918-2850	1464	719	—	—	
0	3419	2918-2850	2309 1471	718	—	1622	Peak 2309 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1622 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.1		2906-2840	2065 1471	715	—	988 923	Peak 2065 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 988 <i>trans</i> -vinylene (-R <sup>1</sup> CH=CHR <sup>2</sup> -) และ Peak 923 terminal vinyl (-CH=CH <sub>2</sub> ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.2		2906	2324 1472	778	—	927 920	Peak 2324 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 927 <i>trans</i> -vinylene (-R <sup>1</sup> CH=CHR <sup>2</sup> -) และ Peak 920 terminal vinyl (-CH=CH <sub>2</sub> ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.3		2915-2845	2323 1461	715	—	973 920	Peak 2323 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์



							Peak 973 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) และ Peak 920 terminal vinyl ( $-CH=CH_2$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.4		2915-2845	2308 1461	715	—	971 923	Peak 2308 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 971 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) และ Peak 923 terminal vinyl ( $-CH=CH_2$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.5		2915-2848	1471	715	—	—	
1		2911-2845	2354 1461	715	—	973 923	Peak 2354 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 973 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) และ Peak 923 terminal vinyl ( $-CH=CH_2$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
2		2911-2845	2349 1461	715	—	—	Peak 2349 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์
3		2911-2845	2339 1461	715	1699	973	Peak 2339 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1699 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 973 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
4		2911-2845	2339 1461	715	1699	973	Peak 2339 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1699 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 973 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
5		2911-2845	2354 1458	715	1699	973	Peak 2354 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1699 ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 973 <i>trans</i> -vinylene ( $-R^1CH=CHR^2-$ ) เกิดการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

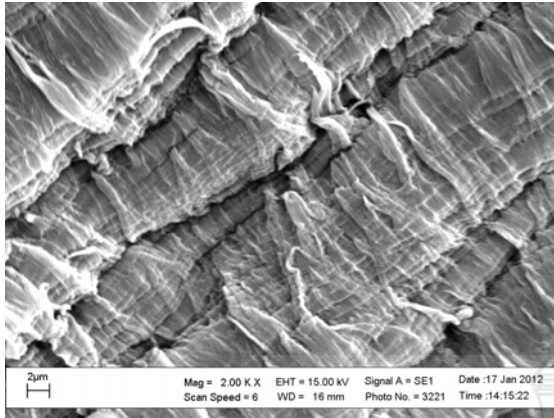
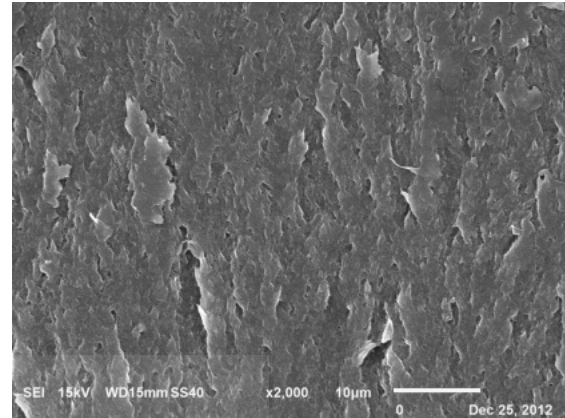
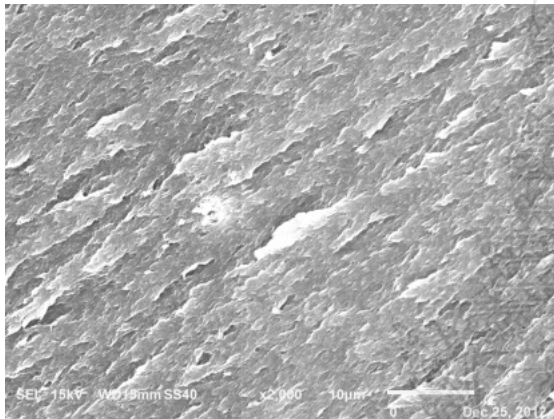
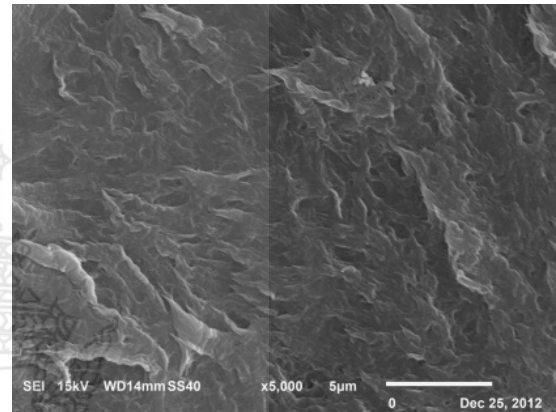
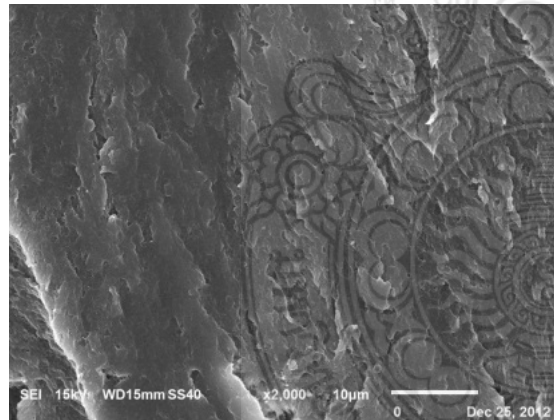
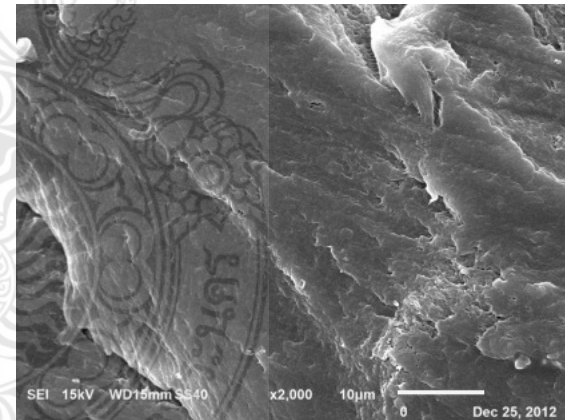
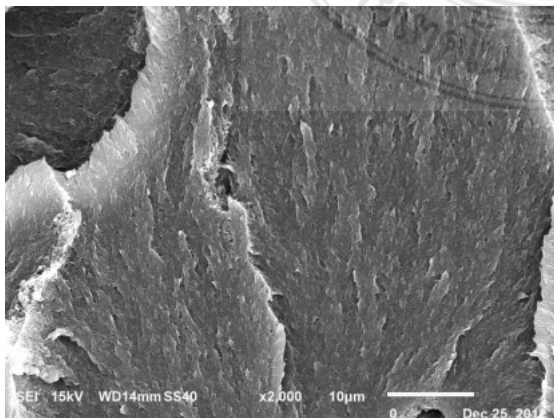
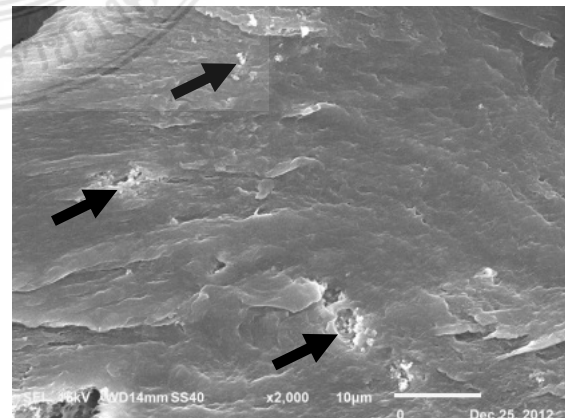
#### 4.3.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล (Physical and Mechanical Properties)

ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุก้อน UHMWPE มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.14 โดยวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 61.52% และปริมาณความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่อมีการผสม  $Al_2O_3$  particle size 0.3  $\mu m$  ซึ่งปริมาณการผสม  $Al_2O_3$  particle size 0.3  $\mu m$  ที่อัตราการผสมต่างๆ มีปริมาณความเป็นผลึกใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 41-48 % ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.14 และจากการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่างๆ ที่ได้ดำเนินการ พบว่า ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคของ  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 4.4.2 สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผสม  $Al_2O_3$  particle size 0.3  $\mu m$  ส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.92-0.93  $g/cm^3$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ

ตารางที่ 4.14 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3  $\mu$ m

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 0.3 $\mu$ m fraction (wt. %)	Degree of crystallinity, $\chi$ (%)	Density, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)		Ultimate Strength, $\sigma_u$ (MPa)		Breaking Strength, $\sigma_b$ (MPa)		Elongation, $\epsilon$ (MPa)		Hardness (Shore D)	
		Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD
0	61.52	0.93	0.01	20.43	1.21	28.33	1.53	24.67	0.76	285.60	6.41	66.27	1.01
0.1	43.57	0.92	0.01	22.33	1.96	28.30	1.00	23.43	0.95	253.33	9.65	66.43	0.82
0.2	43.34	0.92	0.01	21.17	2.89	26.27	0.46	21.97	3.07	254.20	6.01	66.63	0.93
0.3	41.27	0.92	0.01	21.17	2.08	26.20	1.01	23.03	2.25	247.90	4.83	66.87	1.61
0.4	44.63	0.92	0.01	21.93	0.51	25.40	0.69	23.10	0.62	267.67	22.03	66.88	0.74
0.5	43.56	0.93	0.01	20.00	2.18	24.93	0.67	21.60	1.01	219.93	22.83	66.98	1.07
1	44.15	0.93	0.01	18.87	1.63	24.20	0.36	20.03	1.42	215.54	29.23	67.07	0.98
2	44.35	0.93	0.01	17.93	2.90	23.30	1.47	20.33	2.67	251.88	29.07	67.15	1.04
3	44.29	0.93	0.01	18.17	1.04	23.93	0.64	22.40	0.96	211.83	24.82	67.43	1.01
4	47.82	0.93	0.01	18.20	0.52	24.30	0.80	20.70	2.41	237.13	33.35	67.67	1.45
5	48.17	0.93	0.01	11.43	2.25	22.63	0.93	18.83	1.15	230.46	35.49	68.03	1.40

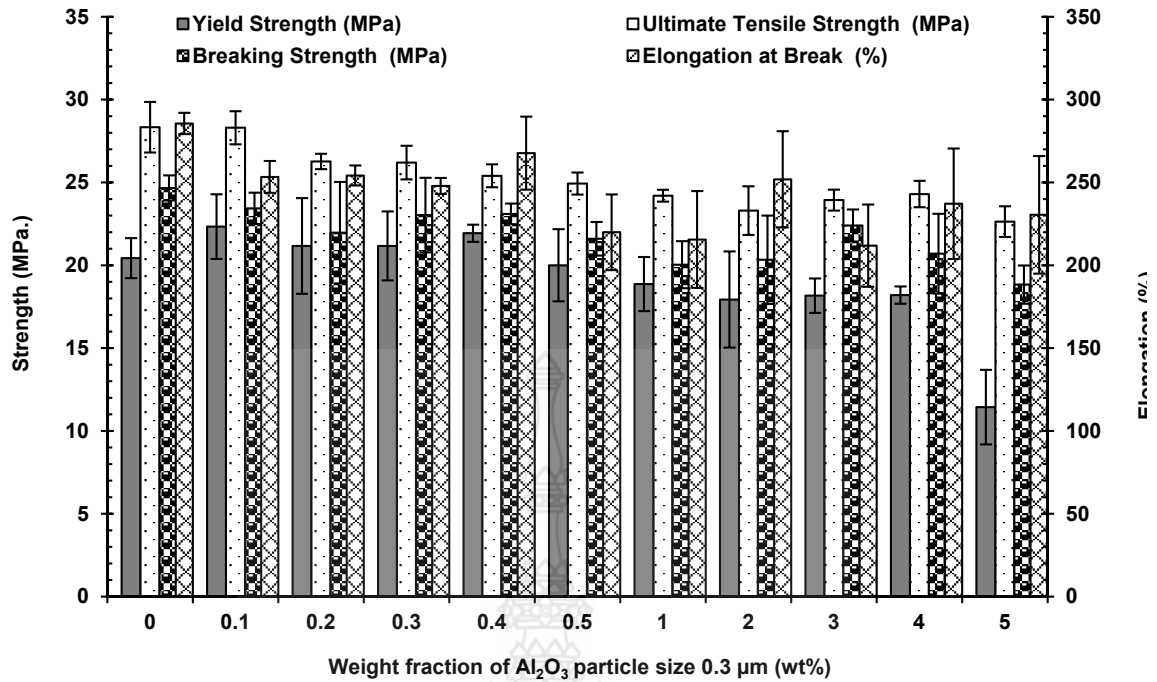
ผลการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3  $\mu$ m พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบมีลักษณะโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or flake pattern) ที่มีการเกาะยึดเชื่อมประสานกันอย่างไม่แข็งแรง โดยสามารถสังเกตเห็นได้จาก การที่โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นกลุ่มเกล็ดขนาดใหญ่แยกตัวออกจากโครงสร้างพื้น และนอกจากนี้บริเวณพื้นผิวของกลุ่มเกล็ดขนาดใหญ่มีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบมนคล้ายๆ กับไม่มีการเชื่อมประสานติดกันกับโครงสร้างพื้น เนื่องจากมีอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ชัดขวางไม่ให้เกิดการเชื่อมประสานติดกันดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.29 e)-h) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปที่ 4.29 h) ที่พื้นผิวโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบมนคล้ายๆ กับไม่มีการเชื่อมประสานติดกันกับโครงสร้างพื้นและนอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นเม็ดอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ได้อย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่สังเกตเห็นนี้มีลักษณะคล้ายๆ กับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับขบวนการ Vulcanization ของยางธรรมชาติจากการที่พื้นผิวสัมผัสของยางมีความสกปรกเนื่องจากมีฝุ่นละอองต่างๆ เข้าไปกั้นขวางระหว่างพื้นผิวสัมผัส

a) 0 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$ b) 0.3 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$ c) 0.4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$ d) 0.5 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$ e) 1 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$ f) 3 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$ g) 4 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$ h) 5 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$

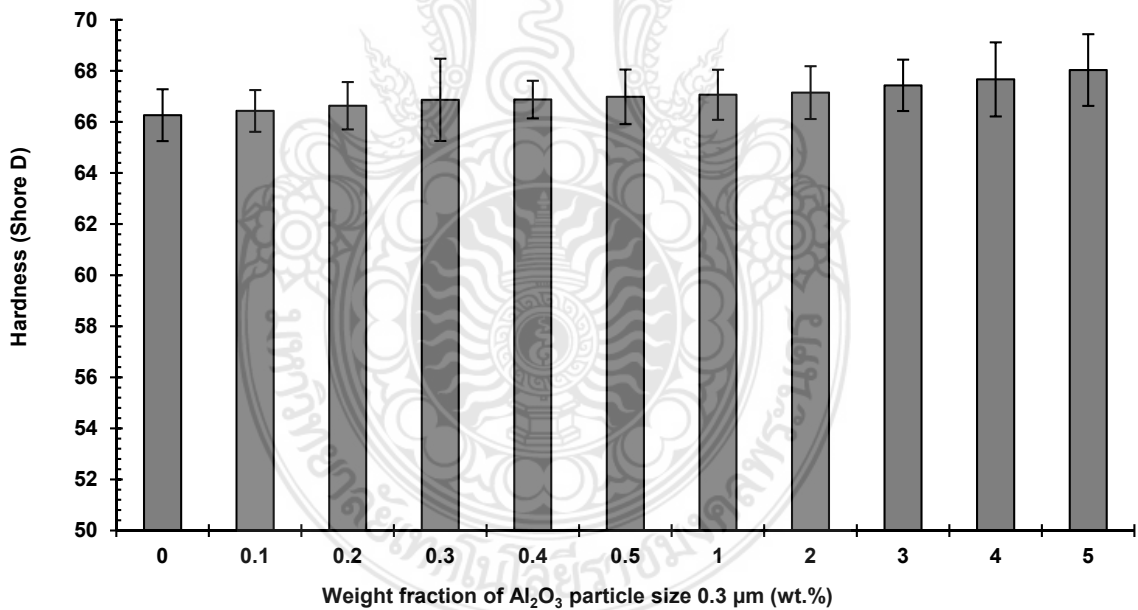
**รูปที่ 4.29** โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชั้นทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง พบว่า ชั้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับ UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ ซึ่งสมบัติทางกลต่างๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ที่เพิ่มขึ้น โดย Yield strength มีค่าสูงสุดเท่ากับ 24.63±2.97 MPa ที่อัตราส่วนผสม 0.1 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ซึ่งสูงกว่าชั้นทดสอบที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ สำหรับในส่วนของค่า Ultimate tensile strength และค่า Elongation มีค่าต่ำกว่าชั้นทดสอบที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 28.30±1.00 MPa และ 253.33±9.65 % ตามลำดับ ที่อัตราการผสม 0.1 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm และมีค่าต่ำชั้นทดสอบที่มีการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofibers และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.05 μm เนื่องจากอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ผสมเข้าไปมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรวดที่ผ่านที่แสดงในหัวข้อที่ 4.3.2 และ 4.4.2 และนอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.1 wt. % มีผลทำให้สมบัติทางกลต่างๆ ของชั้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.30 และค่าที่แสดงในตารางที่ 4.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงดึงควรมีปริมาณการผสมไม่เกิน 0.1 wt. % สำหรับในส่วนของผลการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง พบว่า ปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของชั้นทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 68.03±1.40 shore D ดังกราฟแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งที่แสดงในรูปที่ 4.31 และตารางที่ 4.14

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ IR spectrum และปริมาณความเป็นผลึก พบว่า การเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ มีผลทำให้ชั้นทดสอบมีค่า Yield strength เพิ่มสูงขึ้นในช่วงของปริมาณการผสม 0.1 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm แต่ Ultimate tensile strength และค่า Elongation มีค่าลดลงเนื่องจากอิทธิพลของขนาดอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถยืนยันได้จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลง และนอกจากนี้ขนาดอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีขนาดใหญ่และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคยังมีผลต่อการลดลงของปริมาณความเป็นผลึกที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ทำให้สมบัติทางกลต่างๆ มีค่าลดลง



รูปที่ 4.30 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

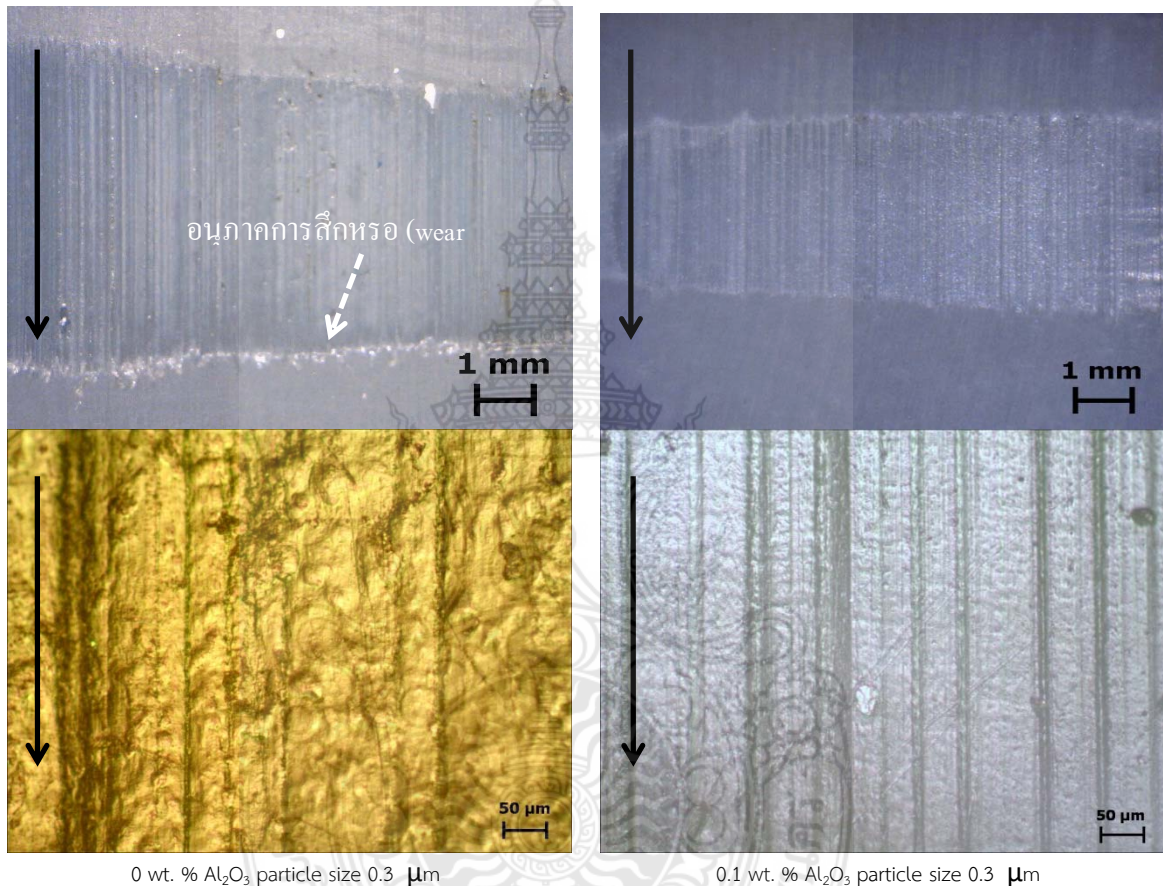


รูปที่ 4.31 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

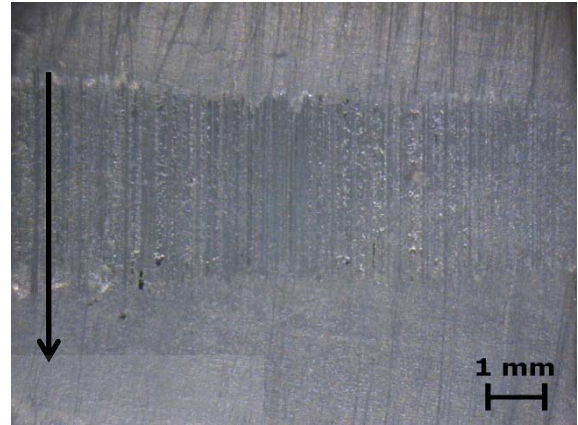
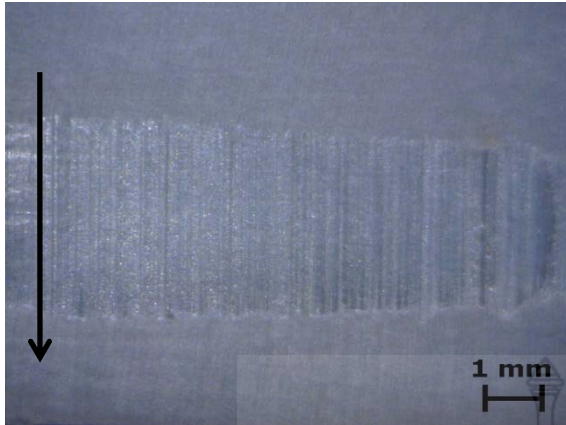
#### 4.3.3 สมบัติทางด้านไทรโบโลยี (Tribological Properties)

หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบด้วยระยะเวลาของการทดสอบ 180 นาที พบว่า ชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่รอยสึกหรอตามปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3

$\mu\text{m}$  ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.32 และเมื่อวิเคราะห์พื้นที่รอยสึกหรองลงในรายละเอียดพื้นผิวรอยสึกหรอพบว่า พื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.3 \mu\text{m}$  ส่วนใหญ่มีลักษณะหยาบขรุขระจากพฤติกรรมการเชื่อมฉีกพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่เกิดการเกาะยึดประสานติดกันออกจากชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้ยังพบร่องบนพื้นผิวของรอยสึกหรอที่เกิดจากการไถครูดลงไปเนื้อพอลิเมอร์ตามทิศทางการไถ (ลูกศรเส้นเต็มสีดำ) ซึ่งจากหลักฐานที่ปรากฏทั้งหมดนี้ แสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบของการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) [5, 6]

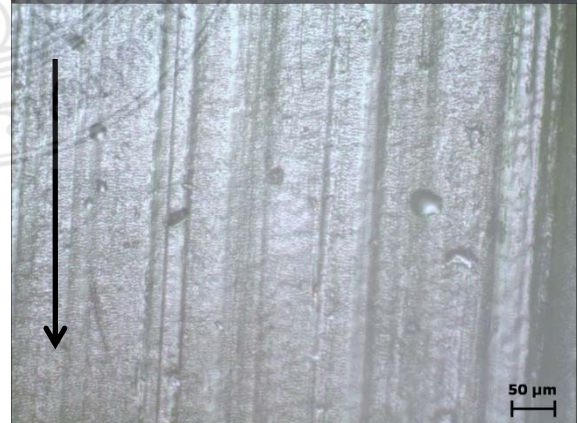
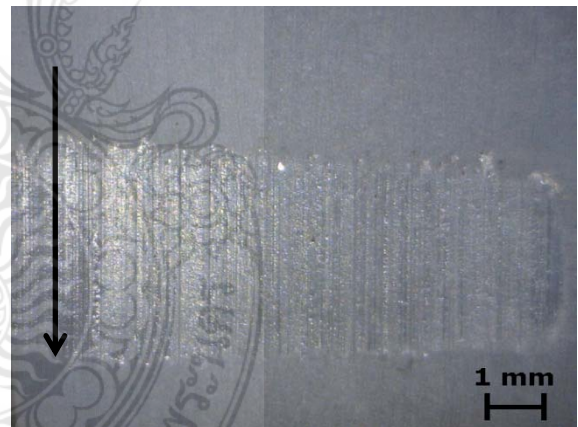






0.2 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

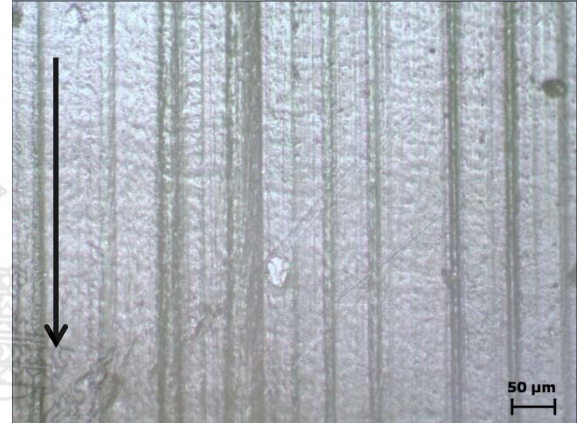
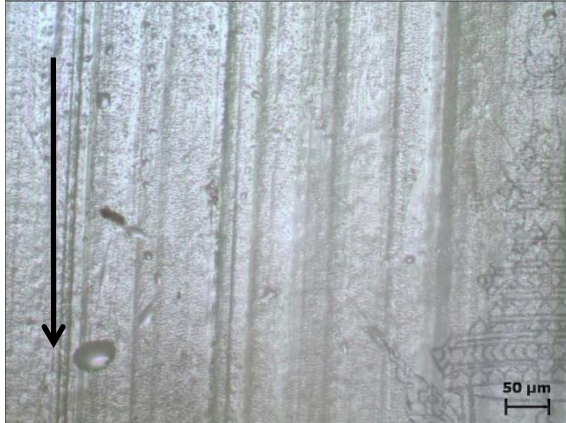
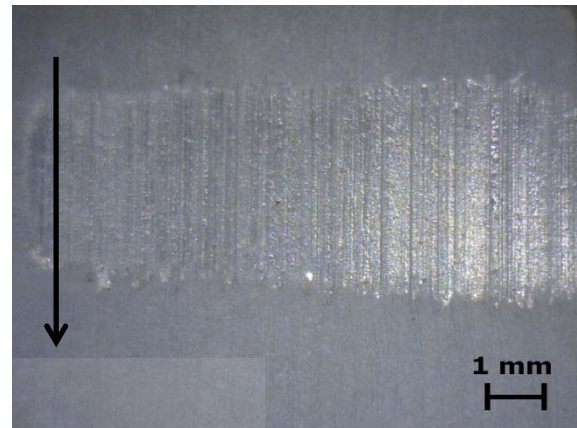
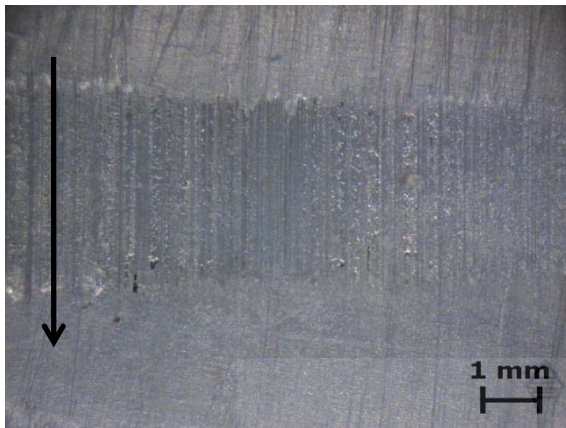
0.3 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm



0.4 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

0.5 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm





1 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

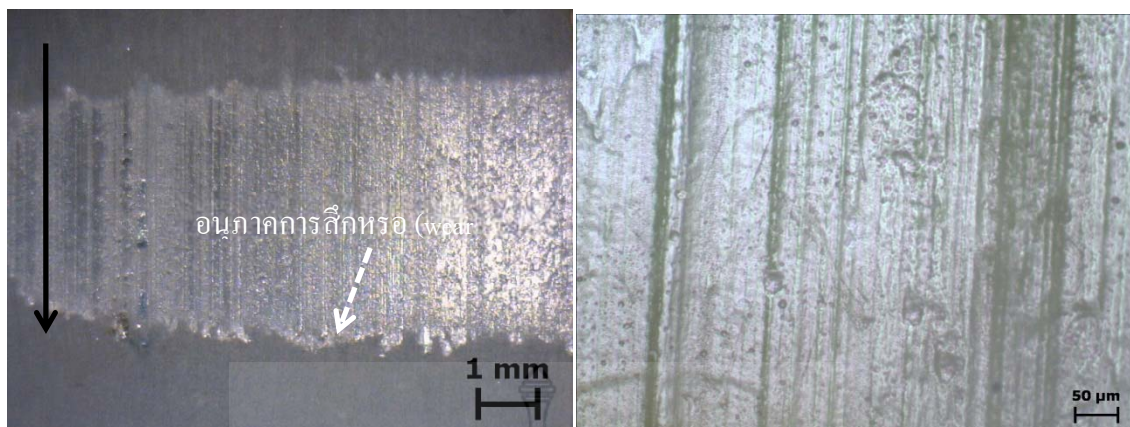
2 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm



3 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

4 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm



5 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

**รูปที่ 4.32** รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm

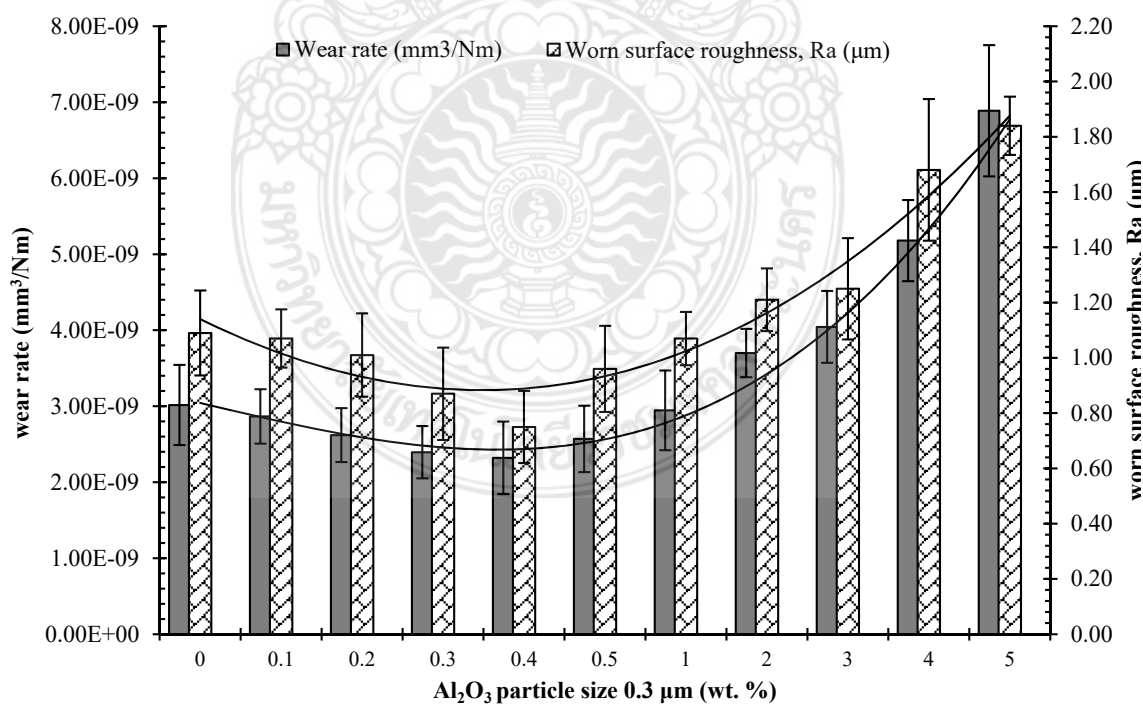
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านโทรโพลีด้วยเครื่องมือต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าเท่ากันอยู่ในช่วง 0.12 โดยชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.12 และนอกจากนี้ยังมีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm โดยมีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm และ  $1.09 \pm 0.15$  μm ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $2.32 \times 10^{-9} \pm 4.78 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm และ  $0.75 \pm 0.13$  μm ที่อัตราการผสม 0.4 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm หลังจากนั้น ปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.15 และกราฟแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 4.32 ซึ่งจากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมีความสัมพันธ์กัน โดยชิ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดเกิดการ Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่อยู่ในช่วง 2309-2354 cm<sup>-1</sup> และ 920-988 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (-CH<sub>2</sub>-), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ ที่มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีสมบัติทางกลเพิ่มขึ้นและมีอัตราการสึกหรอลดต่ำลงแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm ที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ บางชิ้นทดสอบ (3-5 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 0.3 μm) ยังพบพีคในช่วง

1699  $\text{cm}^{-1}$  ของหมู่ carbonyl (C=O) ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์เกิดขึ้นรวมอยู่ด้วยกัน

**ตารางที่ 4.15** แสดงสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$

$\text{Al}_2\text{O}_3$ particle size 0.3 $\mu\text{m}$ fraction (wt. %)	Coefficient of friction, $\mu$		Wear rate, K ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )		Worn surface Roughness, Ra ( $\mu\text{m}$ )	
	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
0	0.12	0.01	3.02E-09	5.27E-10	1.09	0.15
0.1	0.12	0.00	2.87E-09	3.59E-10	1.07	0.11
0.2	0.12	0.01	2.62E-09	3.56E-10	1.01	0.15
0.3	0.12	0.01	2.39E-09	3.45E-10	0.87	0.17
0.4	0.12	0.01	2.32E-09	4.78E-10	0.75	0.13
0.5	0.12	0.01	2.57E-09	4.37E-10	0.96	0.16
1	0.12	0.01	2.95E-09	5.25E-10	1.07	0.10
2	0.12	0.01	3.70E-09	3.18E-10	1.21	0.11
3	0.13	0.01	4.04E-09	4.73E-10	1.25	0.18
4	0.13	0.01	5.18E-09	5.34E-10	1.68	0.26
5	0.13	0.01	6.89E-09	8.63E-10	1.84	0.11



**รูปที่ 4.33** อัตราการสึกหรอและความหยาบผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม

$\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 0.3  $\mu\text{m}$

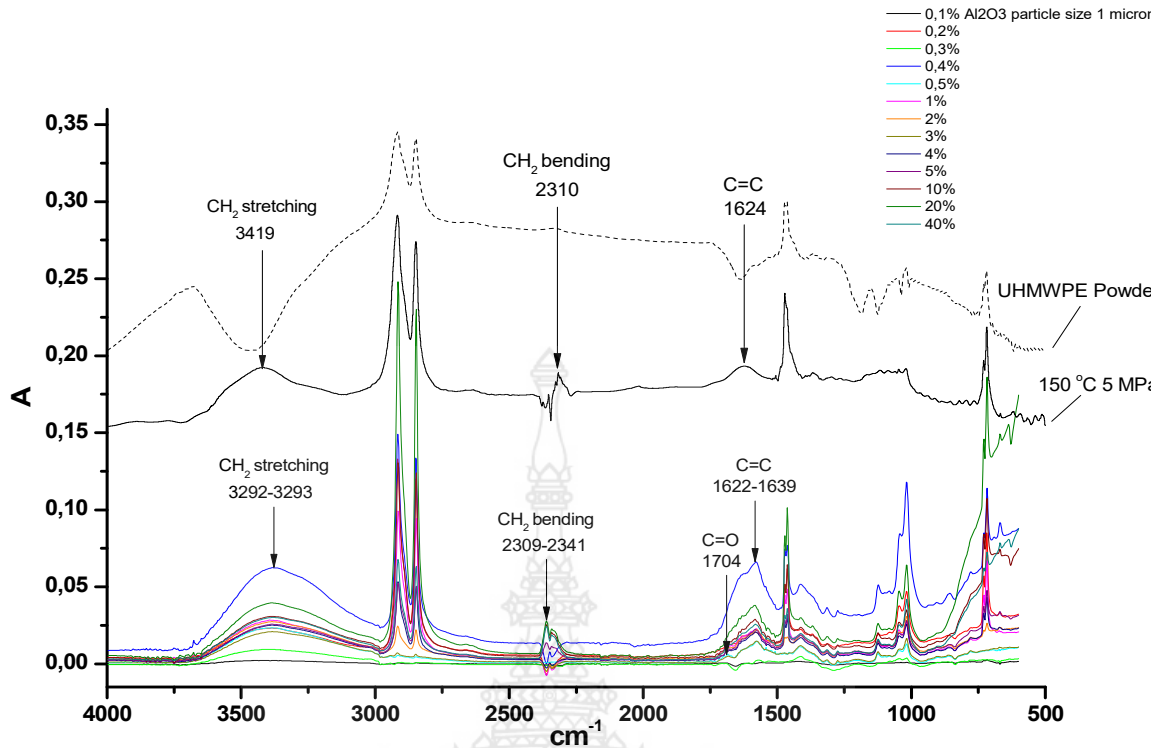
เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึก สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่าการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $0.3 \mu\text{m}$  มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีปริมาณความเป็นผลึกและอัตราการสึกหรอลดต่ำลง แต่สมบัติทางกลสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงไม่มีผลทำให้สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอลดลง ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่เป็นอิทธิพลมาจากขนาดอนุภาคของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านๆ มา และนอกจากนี้สมบัติทางกลที่สูงขึ้นและอัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha [10] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์ที่มีค่า Ultimate tensile strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline microstructure) เพราะค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ จะหมายถึง ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไถลมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นบางๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส [10]

#### 4.4 ผลการทดลองขึ้นรูปชิ้นทดสอบ UHMWPE ผสม $\text{Al}_2\text{O}_3$ particle size $1 \mu\text{m}$

##### 4.4.1 เอกลักษณ์ทางเคมี (Chemical characteristic)

จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ ชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $1 \mu\text{m}$  ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  ที่ความดัน  $5 \text{ MPa}$  ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ  $30$  นาที พบว่า MWCNT มีผลทำให้พิกัดสัญญาณการดูดกลืนพลังงานของชิ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรายละเอียดผลการวิเคราะห์ที่มีลักษณะพิกัด IR spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.34 และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์พิกัดต่างๆ ที่ปรากฏ ดังตารางที่ 4.16 โดยพิกัดของชิ้นทดสอบส่วนใหญ่ที่ปรากฏมีสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene ( $-\text{CH}_2-$ ) หมู่ vinyl ( $\text{C}=\text{C}$ ) และ trans-vinylene ( $-\text{R}^1\text{CH}=\text{CHR}^2-$ ) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [4] และนอกจากนี้ยังพบ carbonyl group ( $\text{C}=\text{O}$ ) ปฏิกริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ของชิ้นทดสอบ UHMWPE ผสม  $0.3 \text{ wt. } \% \text{ Al}_2\text{O}_3$  particle size  $1 \mu\text{m}$  ที่มีผลทำให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $1 \mu\text{m}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง IR spectrum ที่ทำให้เกิดพิกัดใหม่ๆ เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบ UHMWPE จากการอัดรีดขึ้นรูปโดยปราศจากสารเติมแต่งใดๆ





รูปที่ 4.34 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 μm

ตารางที่ 4.16 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของชิ้นทดสอบวัสดุ ก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 μm

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 1 μm fraction (wt. %)	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm <sup>-1</sup> )						หมายเหตุ
	-CH <sub>2</sub> - stretching	C-H stretching	-CH <sub>2</sub> - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
UHMWPE powder	3687	2918-2850	1464	719	—	—	
0	3419	2918-2850	2309 1471	718	—	1622	Peak 2309 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1622 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.1	3292	2913-2846	<u>2169</u> 1469	718	-	<u>1639</u>	Peak 2169 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.2	3292	2915-2848	<u>2342</u> 1462	718	-	<u>1639</u>	Peak 2342 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.3	3293	2915-2848	1462	719	<u>1704</u>		Peak 1704 เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์

0.4	3293	2915- 2848	<u>2342</u> 1462	717	-	<u>1639</u>	Peak 2342 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.5	3293	2915- 2848	1462	717	-	<u>1639</u>	Peak 2342 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
1	3293	2913- 2847	<u>2342</u> 1462	718	-	<u>1639</u>	Peak 2342 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
2	3293	2915- 2848	1462	717	-	<u>1639</u>	Peak 1622 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
3	3293	2917- 2848	<u>2342</u> 1462	718	-	<u>1639</u>	Peak 2342 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
4	3293	2914- 2847	<u>2342</u> 1462	718	-	<u>1639</u>	Peak 2342 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
5	3293	2913- 2846	<u>2342</u> 1462	719	-	<u>1639</u>	Peak 2342 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
10	3293	2914- 2847	<u>2341</u> 1462	718	-	<u>1639</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
20	3293	2914- 2847	<u>2341</u> 1462	718	-	<u>1639</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
40	3293	2914- 2847	<u>2341</u> 1462	718	-	<u>1639</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

#### 4.4.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล (Physical and Mechanical Properties)

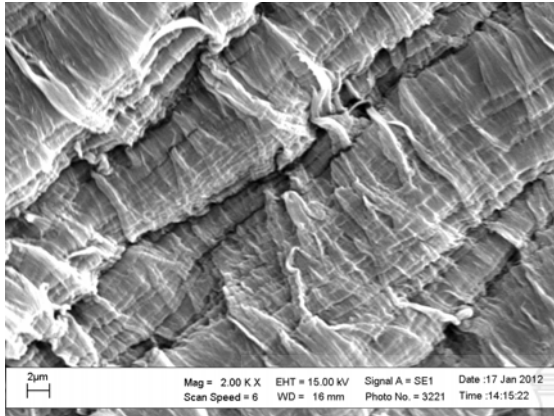
ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุก้อน UHMWPE มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.17 โดยวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 61.52% และปริมาณความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่อมีการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  โดยปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผกผันกับปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้น ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.17 และจากการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงเปรียบเทียบกับผลการทดลองต่างๆ ที่ได้ดำเนินการในการทดลองที่ผ่านมา พบว่า ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 4.4.2 และ 4.5.2 และนอกจากนี้ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงมีสาเหตุมาจากปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชิ้นทดสอบที่ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  ส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.92-0.94  $\text{g/cm}^3$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ

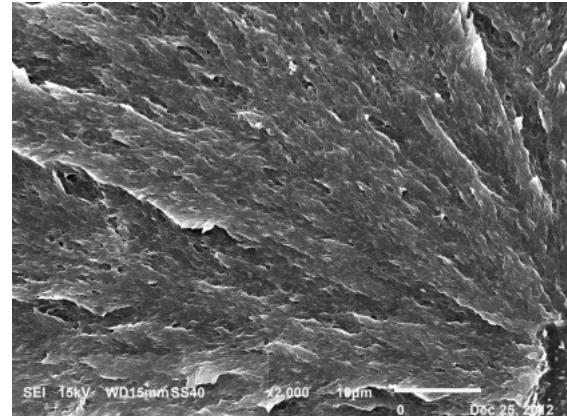
ตารางที่ 4.17 แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1  $\mu$ m

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 1 $\mu$ m fraction (wt. %)	Degree of crystallinity, $\chi$ (%)	Density, $\rho$ ( g/cm <sup>3</sup> )		Yield Strength, $\sigma_y$ ( MPa)		Ultimate Strength, $\sigma_u$ ( MPa)		Breaking Strength, $\sigma_b$ ( MPa)		Elongation, $\epsilon$ ( MPa)		Hardness (Shore D)	
		Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD
0	61.52	0.93	0.01	20.43	1.21	28.33	1.53	24.67	0.76	285.60	6.41	66.27	1.01
0.1	56.73	0.92	0.01	22.00	1.80	28.52	0.98	25.76	2.44	269.21	8.02	66.40	0.81
0.2	56.10	0.92	0.01	22.03	2.00	28.54	1.03	23.90	0.35	272.53	9.76	66.67	0.88
0.3	56.83	0.92	0.01	22.10	1.64	29.61	1.51	25.78	0.76	279.11	5.98	66.80	0.89
0.4	58.20	0.92	0.01	23.73	0.93	28.54	1.83	26.72	1.04	268.31	6.99	66.84	0.71
0.5	54.33	0.93	0.01	24.43	1.67	28.59	1.59	25.78	2.23	272.22	6.78	66.98	0.93
1	55.27	0.93	0.01	23.93	1.89	26.77	1.20	25.60	1.25	296.54	7.51	67.07	0.91
2	47.20	0.93	0.01	21.92	1.15	23.99	2.43	22.87	1.81	275.56	25.31	67.08	0.94
3	46.40	0.93	0.01	20.17	1.15	22.72	1.67	21.87	1.02	289.06	24.00	67.40	0.97
4	46.43	0.93	0.01	19.58	0.72	23.78	0.55	22.92	1.21	271.11	31.40	67.72	1.36
5	47.34	0.93	0.01	19.28	0.98	23.32	0.37	22.83	0.23	271.01	23.56	67.97	1.40
10	41.08	0.94	0.01	18.63	1.15	22.73	1.87	21.39	1.99	252.33	3.14	68.20	1.45
20	39.13	0.94	0.01	18.74	1.98	22.54	1.31	21.60	2.01	230.45	32.51	68.82	1.52
40	31.72	0.94	0.01	11.87	2.12	18.55	2.99	13.76	2.26	224.25	10.32	68.97	1.52

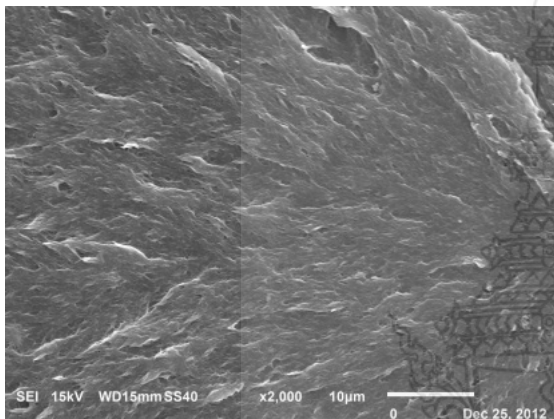
ผลการศึกษาวិเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1  $\mu$ m พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or flake pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ซึ่งปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1  $\mu$ m ด้วยปริมาณน้อยๆ ในช่วง 0.1-1 wt. % ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของ UHMWPE เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคยังคงมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด แต่จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคได้เมื่อมีปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1  $\mu$ m ตั้งแต่ 5 wt. % ดังลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายตัวของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> แยกออกจากโครงสร้างพื้น ที่แสดงในรูปที่ 4.35 g) และนอกจากนี้ บางบริเวณของโครงสร้างจุลภาค ยังพบการจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.35 g) และพบการกระจายตัวเป็นกลุ่ม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อย่างหนาแน่นในชั้นทดสอบที่มีปริมาณ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตั้งแต่ 20 wt. % ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.35 i)



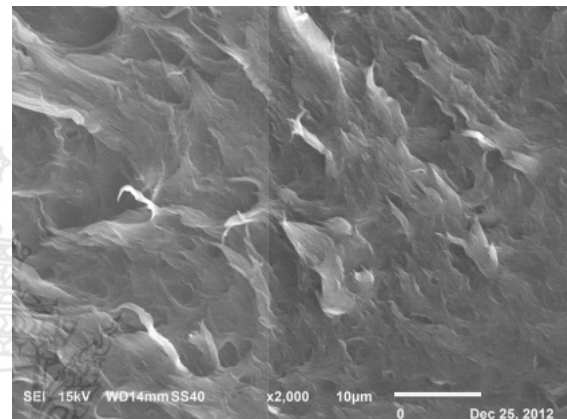
a) 0 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$



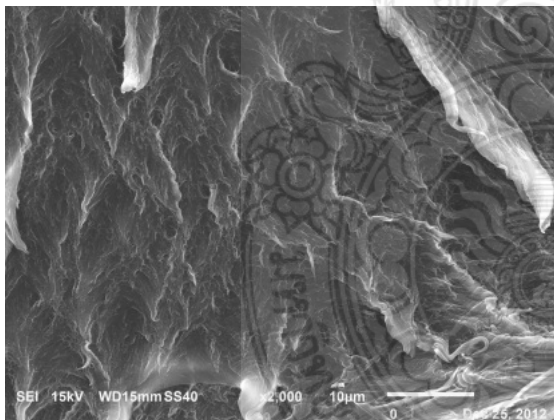
b) 0.1 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$



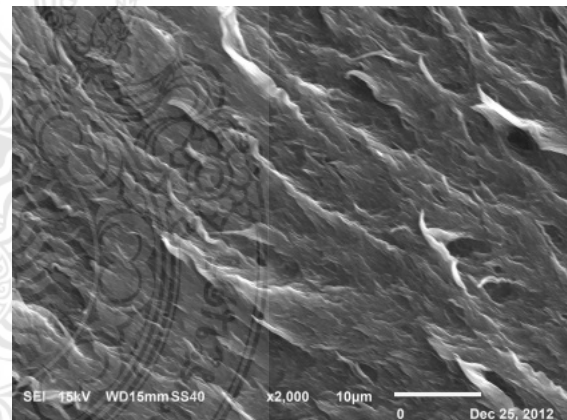
c) 0.3 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$



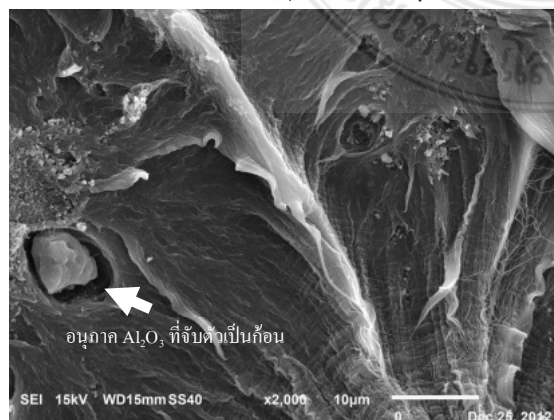
d) 0.4 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$



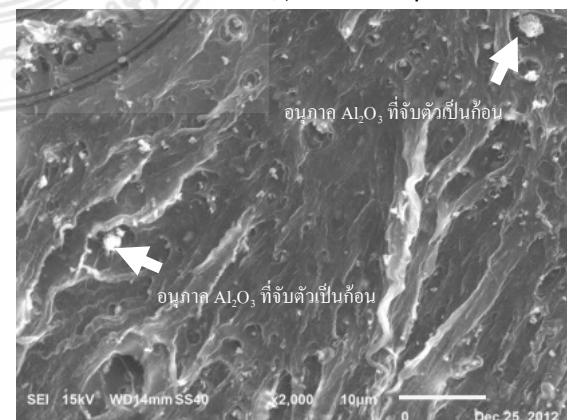
e) 0.5 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$



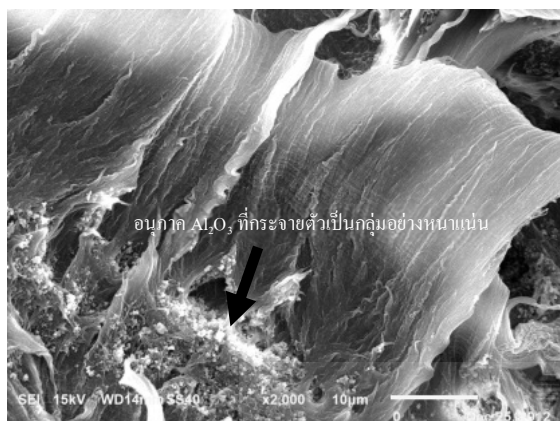
f) 1 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$



g) 5 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$



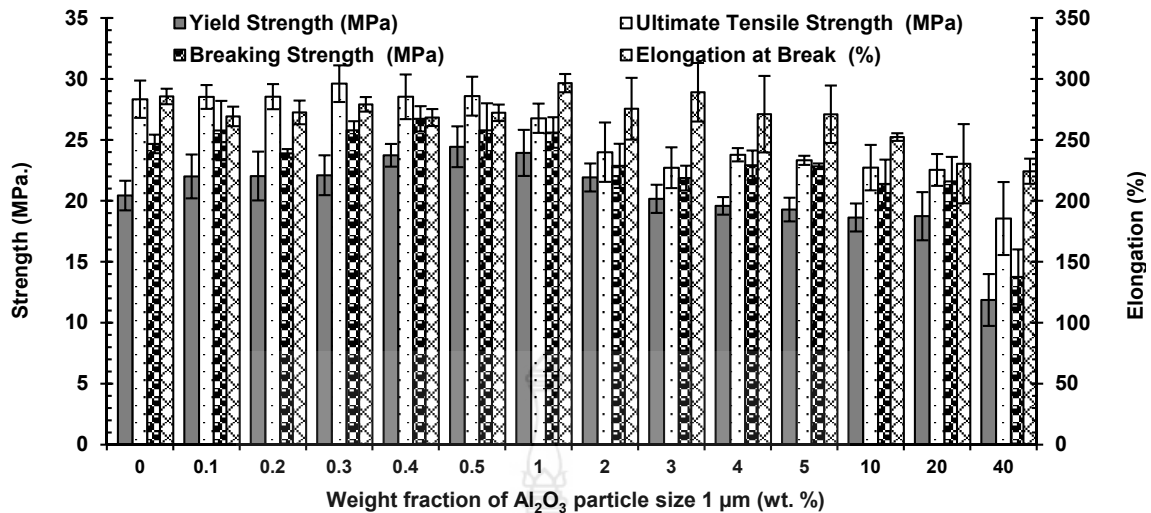
h) 10 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$

i) 20 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µmj) 40 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm

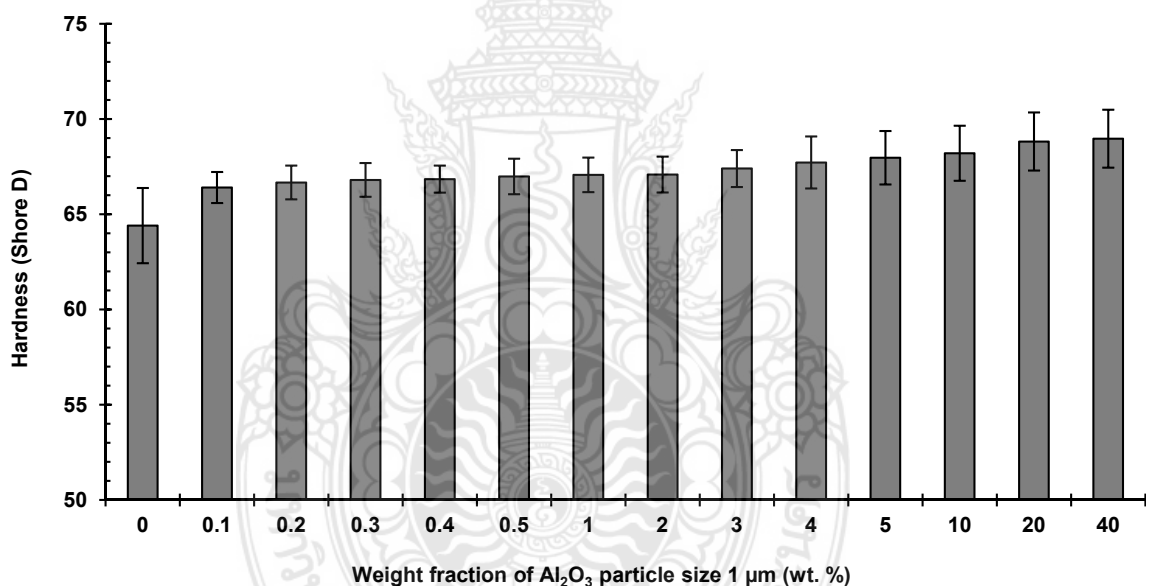
### รูปที่ 4.35 โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชั้นทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง พบว่า ชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับ UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ ซึ่งสมบัติทางกลต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm ที่เพิ่มขึ้น โดย Yield strength และ Ultimate tensile strength มีค่าสูงสุดเท่ากับ 24.73±1.67 MPa และ 28.59±1.59 MPa ตามลำดับ ที่อัตราส่วนผสม 0.5 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm ซึ่งสูงกว่าชั้นทดสอบที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ สำหรับในส่วนของค่า Elongation มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกัน โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 296.54±7.51 % ที่อัตราการผสม 1 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm หลังจากนั้นปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm ที่เพิ่มขึ้นสูงกว่า 0.5 wt. % มีผลทำให้สมบัติทางกลต่างๆ ของชั้นทดสอบจากการทดสอบแรงดึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.36 และค่าที่แสดงในตารางที่ 4.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size size 1 µm ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการรับแรงดึงควรมีปริมาณการผสมไม่เกิน 0.5-1 wt. % สำหรับในส่วนของผลการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง พบว่า ปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size size 1 µm ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของชั้นทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 68.97±1.52 shore D ดังกราฟแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งที่แสดงในรูปที่ 4.37 และตารางที่ 4.17





รูปที่ 4.36 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 μm



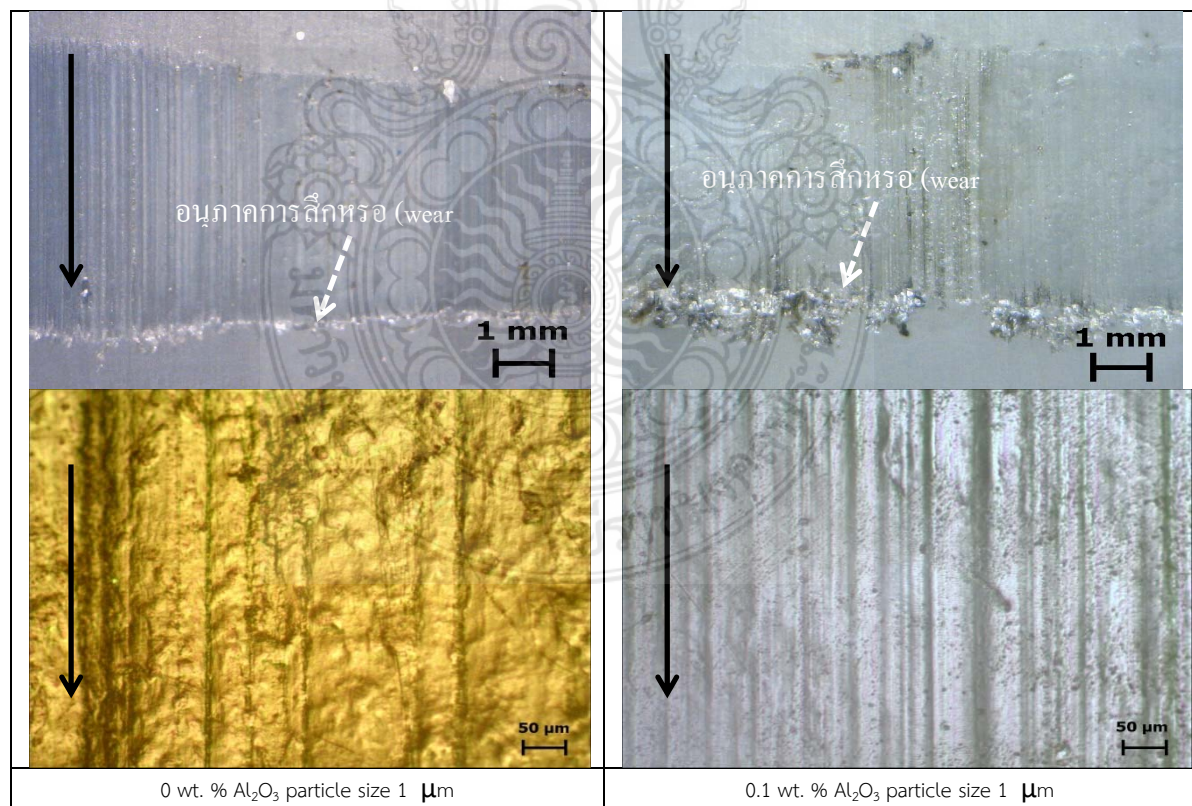
รูปที่ 4.37 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 μm

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ IR spectrum และปริมาณความเป็นผลึกพบว่า การเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีค่า Yield strength Ultimate tensile strength และ Elongation มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในช่วงของปริมาณการผสม 0.1-1 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 μm และนอกจากนี้การเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ยังมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเกาะยึดเชื่อมประสานกันอย่างแข็งแรง ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลต่างๆ โดยสามารถยืนยันได้จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แสดงดังรูปที่ 4.35a-f) สำหรับในส่วนของ

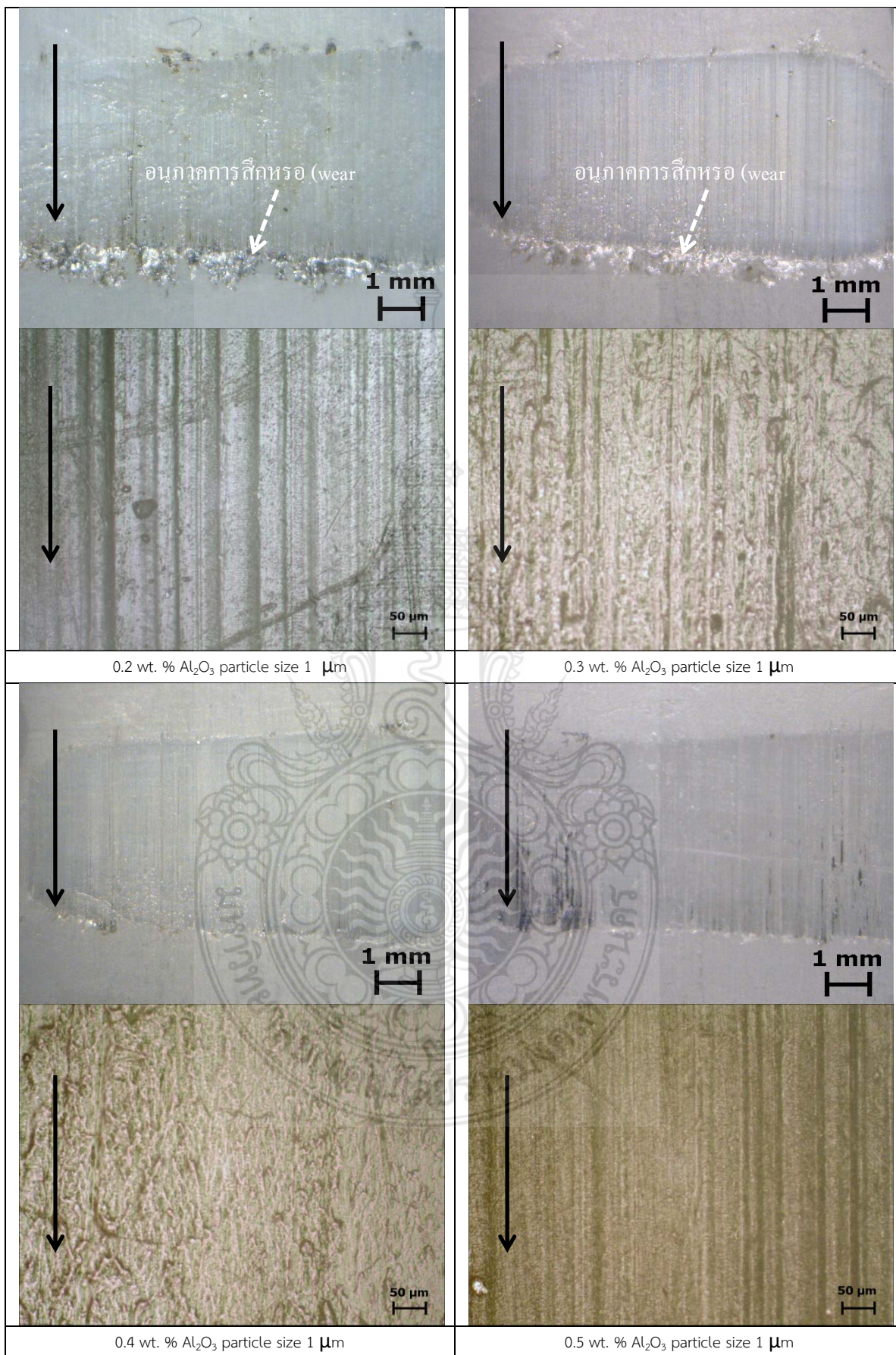
ขนาดอนุภาค  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดใหญ่และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคยังมีผลต่อการลดลงของปริมาณความเป็นผลึกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล โดยทำให้สมบัติทางกลต่างๆ มีค่าลดลง เมื่อมีการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ด้วยปริมาณที่มากเกินไปกว่า 1 wt. %

#### 4.4.3 สมบัติทางด้านไทรโบโลยี (Tribological Properties)

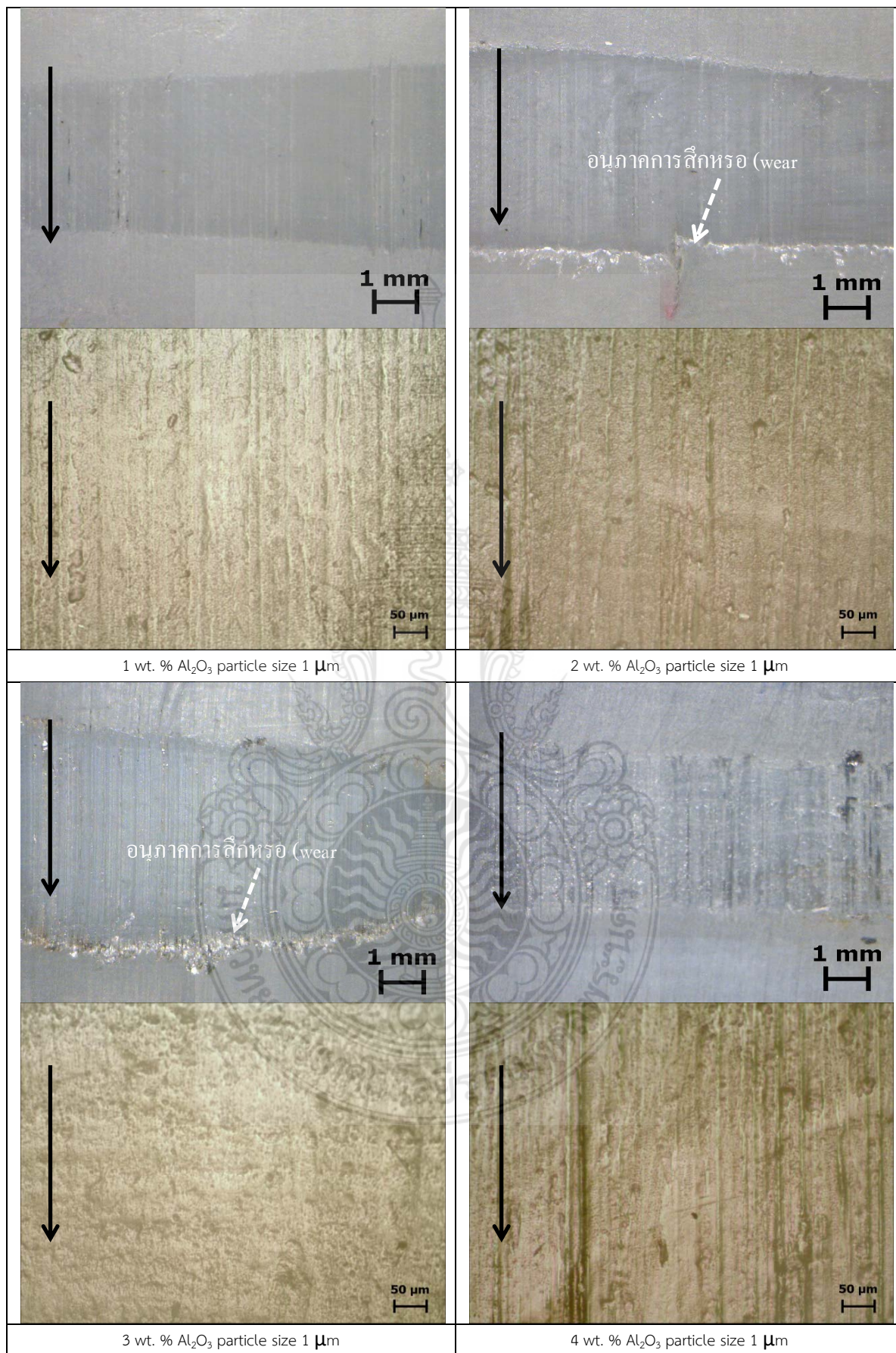
หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบด้วยระยะเวลาของการทดสอบ 180 นาที พบว่า ชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่รอยสึกหรอตามปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  และการปรากฏของอนุภาคการสึกหรอ (Wear debris) สะสมตัวอยู่บริเวณขอบรอยสึกหรอ (ลูกศรเส้นประสีขาว) ที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนตามทิศทางการไถล (ลูกศรเส้นเต็มสีดำ) ของลูกกลิ้งวัสดุคู่สัมผัส ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.38 และเมื่อวิเคราะห์พื้นที่รอยสึกหรอลงในรายละเอียดพื้นผิวรอยสึกหรอ พบว่า พื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  ส่วนใหญ่มีลักษณะหยาบขรุขระจากพฤติกรรมการเฉือนฉีกพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่เกิดการเกาะยึดประสานติดกันออกจากชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้ยังพบร่องบนพื้นผิวของรอยสึกหรอที่เกิดจากการไถครูดลงไปเนื้อพอลิเมอร์ตามทิศทางการไถล (ลูกศรเส้นเต็มสีดำ) ซึ่งจากหลักฐานที่ปรากฏทั้งหมดนี้ แสดงให้เห็นว่าเป็นรูปแบบของการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) [5, 6]



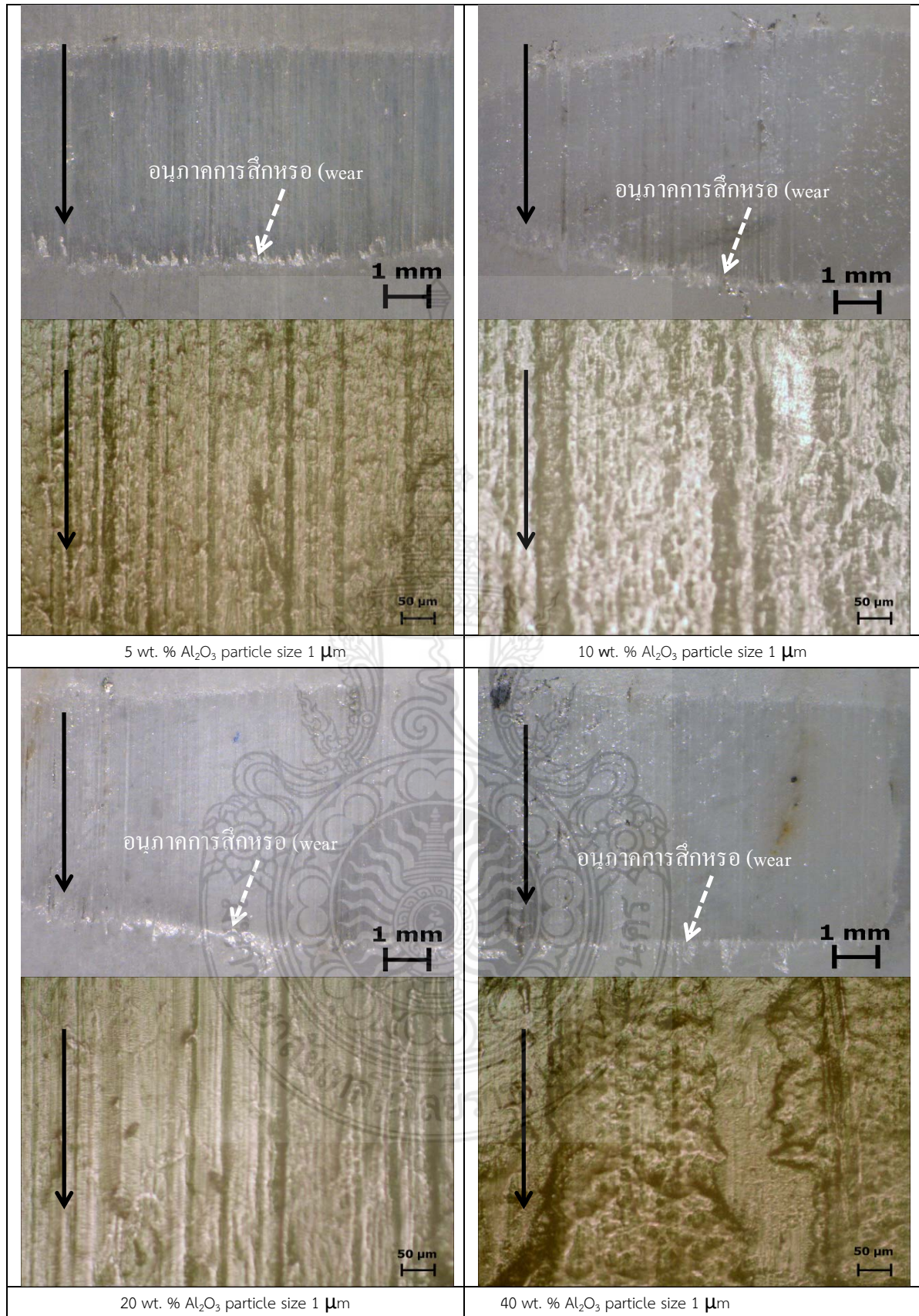












รูปที่ 4.38 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของซินทสอววัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 μm

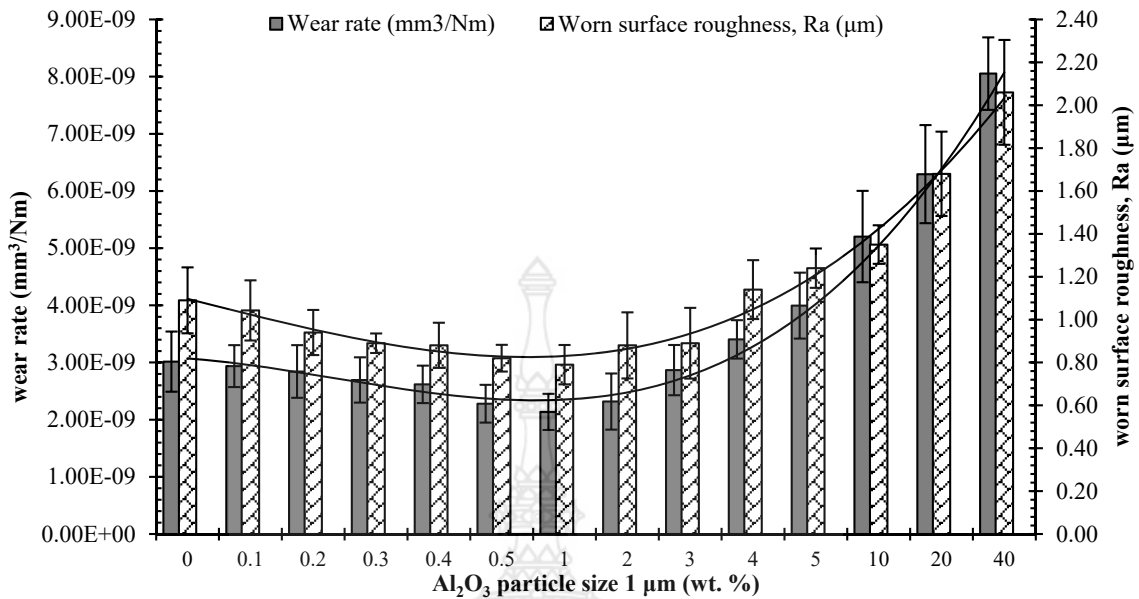


ตารางที่ 4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านโทรโพลีด้วยเครื่องมือต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.12-0.13 โดยชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.12 และนอกจากนี้ยังมีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  โดยมีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $1.09 \pm 0.15 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก่อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $2.14 \times 10^{-9} \pm 3.16 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  และ  $0.79 \pm 0.09 \mu\text{m}$  ที่อัตราการผสม 1 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  หลังจากนั้น ปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก่อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.18 และกราฟแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 4.38 ซึ่งจากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมีความสัมพันธ์กัน โดยชิ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน

**ตารางที่ 4.18** แสดงสมบัติทางด้านโทรโพลีของชิ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 1  $\mu\text{m}$

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 1 $\mu\text{m}$ fraction (wt. %)	Coefficient of friction, $\mu$		Wear rate, K ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ )		Worn surface Roughness, Ra ( $\mu\text{m}$ )	
	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
0	0.12	0.01	3.02E-09	5.27E-10	1.09	0.15
0.1	0.12	0.00	2.94E-09	3.66E-10	1.04	0.14
0.2	0.12	0.01	2.84E-09	4.61E-10	0.94	0.11
0.3	0.12	0.01	2.69E-09	3.97E-10	0.89	0.05
0.4	0.12	0.01	2.62E-09	3.28E-10	0.88	0.11
0.5	0.12	0.01	2.28E-09	3.30E-10	0.82	0.06
1	0.12	0.01	2.14E-09	3.16E-10	0.79	0.09
2	0.12	0.01	2.32E-09	4.92E-10	0.88	0.15
3	0.13	0.01	2.87E-09	4.39E-10	0.89	0.17
4	0.13	0.01	3.40E-09	3.35E-10	1.14	0.14
5	0.13	0.01	4.00E-09	5.77E-10	1.24	0.09
10	0.14	0.01	5.20E-09	7.99E-10	1.35	0.09
20	0.14	0.01	6.29E-09	8.58E-10	1.68	0.20

40	0.14	0.01	8.05E-09	6.35E-10	2.06	0.24
----	------	------	----------	----------	------	------



รูปที่ 4.39 อัตราการสึกหรอและความหยาบผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุอ่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดเกิดการ Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่อยู่ในช่วง 2309-2342 cm<sup>-1</sup> และ 1622-1639 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (-CH<sub>2</sub>-), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ ที่มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีสมบัติทางกลเพิ่มขึ้นและมีอัตราการสึกหรอลดต่ำลงแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm ที่แตกต่างกัน และนอกจากนี้ ชิ้นทดสอบ 0.3 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm พบพีคในช่วง 1704 cm<sup>-1</sup> ของหมู่ carbonyl (C=O) ที่เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์เกิดขึ้นรวมอยู่ด้วยกัน

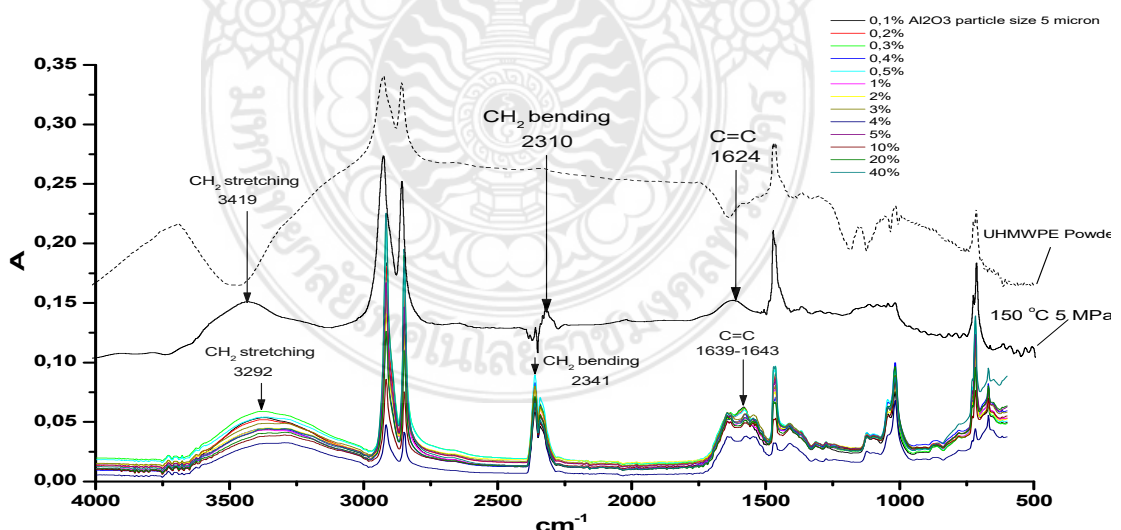
เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึก สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่า การผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1 µm มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีปริมาณความเป็นผลึกและอัตราการสึกหรอลดต่ำลง แต่สมบัติทางกลสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงไม่มีผลทำให้สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอลดลง ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่เป็นอิทธิพลมาจากขนาดอนุภาคของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านมา และนอกจากนี้สมบัติทางกลที่สูงขึ้นและอัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha [10] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์ที่มีค่า Ultimate tensile strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline microstructure) เพราะ

ค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ จะหมายถึง ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการโหลดมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นบางๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุคู่สัมผัส [10]

#### 4.5 ผลการทดลองขึ้นรูปขึ้นทดสอบ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 $\mu\text{m}$

##### 4.5.1 เอกลักษณะทางเคมี (Chemical characteristic)

จากการวิเคราะห์ IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์ ขึ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 1  $\mu\text{m}$  ที่ผ่านการทดลองอัดรีดขึ้นรูปด้วยกรรมวิธี Ram extrusion process ที่อุณหภูมิ 150 °C ที่ความดัน 5 MPa ด้วยระยะเวลาของการคงอุณหภูมิ 30 นาที พบว่า MWCNT มีผลทำให้พิกัดสัญญาณการดูดกลืนพลังงานของขึ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรายละเอียดผลการวิเคราะห์ที่มีลักษณะพิก IR spectrum ที่แสดงในรูปที่ 4.40 และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์พิกต่างๆ ที่ปรากฏ ดังตารางที่ 4.19 โดยพิกของขึ้นทดสอบส่วนใหญ่ที่ปรากฏมีสัญญาณการสั่นของหมู่ methylene (-CH<sub>2</sub>-) หมู่ vinyl (C=C) และ trans-vinylene (-R<sup>1</sup>CH=CHR<sup>2</sup>-) ที่แสดงให้เห็นการสลายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งการเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์นี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ [4] และนอกจากนี้ ผลจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu\text{m}$  ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง IR spectrum ที่ทำให้เกิดพิกใหม่ๆ เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบ UHMWPE จากการอัดรีดขึ้นรูปโดยปราศจากสารเติมแต่งใดๆ



รูปที่ 4.40 IR spectrum ของผง UHMWPE บริสุทธิ์เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบวัสดุก่อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu\text{m}$

ตารางที่ 4.19 สรุปสัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ที่แสดงค่าการดูดกลืนพลังงานของชั้นทดสอบวัสดุ

ก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $Al_2O_3$  particle size 5  $\mu m$

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 5 $\mu m$ fraction (wt. %)	Peak สัญญาณการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน และค่าการดูดกลืนพลังงาน (cm <sup>-1</sup> )						หมายเหตุ
	-CH <sub>2</sub> - stretching	C-H stretching	-CH <sub>2</sub> - bending	C-H bending	C=O (carbonyl group)	C=C (vinyl group)	
UHMWPE powder	3687	2918-2850	1464	719	—	—	
0	3419	2918-2850	2309-1471	718	—	1622	Peak 2309 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1622 เกิดการ Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.1	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1639</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.2	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1639</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.3	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1639</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.4	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1639</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1639 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
0.5	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1642</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1642 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
1	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1642</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1642 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
2	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1642</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1642 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
3	3292	2915-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1643</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1643 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
4	3294	2916-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1643</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1643 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
5	3292	2916-2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1643</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1643 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์



10	3294	2916- 2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1642</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1642 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
20	3292	2916- 2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1643</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1643 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์
40	3292	2916- 2848	<u>2341</u> 1463	718	-	<u>1643</u>	Peak 2341 เกิดจากการสลายตัวของพอลิเมอร์ Peak 1643 เกิดจากการ Crosslink ภายในสายโซ่พอลิเมอร์

#### 4.5.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกล (Physical and Mechanical Properties)

ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของวัสดุก้อน UHMWPE มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.20 โดยวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีปริมาณความเป็นผลึกสูงสุดเท่ากับ 61.52% และปริมาณความเป็นผลึกมีค่าลดลงเมื่อมีการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 5  $\mu\text{m}$  โดยปริมาณความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผกผันกับปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 5  $\mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้น ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.20 และจากการวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงเปรียบเทียบกับค่าการดำเนินการทดลองต่างๆ ที่ได้ดำเนินการในการทดลองที่ผ่านมา พบว่า ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงมีสาเหตุมาจากขนาดอนุภาคของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 4.4.2 4.5.2 และ 4.6.2 และนอกจากนี้ปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงมีสาเหตุมาจากปริมาณของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ขนาดของอนุภาคสารเติมแต่งและปริมาณสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณความเป็นผลึกของ UHMWPE ลดลง

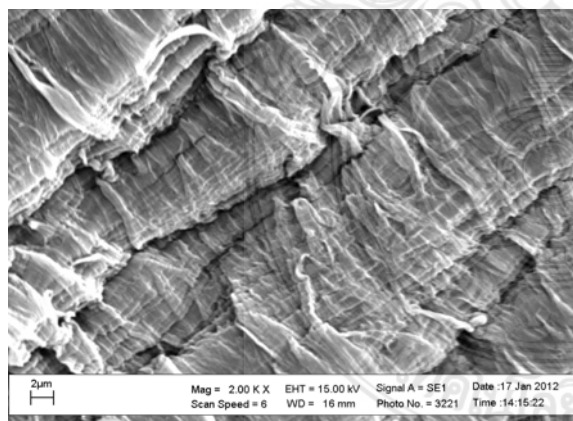
สำหรับในส่วนของความหนาแน่น พบว่า ชั้นทดสอบที่ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 5  $\mu\text{m}$  ส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.92-0.94  $\text{g}/\text{cm}^3$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ

**ตารางที่ 4.20** แสดงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size 5  $\mu\text{m}$

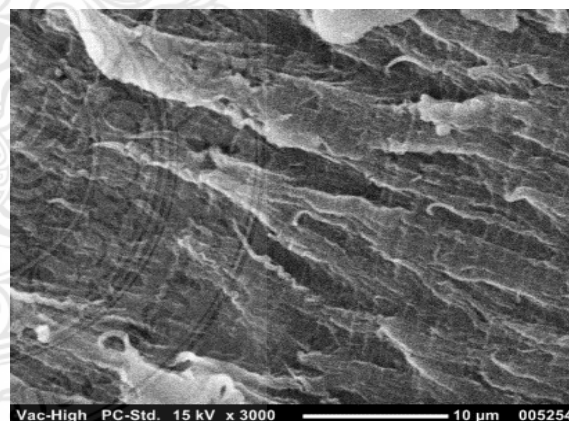
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 5 $\mu\text{m}$ fraction (wt. %)	Degree of crystallinity, $\chi$ (%)	Density, $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		Yield Strength, $\sigma_y$ (MPa)		Ultimate Strength, $\sigma_u$ (MPa)		Breaking Strength, $\sigma_b$ (MPa)		Elongation, $\epsilon$ (MPa)		Hardness (Shore D)	
		Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD	Average	SD
0	61.52	0.93	0.01	20.43	1.21	28.33	1.53	24.67	0.76	285.60	6.41	66.27	1.01
0.1	45.46	0.92	0.01	20.75	1.64	22.27	1.15	20.77	1.21	181.98	8.27	66.33	0.80
0.2	48.92	0.92	0.01	20.67	2.65	23.95	1.72	20.98	0.95	184.17	15.82	66.50	0.86
0.3	49.98	0.92	0.01	21.28	1.93	23.73	1.31	21.59	1.78	173.60	15.59	66.70	0.79
0.4	46.24	0.92	0.01	21.84	1.64	24.35	2.30	21.41	0.68	171.40	19.11	66.81	0.67
0.5	46.76	0.93	0.01	21.95	1.27	24.44	1.33	20.98	0.74	170.28	10.58	67.02	0.95

1	45.43	0.93	0.01	22.17	1.91	24.39	1.79	23.02	0.72	162.83	16.03	67.20	0.96
2	53.91	0.93	0.01	22.34	1.08	25.92	1.68	22.48	0.53	149.18	10.64	67.43	0.89
3	47.61	0.93	0.01	22.42	1.01	25.52	1.03	22.34	1.76	142.50	14.22	67.60	0.89
4	47.58	0.93	0.01	22.57	2.01	26.31	1.33	22.69	4.32	136.66	11.67	68.02	1.35
5	46.05	0.93	0.01	22.71	1.92	26.37	1.23	24.24	2.11	143.33	18.03	68.33	1.32
10	47.14	0.94	0.01	22.02	0.83	25.24	1.29	21.44	1.74	138.34	15.42	68.70	1.42
20	33.49	0.94	0.01	22.12	1.37	27.99	1.73	19.32	0.98	22.22	2.92	68.92	1.50
40	29.60	0.94	0.01	13.26	1.33	18.92	1.34	10.05	1.89	16.95	5.34	69.17	1.56

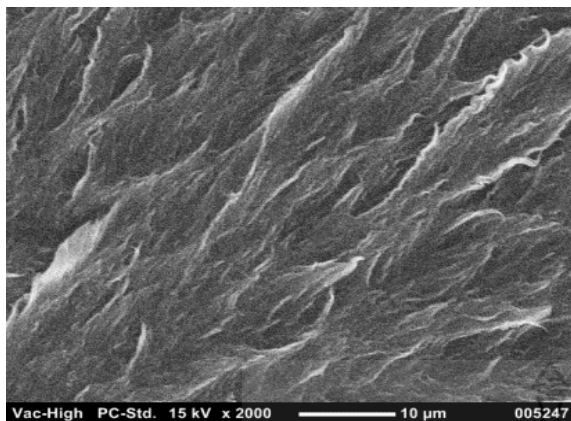
ผลการศึกษาวិเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $5 \mu\text{m}$  พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด (Lamellar or flake pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4.41 ซึ่งปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $5 \mu\text{m}$  ด้วยปริมาณน้อยๆ ในช่วง 0.1-1 wt. % ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของ UHMWPE เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคยังคงมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบแผ่นหรือแบบเกล็ด แต่จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคได้เมื่อมีปริมาณการผสม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $5 \mu\text{m}$  ตั้งแต่ 5 wt. % ดังลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายตัวของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  แยกออกจากโครงสร้างพื้น ที่แสดงในรูปที่ 4.41 g) และนอกจากนี้ บางบริเวณของโครงสร้างจุลภาค ยังพบการจับตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.41 g) และพบการกระจายตัวเป็นกลุ่ม  $\text{Al}_2\text{O}_3$  อย่างหนาแน่นในชิ้นทดสอบที่มีปริมาณ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ตั้งแต่ 20 wt. % ดังลักษณะที่แสดงในรูปที่ 4.41 i)



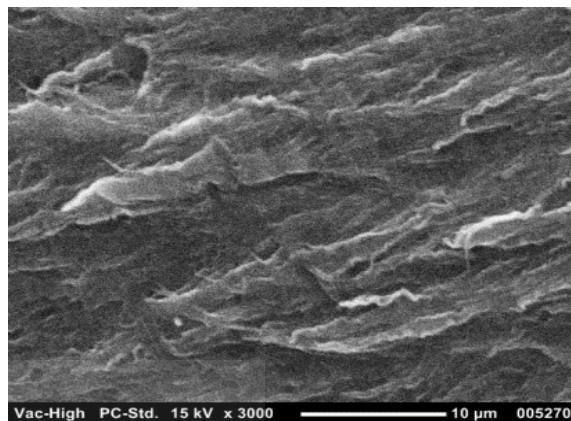
a) 0 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $5 \mu\text{m}$



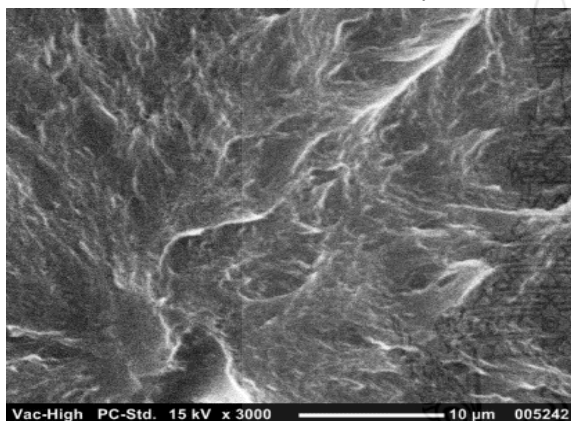
b) 0.1 wt. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size  $5 \mu\text{m}$



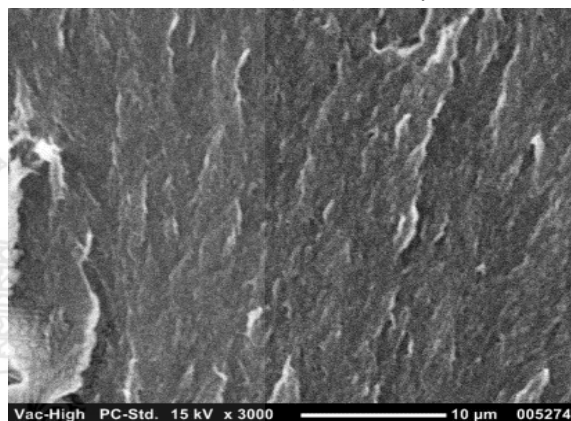
c) 0.2 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm



d) 0.3 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm



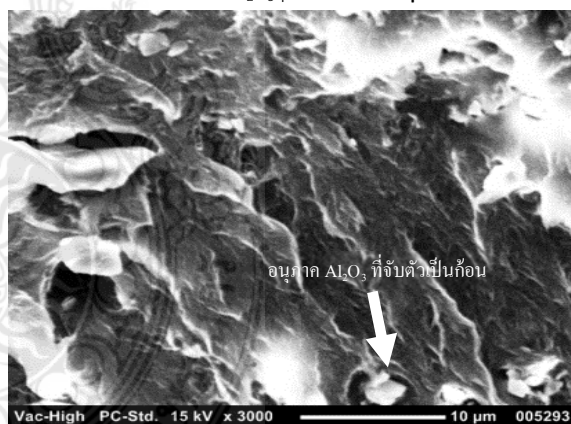
e) 0.5 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm



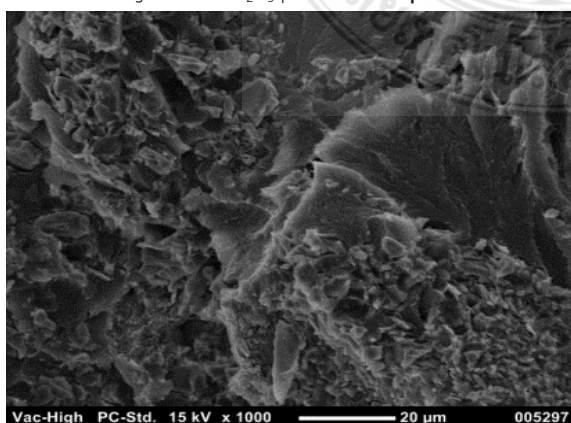
f) 1 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm



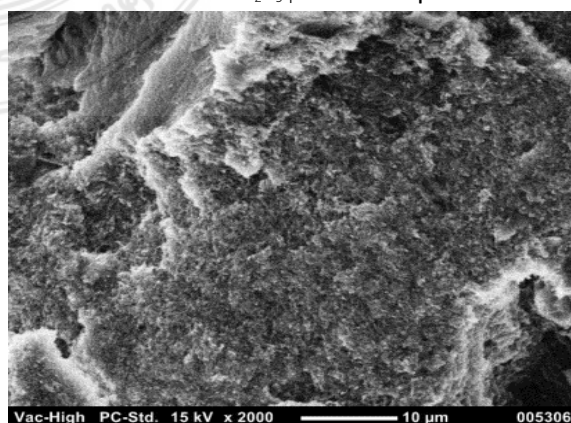
g) 5 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm



h) 10 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm



i) 20 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm

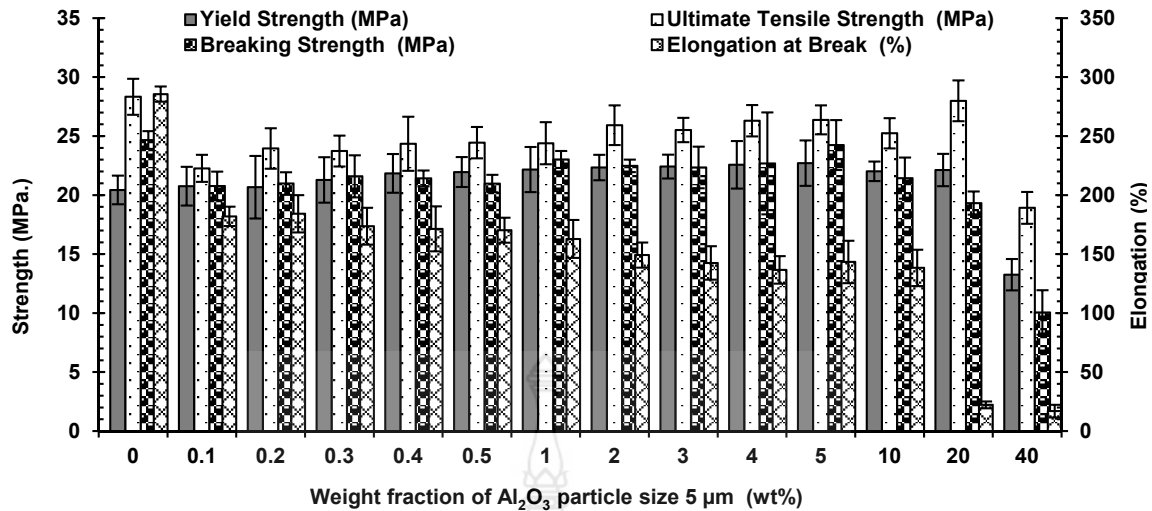


j) 40 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm

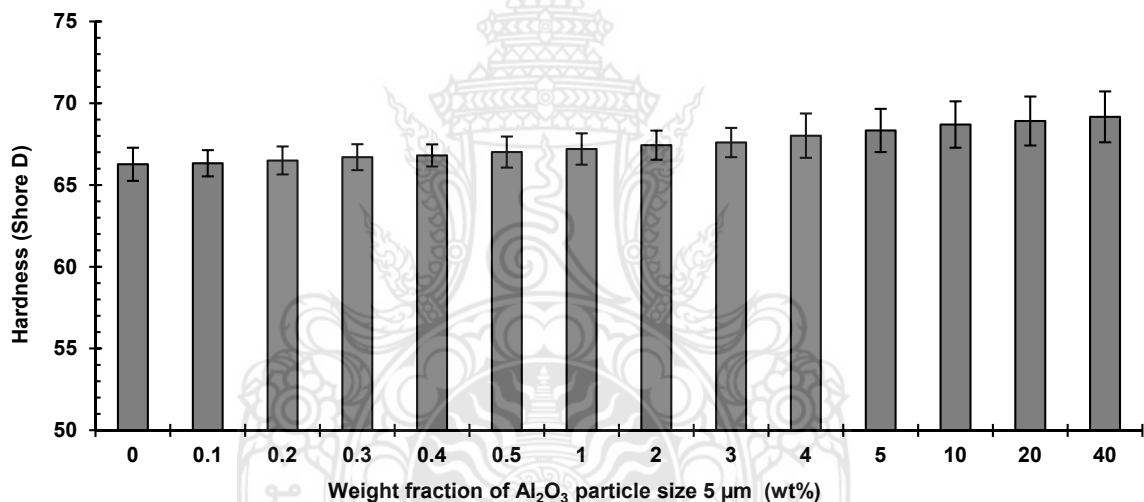
**รูปที่ 4.41** โครงสร้างจุลภาคของชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu$ m

จากการศึกษาวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางกลของชั้นทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง พบว่า ชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu$ m มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับ UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ ซึ่งสมบัติทางกลต่างๆ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu$ m ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Yield strength มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 22.12 $\pm$ 1.37 MPa ที่อัตราส่วนผสม 20 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu$ m แต่ค่า Ultimate tensile strength โดยรวมกลับมีค่าต่ำกว่าชั้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ และในทำนองเดียวกันปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu$ m ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Elongation แนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงด้วยกราฟในรูปที่ 4.42 และค่าที่แสดงในตารางที่ 4.20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size size 5  $\mu$ m ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่แทบจะไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึง สำหรับในส่วนของผลการวิเคราะห์ทดสอบความแข็ง พบว่า ปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size size 5  $\mu$ m ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความแข็งของชั้นทดสอบเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดเท่ากับ 69.17 $\pm$ 1.56 shore D ดังกราฟแนวโน้มนการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งที่แสดงในรูปที่ 4.43 และตารางที่ 4.20

เมื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ IR spectrum และปริมาณความเป็นผลึก พบว่า การเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ มีผลทำให้ชั้นทดสอบมีค่า Yield strength มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงของปริมาณการผสม 0.1-20 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5  $\mu$ m และนอกจากนี้การเกิด Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ยังมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคเกิดการเกาะยึดเชื่อมประสานกันอย่างแข็งแรง ซึ่งส่งผลต่อเนื่องถึงการเพิ่มขึ้นของค่า Yield strength โดยสามารถยืนยันได้จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แสดงดังรูปที่ 4.35a)-f) แต่จากการที่ขนาดอนุภาค Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีขนาดใหญ่และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคยังมีผลต่อการลดลงของปริมาณความเป็นผลึกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล โดยทำให้สมบัติทางกลต่างๆ มีค่าลดลง เมื่อมีการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยปริมาณที่มากเกินไปกว่า 1 wt. % โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า Elongation ที่มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.42 สมบัติทางกลจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm



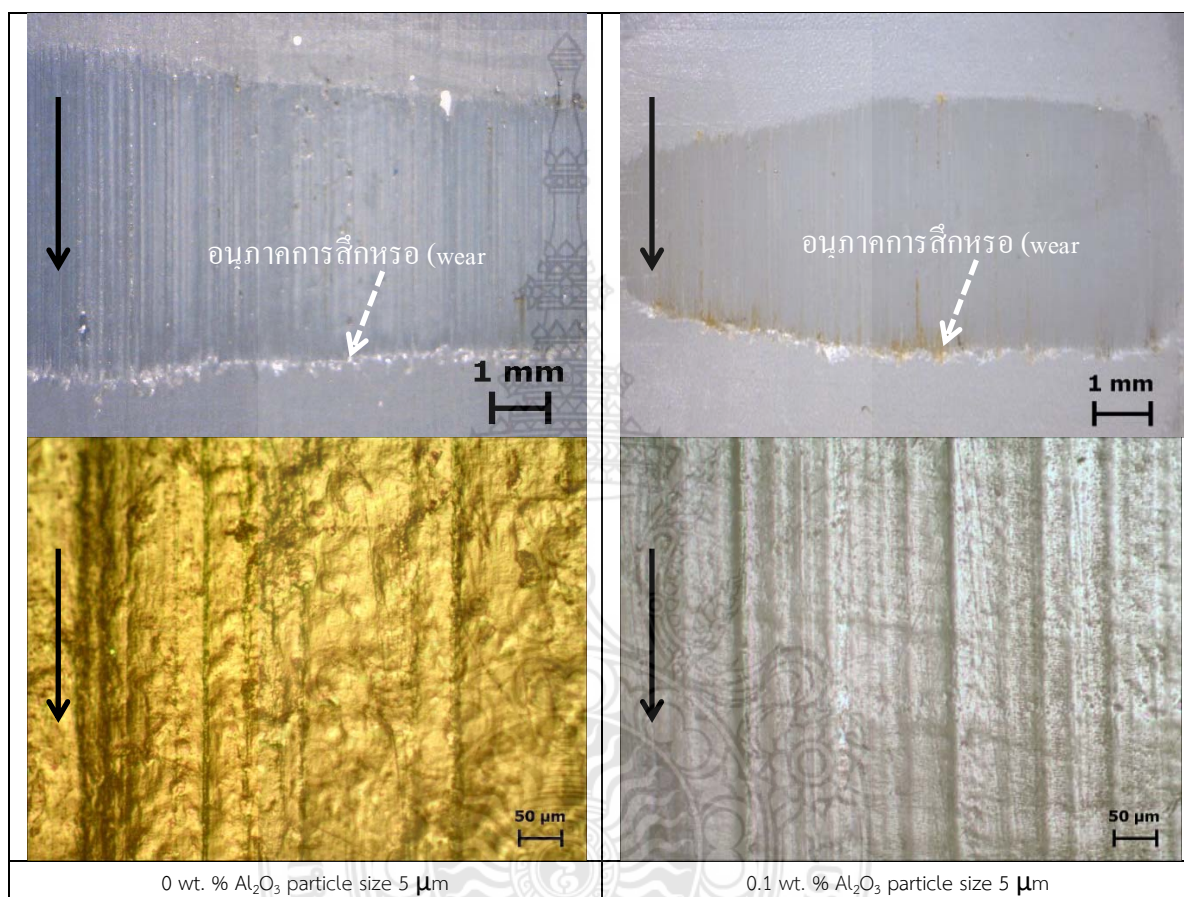
รูปที่ 4.43 ความแข็งของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm

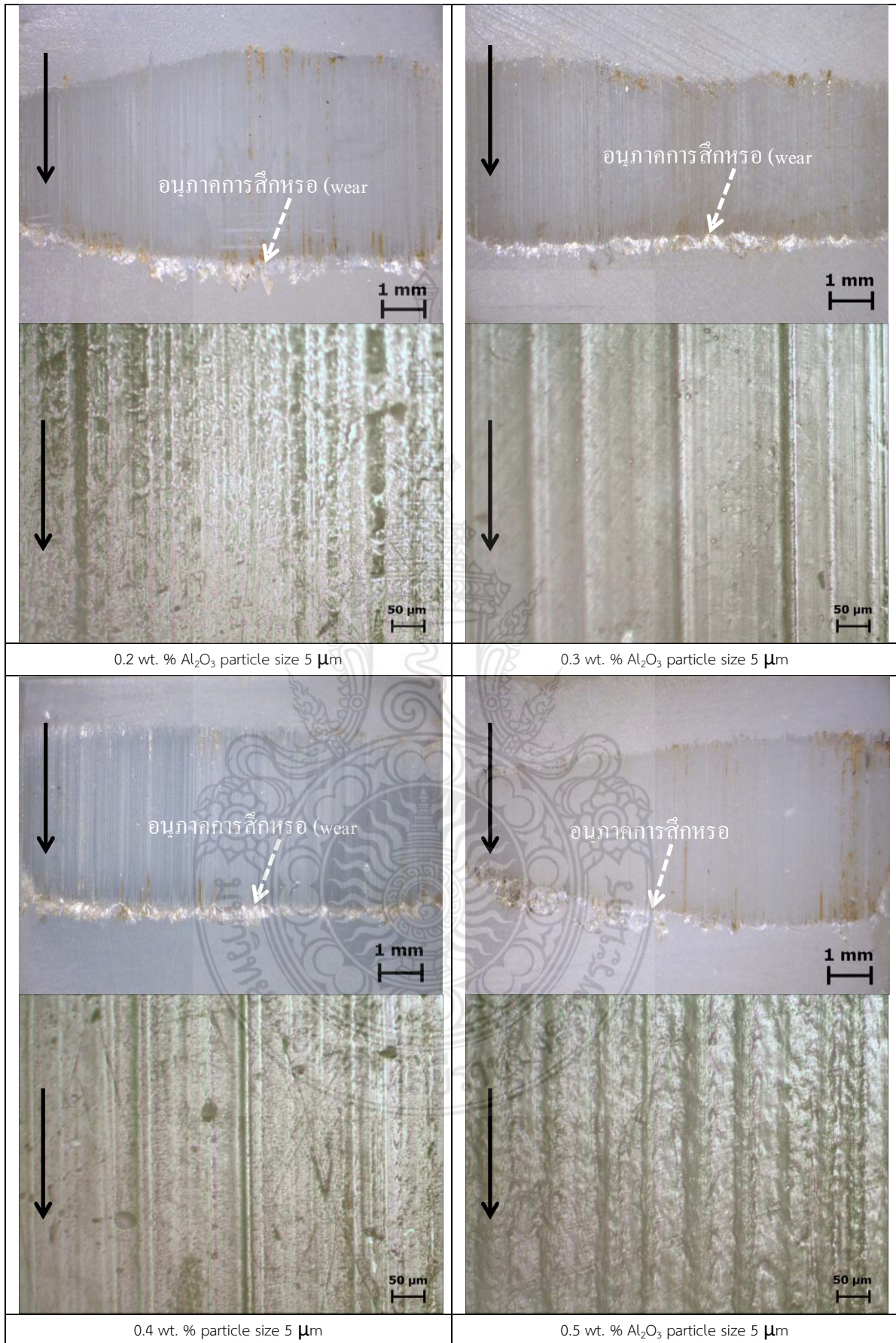
#### 4.5.3 สมบัติทางด้านไทรโบโลยี (Tribological Properties)

หลังจากทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นทดสอบด้วยระยะเวลาของการทดสอบ 180 นาที พบว่า ชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่รอยสึกหรอตามปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm และการปรากฏของอนุภาคการสึกหรอ (Wear debris) สะสมตัวอยู่บริเวณขอบรอยสึกหรอ (ลูกศรเส้นประสีขาว) ที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนตามทิศทางการไหล (ลูกศรเส้นเต็มสีดำ) ของลูกกลิ้งวัสดุคู่สัมผัส ดังที่ปรากฏในรูปที่ 4.44 เมื่อวิเคราะห์พื้นที่รอยสึกหรอลงในรายละเอียดพื้นผิวรอยสึกหรอ พบว่า พื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm ส่วนใหญ่มีพื้นผิวรอยสึกหรอที่ค่อนข้างเรียบ และมีความหยาบขรุขระบ้างเล็กน้อยจากพฤติกรรมการเฉือนฉีกพื้นผิวเนื้อพอลิเมอร์บางบริเวณที่เกิดการเกาะยึดประสานติดกันออกจากชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้ยังพบร่องบนพื้นผิว

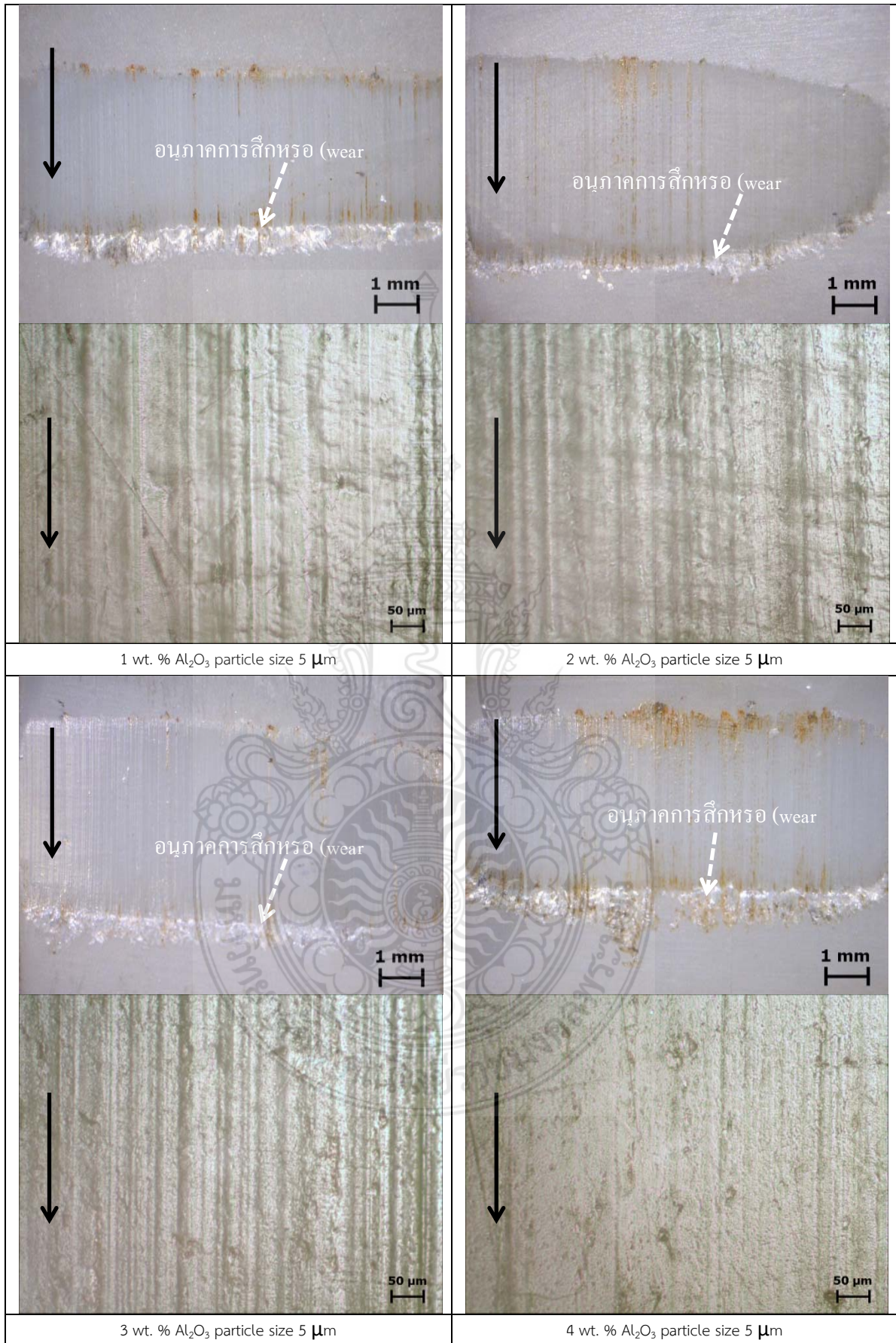


ของรอยสึกหรอที่เกิดจากการไถครูดลงไปบนเนื้อพอลิเมอร์ตามทิศทางการไถ โดยร่องที่เกิดจากการไถครูดและขอบรอยสึกหรอมีคราบสีน้ำตาลเกาะติดอยู่บนผิวที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างลูกกลิ้งวัสดุคู่สัมผัสกับ  $Al_2O_3$  ซึ่งจากหลักฐานที่ปรากฏทั้งหมดนี้ แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการสึกหรอที่เกิดขึ้นเป็นการสึกหรอแบบผสมผสานระหว่าง การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) แบบยึดติด (Adhesive wear) และแบบไทรโบเคมี (Tribo-chemical wear) [5, 6]

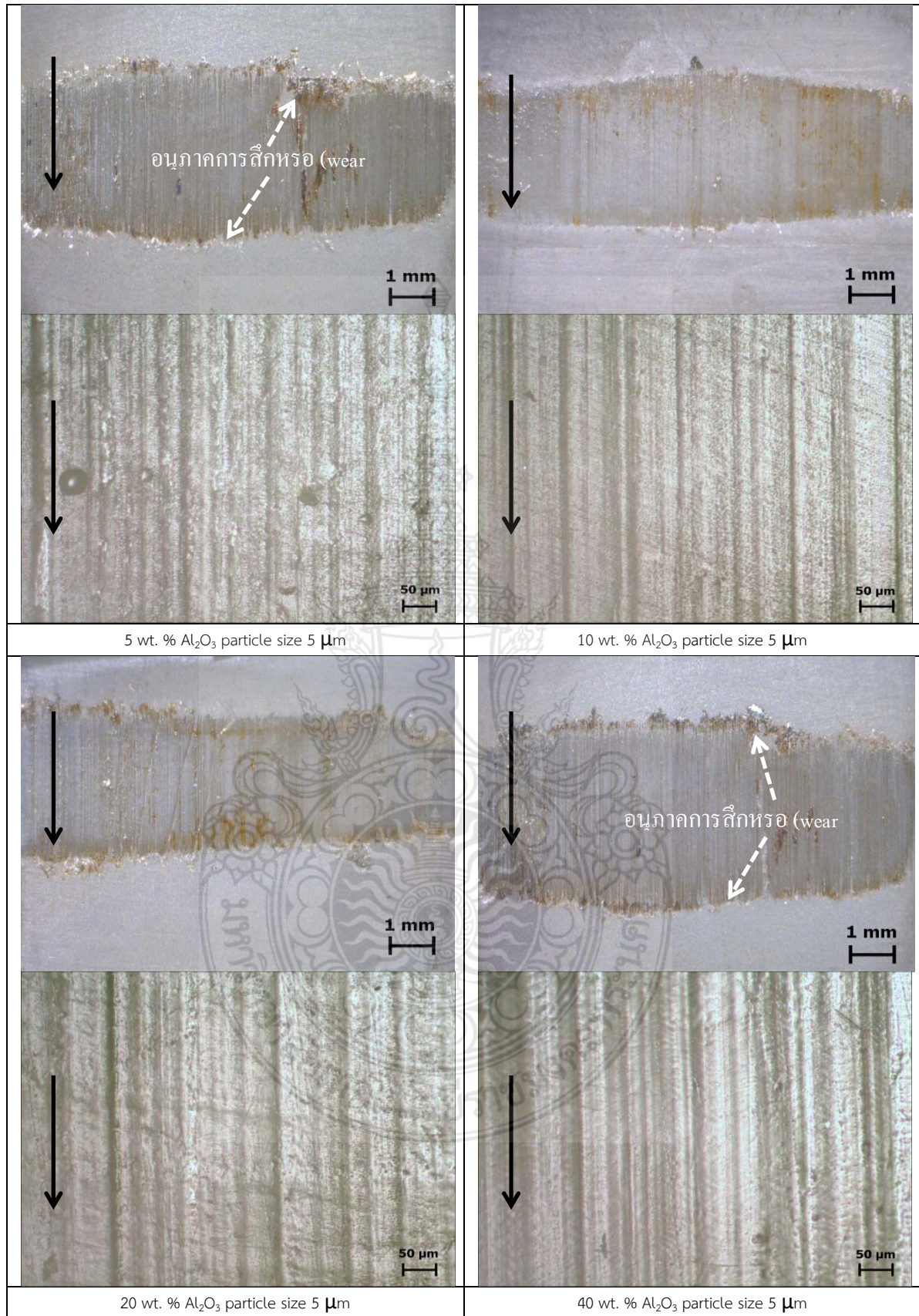












รูปที่ 4.44 รอยสึกหรอและพื้นผิวรอยสึกหรอของซินทสอวีสตัก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm

ตารางที่ 4.21 แสดงสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE และ UHMWPE ผสม

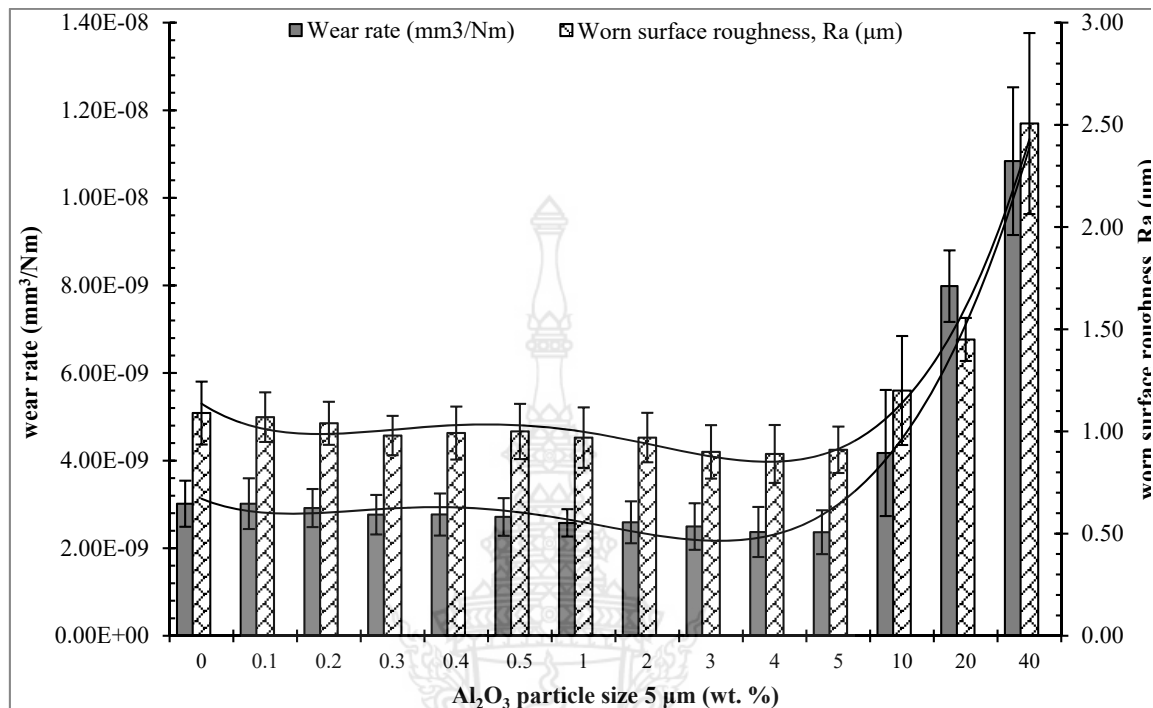
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle size 5 μm fraction (wt. %)	Coefficient of friction, μ		Wear rate, K (mm <sup>3</sup> /Nm)		Worn surface Roughness, Ra (μm)	
	Average.	SD	Average.	SD	Average.	SD
0	0.12	0.01	3.02E-09	5.27E-10	1.09	0.15
0.1	0.12	0.00	3.02E-09	5.80E-10	1.07	0.12
0.2	0.12	0.01	2.92E-09	4.34E-10	1.04	0.11
0.3	0.12	0.01	2.77E-09	4.52E-10	0.98	0.10
0.4	0.12	0.01	2.77E-09	4.80E-10	0.99	0.13
0.5	0.12	0.01	2.72E-09	4.29E-10	1.00	0.14
1	0.12	0.01	2.58E-09	3.12E-10	0.97	0.15
2	0.12	0.01	2.59E-09	4.79E-10	0.97	0.12
3	0.13	0.01	2.50E-09	5.31E-10	0.90	0.13
4	0.13	0.01	2.37E-09	5.71E-10	0.89	0.14
5	0.13	0.01	2.37E-09	5.01E-10	0.91	0.11
10	0.14	0.01	4.17E-09	1.44E-09	1.20	0.27
20	0.14	0.01	7.98E-09	8.18E-10	1.45	0.11
40	0.14	0.01	1.08E-08	1.69E-09	2.51	0.44

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อัตราการสึกหรอและค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบสมบัติทางด้านไทรโบโลยีด้วยเครื่องมือต่างๆ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.12-0.13 โดยชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่ปราศจากสารเติมแต่งใดๆ มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.12 และนอกจากนี้ยังมีอัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอสูงกว่าชิ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm โดยมีค่าเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm และ  $1.09 \pm 0.15$  μm ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $2.37 \times 10^{-9} \pm 5.71 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm และ  $0.89 \pm 0.14$  μm ที่อัตราการผลิต 4 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm หลังจากนั้น ปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite มีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 4.21 และกราฟแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในรูปที่ 4.45 ซึ่งจากข้อมูลผลที่ได้จากการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 μm มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการสึกหรอของชิ้นทดสอบ และนอกจากนี้อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอมี



ความสัมพันธ์กัน โดยขึ้นทดสอบที่มีความอัตราการสึกหรอต่ำจะมีค่าความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอต่ำด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.45 อัตราการสึกหรอและความหยาบพื้นผิวรอยสึกหรอของชิ้นทดสอบวัสดุ UHMWPE และ UHMWPE ผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 µm

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง IR spectrum กับอัตราการสึกหรอ พบว่า ชิ้นทดสอบทั้งหมดเกิดการ Cross-link ในสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากพบพีคที่อยู่ในช่วง 2309-2341 cm<sup>-1</sup> และ 1622-1643 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นพีคของหมู่ (-CH<sub>2</sub>-), หมู่ vinyl (C=C) ตามลำดับ ที่มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีสมบัติทางกลเพิ่มขึ้นและมีอัตราการสึกหรอลดลงแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปริมาณการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 µm ที่แตกต่างกัน

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเป็นผลึก สมบัติทางกล และอัตราการสึกหรอ พบว่าการผสม Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle size 5 µm มีผลทำให้ชิ้นทดสอบมีปริมาณความเป็นผลึกและอัตราการสึกหรอลดลง แต่สมบัติทางกลสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณความเป็นผลึกที่ลดลงไม่มีผลทำให้สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอลดลง ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่เป็นอิทธิพลมาจากขนาดอนุภาคของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรวดที่ผ่านๆ มา และนอกจากนี้สมบัติทางกลที่สูงขึ้นและอัตราการสึกหรอที่ต่ำนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลการศึกษาวิจัยของ Brian J. Briscoe and Sujeet K. Sinha [10] ที่ได้กล่าวไว้ว่า พอลิเมอร์ที่มีค่า Ultimate tensile strength และค่า Elongation สูงจะมีผลทำให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอสูงด้วยเช่นกัน (อัตราการสึกหรอต่ำลง) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่

โมเลกุลเป็นเส้นในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline microstructure) เพราะค่า Elongation ที่สูงของพอลิเมอร์ จะหมายถึง ค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไถลมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมการแปรรูปถาวรของพอลิเมอร์ขยายกว้างขึ้นภายในบริเวณชั้นบางๆ ของจุดที่มีการเชื่อมสัมผัสระหว่างพื้นผิววัสดุสัมผัส [10]



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการที่ต้องการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุก้อนกึ่งสำเร็จรูป UHMWPE ด้วยกรรมวิธี Hot compression molding process ที่ให้ค่า Yield strength สูงสุด และอัตราการสึกหรอต่ำสุด สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์และทางด้านวิศวกรรมเครื่องจักรกลต่างๆ และผลจากการดำเนินงานศึกษาวิจัยทั้งหมดที่ได้มีการทดลองวิเคราะห์ทดสอบและอภิปรายความสัมพันธ์ระหว่างของผลการวิเคราะห์ทดสอบต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยผลการวิเคราะห์ทดสอบเอกลักษณ์ทางเคมีและสมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อสมบัติทางกลและความสมบัติทางด้านไทรโบโลยีของวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ วัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ที่ได้จากการทดลองอัดรีดขึ้นรูปภายใต้สภาวะต่างๆ และวัสดุก้อน UHMWPE composite ผสมลเลอร์ที่เป็นอนุภาคนิยามออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ขนาดอนุภาค 0.05  $\mu m$  (50 nm) 0.3  $\mu m$  (300 nm) 0.5  $\mu m$  (500 nm) 1  $\mu m$  (1000 nm) 5  $\mu m$  และ 10  $\mu m$  สามารถสรุปผลการดำเนินการศึกษาวิจัยออกเป็นกลุ่มการทดลองดังต่อไปนี้

#### 1. ผลการทดลองอัดรีดขึ้นรูปขึ้นทดสอบ UHMWPE เปรียบเทียบกับขึ้นทดสอบวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

วัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ พบว่า มีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength และค่า Elongation เท่ากับ  $20.87 \pm 1.01$  MPa,  $22.93 \pm 2.27$  MPa และ  $396.67 \pm 37.43$  % ตามลำดับ และมีอัตราการสึกหรอเท่ากับ  $1.43 \times 10^{-8} \pm 2.76 \times 10^{-9}$  mm<sup>3</sup>/Nm ปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 53.31 % และนอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ IR-spectrum พบ พีคสัญญาณการสั่นของหมู่ carbonyl (C=O) ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีความแข็งแรงลดลง

สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE คือ สภาวะการอัดรีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 °C เวลาคงอุณหภูมิ 30 นาที ความดัน 5 MPa เนื่องจากเป็นสภาวะการอัดรีดขึ้นรูปที่ขึ้นทดสอบมีสมบัติทางกลสูงสุดโดยมีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength และค่า Elongation เท่ากับ  $20.43 \pm 1.21$  MPa,  $28.33 \pm 1.53$  MPa และ  $285.60 \pm 6.41$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 23.3 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) สำหรับในส่วน of สมบัติทางด้านไทรโบโลยีมีอัตราการสึกหรอต่ำสุดเท่ากับ  $3.02 \times 10^{-9} \pm 5.27 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ 4.75 เท่า จากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์และปริมาณความเป็นผลึกที่สูงกว่า โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 61.52%

## 2. วัสดุก้อน UHMWPE ผสม $Al_2O_3$ particle size 0.05 $\mu m$

ปริมาณการผสม 0.3 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 0.05  $\mu m$  เป็นปริมาณการผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite ในกลุ่มนี้ เนื่องจากขึ้นทดสอบมีสมบัติทางกลเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength และค่า Elongation เท่ากับ  $23.17 \pm 3.35$  MPa,  $34.78 \pm 2.80$  MPa และ  $229.00 \pm 6.09$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 18.55 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) สำหรับในส่วนของอัตราการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.09 \times 10^{-9} \pm 3.39 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.44 เท่า จากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ แต่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าจากอิทธิพลของขนาดอนุภาคของ  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านๆ มาโดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 44.47 %

## 3. วัสดุก้อน UHMWPE ผสม $Al_2O_3$ particle size 0.3 $\mu m$

ปริมาณการผสม 0.4 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 0.3  $\mu m$  เป็นปริมาณการผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite ในกลุ่มนี้ เนื่องจากขึ้นทดสอบมีสมบัติทางกลลดลง โดยมีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength และค่า Elongation เท่ากับ  $21.93 \pm 0.51$  MPa,  $25.40 \pm 0.69$  MPa และ  $267.67 \pm 22.03$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลต่ำกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 11.54 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) สำหรับในส่วนของอัตราการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.32 \times 10^{-9} \pm 4.78 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.30 เท่า จากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ แต่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าจากอิทธิพลของขนาดอนุภาคของ  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านๆ มาโดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 44.63 %

## 4. วัสดุก้อน UHMWPE ผสม $Al_2O_3$ particle size 1 $\mu m$

ปริมาณการผสม 0.4 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 1  $\mu m$  เป็นปริมาณการผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite ในกลุ่มนี้ เนื่องจากขึ้นทดสอบมีสมบัติทางกลลดลง โดยมีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength และค่า Elongation เท่ากับ  $23.93 \pm 1.89$  MPa,  $26.77 \pm 1.20$  MPa และ  $296.54 \pm 7.51$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลต่ำกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 5.83 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) สำหรับในส่วนของอัตราการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.14 \times 10^{-9} \pm 3.16 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.41 เท่า จากการเกิด



Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ แต่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าจากอิทธิพลของขนาดอนุภาคของ  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านๆ มา โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 55.27 %

### 5. วัสดุก้อน UHMWPE ผสม $Al_2O_3$ particle size 5 $\mu m$

ปริมาณการผสม 4 wt. %  $Al_2O_3$  particle size 5  $\mu m$  เป็นปริมาณการผสมที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite ในกลุ่มนี้ เนื่องจากขึ้นทดสอบมีสมบัติทางกลลดลง โดยมีค่า Yield strength, Ultimate tensile strength และค่า Elongation เท่ากับ  $22.57 \pm 2.01$  MPa,  $26.31 \pm 3.11$  MPa และ  $136.66 \pm 11.67$  % ตามลำดับ หรือสมบัติทางกลต่ำกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 7.68 % (วิเคราะห์จากค่า Ultimate tensile strength) สำหรับในส่วนของอัตราการสึกหรอมีค่าเท่ากับ  $2.37 \times 10^{-9} \pm 5.71 \times 10^{-10}$  mm<sup>3</sup>/Nm หรือมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าวัสดุก้อน UHMWPE บริสุทธิ์ 1.27 เท่า จากการเกิด Cross-link ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ แต่มีปริมาณความเป็นผลึกต่ำกว่าจากอิทธิพลของขนาดอนุภาคของ  $Al_2O_3$  ที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ผ่านๆ มา โดยมีปริมาณความเป็นผลึกเท่ากับ 47.58 %

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สภาพะของการอัดรีดขึ้นรูปที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE ที่ได้มีการสรุปในงานวิจัยนี้เป็นสภาพะที่เหมาะสมสำหรับผง UHMWPE เกรด SLL-6-6020 มวลโมเลกุล (Molecular weight) เท่ากับ  $6.5 \times 10^6$  g/mol ขนาดอนุภาคเท่ากับ 80-100  $\mu m$  ของบริษัท Luoyang Guorun Pipes Corporation Limited ที่ใช้ในการทดลองเท่านั้น เนื่องจากมวลโมเลกุลและขนาดอนุภาคของอนุภาค UHMWPE ที่ต่างกันมีผลต่อสภาพะการอัดรีดขึ้นรูป สมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE

2. สภาพะการอัดรีดขึ้นรูปที่ได้มีการสรุปในโครงการนี้ เป็นสภาพะที่เหมาะสมสำหรับเครื่อง Ram extruder ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่านั้น เนื่องจากเครื่อง Ram extruder ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเครื่องขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับโครงการวิจัยนี้โดยเฉพาะ และยังมีข้อบกพร่องต่างๆ ที่ต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไขอีกมากมาย เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงในระดับห้องปฏิบัติการวิจัยที่ได้มาตรฐานและสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริงในระดับอุตสาหกรรม และนอกจากนี้ ในปัจจุบันยังไม่มีการผลิตเครื่อง Ram extruder ในประเทศ ดังนั้น คณะผู้วิจัยใคร่ขอเสนอแนะให้มีการวิจัยพัฒนาเครื่อง Ram extruder ควบคู่ไปกับการวิจัยเทคนิคการขึ้นรูปวัสดุก้อน UHMWPE เพื่อพัฒนาเครื่อง Ram extruder ให้ได้มาตรฐานสำหรับการวิจัย พัฒนาและผลิตวัสดุก้อน UHMWPE สำหรับถ่ายทอดสู่ภาคการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

3. ปริมาณการผสมฟิลเลอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอของ UHMWPE ขึ้นอยู่กับชนิด ขนาดอนุภาค รูปร่างทางเรขาคณิตและพื้นที่พื้นผิวสัมผัสของฟิลเลอร์

4 การผสมฟิลเลอร์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอจะต้องผสมด้วยปริมาณน้อยๆ ไม่เกิน 0.5 wt. % เนื่องจากปริมาณการผสมฟิลเลอร์ที่มากกว่านี้มีผลทำให้ฟิลเลอร์มีแนวโน้มกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและมีผลทำให้สมบัติทางกลและความต้านทานการสึกหรอลดลง สำหรับในส่วนของ การผสมฟิลเลอร์ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ระดับไมโครยังไม่สามารถสรุปปริมาณการผสมที่เหมาะสมได้ เนื่องจากการทดลองวิจัยที่ได้ดำเนินการในโครงการนี้มีการผสมฟิลเลอร์ที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโคร เพียงไม่ 2 ขนาดและมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถสรุปความแตกต่างที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน ดังนั้น คณะผู้วิจัยใคร่ขอเสนอแนะให้มีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการผสมฟิลเลอร์ที่มีขนาดอนุภาคระดับไมโครให้มีความแตกต่างของอนุภาคที่มากกว่านี้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] S.M. Kurtz. UHMWPE Biomaterials Handbook, Elsevier Ins., China, 2009.
- [2] Gul R. *Improved UHMWPE for use in total joint replacement*. Ph.D. Dissertation. Boston: Massachusetts Institute of Technology; 1997.
- [3] Han KS, Wallace JF, Truss RW, Geil PH. Powder compaction, sintering, and rolling of ultra-high molecular weight polyethylene and its composites. *J Macromol Sci-Phys* 1981;B19:313–49.
- [4] Bastiaansen CWM, Meyer HEH, Lemstra PJ. Memory effects in polyethylenes: influence of processing and crystallization history. *Polymer* 1990;31:1435–40.
- [5] Barnetson A, Hornsby PR. Observations on the sintering of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) powders. *J Materials Sci Letters* 1995;14:80–4.
- [6] Bellare A, Cohen RE. Morphology of rod stock and compression moulded sheets of ultra-high- molecular-weight polyethylene used in orthopaedic implants. *Biomaterials*, 1996; 17:2325–33.
- [7] Truss RW, Han KS, Wallace JF, Geil PH. Cold compaction molding and sintering of ultra-high molecular weight polyethylene. *Poly Engr Sci*, 1980; 20:747–55.
- [8] Shenoy AV, Saini DR. Compression moulding of ultra-high molecular weight polyethylene. *Plast Rubber Proc Appl*, 1985; 5:313–17.
- [9] Wang X-Y, Li S-Y, Salovey R. Processing of ultra-high molecular weight polyethylene. *J Appl Poly Sci*, 1988; 35:2165–71.
- [10] Chen K-C, Ellis EJ, Crugnola A. Effects of molding cycle on the molecular structure and abrasion resistance of ultra-high molecular weight polyethylene. *ANTEC '81*, 1981; 39:270–2.
- [11] McKenna GB, Crissman JM, Khoury F. Deformation and failure of ultra-high molecular weight polyethylene. *ANTEC '81*, 1981; 39:82–4.
- [12] Zachariades AE. The effect of powder particle fusion on the mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene. *Poly Engr Sci*, 1985; 25:747–50.
- [13] Farrar DF, Brain AA. The microstructure of ultra-high molecular weight polyethylene used in total joint replacements. *Biomaterials*, 1997; 18:1677–85.
- [14] Halldin GW, Kamel IL. Powder processing of ultra-high molecular weight polyethylene. I. Powder characterization and compaction. *Poly Eng Sci*, 1977; 17:21–6.

- [15] Halldin GW, Kamel IL. Powder processing of ultra-high molecular weight polyethylene, II. Sintering. *ANTEC 77*, 1977; 35:298–300.
- [16] Olley RH, Hosier IL, Bassett DC, Smith NG. On morphology of consolidated UHMWPE resin in hip cups, *Biomaterials*, 1999; 20:2037–46.
- [17] Lykins MD, Evans MA. A comparison of extruded and molded UHMWPE. *Trans 21st Soc Biomater*, 1995; 18:385.
- [18] Gwidon W. Stachowiak and Andrew W. Batchelor, Tribology Series 24, Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, 1993.
- [19] Jamal Takadom. Materials and Surface Engineering in Tribology, CPI Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, Great Britain, 2008.
- [20] I. V. Kragelskii, *Friction and Wear*, Elmsford: Pergamon Press, 1982.
- [21] S. Bahadur, The development of transfer layers and their role in polymer tribology, *Wear*, 2000, no.245, pp. 92.
- [22] 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.
- [23] V. A. Bely, A. I. Sviridenok, M. I. Petrokovets and V. G. Savkin, *Friction and Wear in Polymer-Based Materials*, Oxford, Pergamon Press, 1982.
- [24] K. R. Makinson and D. Tabor, *Proc. Roy. Soc.*, 1964, no. A281, pp. 49.
- [25] A. I. Sviridenok, V. A. Bely, V. A. Smurugov, and V. G. Savkin, *Wear*, 1973. vol. 25, pp. 301.
- [26] K. Tanaka, Y. Uchiyama and S. Toyooka, *Wear*, 1973, vol. 23, pp. 153.
- [27] J.R. Atkinson, K.J. Brown and D. Dowson, The Wear of High Molecular Weight Polyethylene, Part 1: The Wear of Isotropic Polyethylene against Dry Steel in Unidirectional Motion, *Transactions ASME, Journal of Lubrication Technology*, 1978, vol. 100, pp. 208–218.
- [28] I. V. Kragelskii, M. N. Dobyichin and V. S. Kombalov, *Friction and Wear Calculation Methods*, Oxford, Pergamon Press, 1982.
- [29] S. P. Gubin, Yu. A. Koksharov, G. B. Khomutov and G. Yu. Yurkov, *Russ. Chem. Rev.*, 2005, vol. 74, pp. 489.
- [30] L. Yu and S. Bahadur, *Wear*, 1998, vol. 214, pp. 245.
- [31] V. L. Vakula and L. M. Pritykin, *Physical Chemistry of Polymer Adhesion*, (Khimia, Moscow, 1984) (in Russian).



- [32] C.W. Bunn and E.R. Howells, Structures of Molecules and Crystals of Fluorocarbons, *Nature*, 1954, vol. 174, pp. 549–551.
- [33] C.M. Pooley and D. Tabor, Friction and Molecular Structure: the Behaviour of some Thermoplastics, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, 1972, vol. 329, pp. 251–274.
- [34] K. Tanaka, Effects of Various Fillers on the Friction and Wear of PTFE-Based Composites, in *Composite Materials Science*, editor: K. Friedrich, Elsevier, Amsterdam, 1986, pp. 137–174.
- [35] K. R. Makinson and D. Tabor. The Friction and Transfer of Polytetrafluoro-ethylene, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, 1964, vol. 281, pp. 49–61.
- [36] D.H. Buckley, *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication*, Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [37] D. Gong, Q. Xue and H. Wang, ESCA Study on Tribochemical Characteristics of Filled PTFE, *Wear*, 1991, vol. 148, pp. 161–169.
- [38] J.M. Thorpe, Tribological Properties of Selected Polymer Matrix Composites against Steel Surfaces, in *Composite Materials Science*, editor: K. Friedrich, Elsevier, Amsterdam, 1986, pp. 89–135.
- [39] B. Briscoe, Wear of Polymers: an Essay on Fundamental Aspects, *Tribology International*, 1981, vol. 14, pp. 231–243.
- [40] K. Tanaka and T. Miyata, Studies on the Friction and Transfer of Semi-Crystalline Polymers, *Wear*, 1977, vol. 41, pp. 383–398.
- [41] V.K. Jain and S. Bahadur, Material Transfer in Polymer–Polymer Sliding, *Wear*, 1978, vol. 46, pp. 177–198.
- [42] Shyam Bahadur<sup>1</sup> and Cris Schwartz, Mechanical and tribological behavior of polymer filled with inorganic particulate fillers, in *Polymer Tribology*, editors: Sujeet K Sinha and Brian J Briscoe, Imperial College Press, 2009, pp 416–448.
- [43] Y. Luo, M. Z. Rong, M. Q. Zhang, Covalently connecting nanoparticles with epoxy matrix and its effect on the improvement of tribological performance of the composites. *Polym. Polym. Composites*, 13 (2005) 245–252.
- [44] M. Z. Rong, M. Q. Zhang, G. Shi, Q. L. Ji, B. Wetzel, K. Friedrich, Graft polymerization onto inorganic nanoparticles and its effect on tribological performance improvement of polymer composites. *Tribol. Int.*, 136 (2003) 697–707.
- [45] Q. Wang, J. Xu, W. Shen, W. Liu, An investigation of the friction and wear properties of nanometer Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> filled PEEK. *Wear*, 196 (1996) 82–86.

- [46] Q. Wang, Q. Xue, H. Liu, W. Shen, J. Xu, The effect of particle size of nanometer  $ZrO_2$  on the tribological behaviour of PEEK. *Wear*, 198 (1996) 216–219.
- [47] Q. Wang, Q. Xue, W. Shen, J. Zhang, The friction and wear properties of nanometer  $ZrO_2$ -filled polyetheretherketone. *J. Appl. Polym. Sci.*, 69 (1998) 135–141.
- [48] Q. Wang, Q. Xue, W. Shen, The friction and wear properties of nanometer  $SiO_2$  filled polyetheretherketone. *Tribol. Int.*, 130 (1997) 193.
- [49] Q. Wang, J. Xu, W. Shen, Q. Xue, The effect of nanometer SiC filler on the tribological behavior of PEEK. *Wear*, 209 (1997) 316–321.
- [50] Q. Xue, Q. Wang, Wear mechanisms of polyetheretherketone composites filled with various kinds of SiC. *Wear*, 213 (1997) 54–58.
- [51] P. Werner, V. Altstadt, R. Jaskulka, O. Jacobs, J. K.W. Sandler, M. S. P. Shaffer, A. H. Windle, Tribological behavior of carbon-nanofibre-reinforced poly (ether ether ketone). *Wear*, 257 (2004) 1006–1014.
- [52] H. B. Qiao, Q. Guo, A. G. Tian, G. L. Pan, L. B. Xu, A study on friction and wear characteristics of nanometer  $Al_2O_3$ /PEEK composites under the dry sliding condition. *Tribol. Int.*, 140 (2007) 105–110.
- [53] P. Jawahar, R. Gnanamoorthy, M. Balasubramanian, Tribological behaviour of clay-thermoset polyester nanocomposites. *Wear*, 261 (2006) 835–840.
- [54] P. Bhimaraj, D. L. Burris, J. Action, W. G. Sawyer, C. G. Toney, R. W. Siegel, L. S. Schadler, Effect of matrix morphology on the wear and friction behavior of alumina nanoparticle/poly (ethylene) terephthalate composites. *Wear*, 258 (2005) 1437–1443.
- [55] Z. Yang, B. Dong, Y. Huang, L. Liu, F.-Y. Yan, H.-L. Li, Enhanced wear resistance and micro-hardness of polystyrene nanocomposites by carbon nanotubes. *Mater. Chem. Phys.*, 94 (2003) 109–113.
- [56] X. Shao, W. Liu, Q. Xue, The tribological behavior of micrometer and nanometer  $TiO_2$  particle-filled poly (phthalazine ether sulfone ketone) composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, 92 (2004) 906–914.
- [57] H. Yan, R. Ning, G. Liang, X. Ma, The performance of BMI nanocomposites filled with nanometer SiC. *J. Appl. Polym. Sci.*, 95 (2005) 1246–1250.