http://journal.rmutp.ac.th/

สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบด้วยอลูมิเนียมออกไซด์สำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม

งามพรรณ ชะโล และ ประกอบ ชาติภุกต์*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. 10800

รับบทความ 31 มีนาคม 2565 แก้ไขบทความ 19 พฤษภาคม 2565 ตอบรับบทความ 20 พฤษภาคม 2565

บทคัดย่อ

ในการดำเนินการวิจัยด้านวัสดุเพื่อหาสูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบสองชนิด คือ ผงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) กับผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding process) ที่ให้ค่าสมบัติทางกลที่ดีและสมบัติความต้านทานการสึกหรอสูง สภาวะที่เหมาะสมในการอัดขึ้นรูปอยู่ภายใต้ความดัน 100 บาร์ และอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จากนั้นดำเนินการอัดขึ้นรูปวัสดุผง UHMWPE ที่ผสมแล้วด้วยอัตราส่วนผสมต่างๆ ที่มีฟิลเลอร์เป็น Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 0.3 µm (300 nm), 0.05 µm (50 nm), Calcined Al_2O_3 B-grad 5 µm และ Al_2O_3 HTM 2-5 µm จากการวิจัยได้เลือกใช้เกรดของ Al_2O_3 เป็น Al_2O_3 HTM 30 มีขนาดอนุภาคผงไม่สม่ำเสมอคละเคล้ากันไปอยู่ในช่วง 2 ถึง 5 µm และปริมาณการผสม Al_2O_3 ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุก้อน UHMWPE composite คือ UHMWPE+Al_2O_3 HTM 30 ที่อัตราส่วนร้อยละ 95:5 โดยพิจารณาทั้งในด้านสมบัติของวัสดุและต้นทุน ในการทดสอบการกระแทกพบว่า Al_2O_3 HTM 2-5 µm จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าอลูมิเนียมออกไซด์เกรดอื่นๆ ด้วยค่าที่สูงถึง 586.8 J/m ที่อัตราส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5 การทดสอบค่าความแข็งของ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 2-5 µm พบว่าให้ค่าความแข็งอยู่ที่ 58.8 ด้วยเครื่องมือมาตรฐาน Durometer การทดสอบแรงดึงได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength เท่ากับ 20.52 MPa, Ultimate Tensile Strength เท่ากับ 29.96 MPa, Breaking Strength เท่ากับ 22.83 MPa, Elongation at Break เท่ากับ 265.8% และ Modulus of elasticity เท่ากับ 784.46 MPa

คำสำคัญ : สมบัติทางกล; โพลีเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด; อลูมิเนียมออกไซด์

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 8279 5855, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: prakorb.c@rmutp.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

Mechanical Properties of UHMWPE Composite with Al_2O_3 for Application in Engineering

Ngampan Chalo and Prakorb Chartpuk*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

1381 Pracharat 1 Road, Wongsawang Sub-district, Bang Sue District, Bangkok, Thailand

Received 31 March 2022; Revised 19 May 2022; Accepted 20 May 2022

Abstract

In conducting the research on Material Science, two composite materials, ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) powder and aluminum oxide (Al_2O_3) powder were formulated by hot compression molding process. The formulated materials demonstrated good mechanical properties and high wear resistance properties. Based on the studies, the Al_2O_3 grade selected was Al_2O_3 HTM 30 harboring mixed uneven powder particle sizes ranging from 2 to 5 microns (μm) and selected proportion of Al_2O_3 alloy mixed for improving mechanical and wear resistance properties of the UHMWPE composite material was the UHMWPE+Al_2O_3 HTM 30 at a ratio of 95:5%. When considering both material properties and cost effectiveness in the impact test, 2-5 μm Al_2O_3 HTM carried the higher impact strength than other aluminum oxide grades with the values up to 586.8 J/m at a ratio of 5% aluminum oxide. The hardness test of the 2-5 μm UHMWPE+ Al_2O_3 HTM delivered the hardness at 58.8 using the standard durometer. The tensile test values consisted of Yield Strength, Ultimate Tensile Strength, Breaking Strength, Elongation at Break, and Modulus of elasticity equal to 20.52 MPa, 29.96 MPa, 22.83 MPa, 265.8% and 784.46 MPa, respectively.

Keywords : Mechanical Properties; UHMWPE; Al_2O_3

** Corresponding Author. Tel.: +669 8279 5855, E-mail Address: prakorb.c@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มหันมาให้ความสนใจกับการนำเอาพอลิเมอร์มาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมมากขึ้น แต่พอลิเมอร์บริสุทธิ์ส่วนใหญ่มีสมบัติทางกลและสมบัติความต้านทานการสึกหรอต่ำ ซึ่งบางครั้งไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานบางประเภท เช่น พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene: UHMWPE) ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านการแพทย์ UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนรองลื่นที่เป็นส่วนประกอบของข้อต่อเทียมต่างๆ (Total joint replacement) สำหรับงานศัลยกรรมกระดูกและกล้ามเนื้อ หรือการนำเอา UHMWPE บริสุทธิ์ที่ทำการขึ้นรูปแล้วมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล UHMWPE ถูกนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อาทิ เช่น เฟือง เกียร์ แบริ่ง ชิ้นส่วนรองลื่นสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่าง ๆ [1]

เนื่องจาก UHMWPE เป็นวัสดุพอลิเมอร์หรือพลาสติกวิศวกรรมในกลุ่มพอลิเอทิลีน (Polyethylene; PE) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งผลึก (Semi crystalline) มีสมบัติเด่นทางด้านความต้านทานการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ ความเสียดทานต่ำ ความลื่นตัวสูง คงทนต่อแรงกระแทก เฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีและสารเคมีต่าง ๆ [2], [3] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เหล่านี้ด้วยการผสมสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆ เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ให้สูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง เนื่องการใช้งานของชิ้นส่วน เครื่องจักรกลเหล่านี้ต้องทำงานภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันและสารหล่อลื่นชนิดต่าง ๆ ความสึกหรอที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้น หากชิ้นส่วนต่าง ๆ อยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น และการใช้งานที่อยู่ภายใต้ภาวะความเค้นและความเครียดที่สูง เครื่องจักรต้องได้รับการตรวจซ่อมบำรุงอยู่เป็นประจำ และชิ้นส่วนจะถูกเปลี่ยนบ่อยขึ้น และนอกจากนี้ยังมีการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูป ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านการขึ้นรูปนี้โดยทั่วไปจะถูกเรียกว่า พอลิเมอร์คอมปาวด์ (Polymer compound) สารเติมแต่งที่ใช้ผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ คือ ฟิลเลอร์ (Filler) ซึ่งหมายถึงสารเติมแต่งที่ผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มเนื้อหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ และนอกจากนี้บางกรณีฟิลเลอร์ยังมีส่วนช่วยลดต้นทุนการผลิตชิ้นงานที่ทำจากพอลิเมอร์ เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มเนื้อแต่จะส่งผลต่อสมบัติบางประการที่เปลี่ยนไปในทางลบหรือบวกก็เป็นได้ ทั้งนี้ได้เลือกใช้สารเติมแต่งที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

Al_2O_3 เป็นเซรามิกส์ชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของวัสดุเซรามิกทำให้มีความเหมาะสมเป็นพิเศษ เช่น ค่าความแข็งสูง สามารถต้านทานสูงต่อการขูดขีด) มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ ปฏิกิริยาต่ำ (ความต้านทานต่อสารเคมีดี) และความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูง [4] ดังนั้นงานวิจัยจึงมุ่งเน้นหาสูตรสำหรับการผสมและสภาวะการขึ้นรูปที่เหมาะสมของ UHMWPE ที่ถูกผสมด้วย Al_2O_3 เพื่อให้ทราบสมบัติทางกลและนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบในการขึ้นรูปล้อรันแฟลท (Run-Flat) สำหรับรถยนต์นั่งและรถบรรทุกขนาดเล็กต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ในระเบียบวิธีวิจัยได้กำหนดวัสดุเป็น UHMWPE และ Al_2O_3 ที่นำมาใช้ในการวิจัย ซึ่ง UHMWPE มีขนาดอนุภาคในช่วง 80-100 μm ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่ามีความบริสุทธิ์และในการดำเนินงานสร้างชิ้นทดสอบจะปราศจากการปนเปื้อนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตชิ้นงานทดสอบด้วยการอัดขึ้นรูปร้อน จะได้วัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous material) มีการกระจายตัวของอนุภาค Al_2O_3 ทั่วทั้งปริมาตรของชิ้นทดสอบและ

มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทุกทาง (Isotropic materials)

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. วัสดุผง UHMWPE U511 เป็นพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด พร้อมตัวกันการกัดกร่อน (CS) ในรูปแบบผงโดยมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 5.5 ล้านกรัมต่อโมล มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 125 µm น้ำหนักโมเลกุลที่สูงมากให้คุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์หลายประการ รวมถึงความต้านทานต่อการเสียดสีสูง ความต้านทานแรงกระแทก และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ ของบริษัท IRPC Public Company Limited ประเทศไทย มีสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (UHMWPE) [5]

Properties	Method	Unit	Value
Density	ISO 1183	g/cm^3	0.93
Bulk density	ISO 60	g/cm^3	≥ 0.40
Intrinsic viscosity [η]	ISO 1628–3	ml/g	2300
Average molecular weight (cal.)	Margolies's Eq.	g/mol	5.5x10^6
Average particle size, X50	Laser Scattering	µm	150
Tensile strength at yield	ISO527	MPa	22
Tensile strength at break	ISO527	MPa	35
Ultimate elongation	ISO527	%	≥ 300
Izod impact strength	ASTM D256	J/m	NB
Hardness	ISO 868	Shore D	63
Melting temperature (10°C/min)	ASTM D3418	°C	130–135
Vicat softening point (1kg)	ISO 306	°C	125–128

ตารางที่ 2 สมบัติของอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) [6]

Property	Al_2O_3
Molecular weight (10^6 g/mol)	101.96
Melting temperature (°C)	2072
Poisson's ratio	0.22
Specific gravity (g/cm^3)	3.96
Tensile modulus of elasticity* (GPa)	370
Compressive Strength (MPa)	2600
Tensile ultimate strength* (MPa)	260
Fracture Toughness MPa-m½	4
Density (g/cc)	3.9

2. Al_2O_3 ที่มีขนาดอนุภาคต่าง ๆ มีสมบัติดังตารางที่ 2 และผ่านการตรวจสอบรูปลักษณ์สัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด ประกอบด้วย

- 0.05 µm (50 nm) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท BUEHLER จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 0.3 µm (300 nm) เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท BUEHLER จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2-5 µm เป็น Al_2O_3 99.5%, HTM30 grade, Alpha phase ผ่านการ Calcined ผลิตโดยบริษัท Indian Aluminium Co., Ltd.
- 5 µm เป็น Al_2O_3 99.4%, Calcined B-grade ผลิตโดยบริษัท Indian Aluminium Co., Ltd.

2.2 เครื่องมือและมาตรฐานการทดสอบ

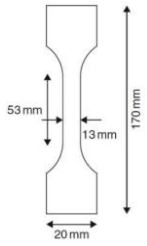
1. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.0001 g /0.1 mg ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น ATX224R
2. เตาอบลมร้อนยี่ห้อ Binder รุ่น FD 53L
3. เครื่อง High speed homogenizer และ Ultrasonic disperser
4. แม่พิมพ์สำหรับการอัดขึ้นรูป และเครื่อง Compression press
5. เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ สำหรับตัดแต่งชิ้นทดสอบได้ขนาดตามที่ต้องการ ได้แก่ เลื่อยสายพาน เครื่องกัด และกระดาษทรายสำหรับขัดเตรียมชิ้นงาน
6. เครื่องทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D 638
7. เครื่องทดสอบความแข็ง Shore D แบบ Shore D ที่อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D2240 โดยทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D
8. เครื่องมืออุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย 1) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscopy) 2) กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ยี่ห้อ

JEOL model JSM-IT300 3) Differential Scanning Calorimeter และ 4) FT-IR spectroscopy ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 การตรวจพิสูจน์เกี่ยวกับโมเลกุลของสารด้วยเครื่อง FT-IR spectroscopy สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดในช่วงประมาณ 12800 ถึง 10 cm^{-1} ซึ่งความยาวคลื่น (wave number) สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วง Far IR (200 ถึง 10 cm^{-1}) Mid IR (4000 ถึง 200 cm^{-1}) และ Near IR (12800 ถึง 4000 cm^{-1})

2.3 กระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

นำผง UHMWPE บริสุทธิ์ มาทำการผสมกับผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีอนุภาคขนาด 0.05 μm (50 nm), 0.3 μm (300 nm), 2-5 μm HTM30 grade และ 5 μm Calcined B-grade สำหรับในส่วนของการเตรียมผง UHMWPE ผสมฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 จะต้องทำการผสม UHMWPE กับฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 โดยเริ่มจากการนำฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 ไปทำให้เกิดการกระจายตัว (De-agglomerate) ด้วยเครื่อง Ultrasonic disperser เป็นระยะเวลา 10 min เพื่อป้องกันและแยกฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 ไม่ให้จับตัวเป็นกลุ่มก้อน โดยใช้เมทิลแอลกอฮอร์เป็นตัวกลางในการทำให้เกิดการกระจายตัว จากนั้นจึงทำการปั่นผสมฟิลเลอร์อนุภาค Al_2O_3 รวมกับ UHMWPE ด้วยเครื่อง High speed homogenizer ด้วยความเร็วรอบ 32,000 rpm เป็นเวลา 10 min หลังจากนั้นใช้เมทิลแอลกอฮอร์เป็นตัวกลางช่วยในการปั่นผสม เนื่องจากผง UHMWPE มีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเมทิลแอลกอฮอร์ส่งผลให้ UHMWPE สามารถจมลงในเมทิลแอลกอฮอร์ได้ และนอกจากนี้เมทิลแอลกอฮอร์ยังสามารถกำจัดออกได้ง่ายจากระเหยออกได้ตามธรรมชาติ

รูปที่ 1 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบแรงดึง



รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638

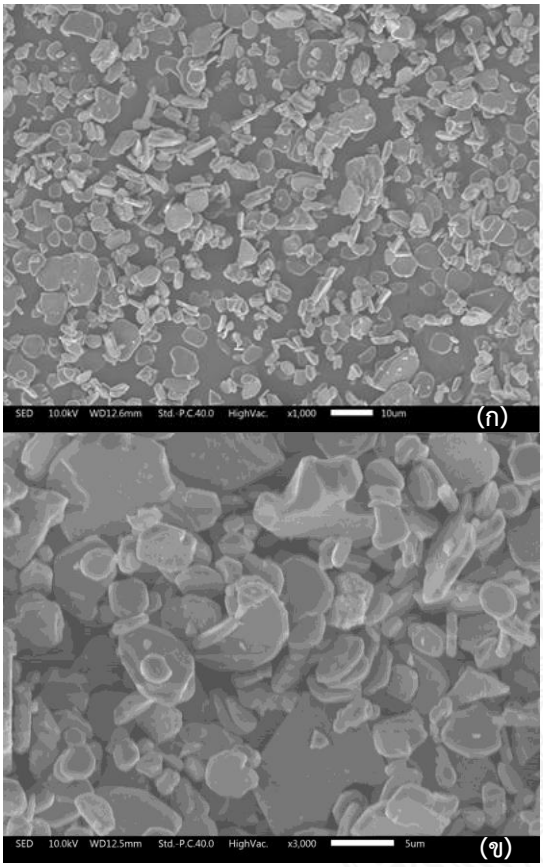
หลังจากนั้นทำการอัดขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Hot Compression Molding ในแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 160×80×50 mm จะได้ชิ้นงานตามขนาดแม่พิมพ์และความหนา 10 mm แล้วนำมาทำการกัดเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึงดังรูปที่ 1 ที่มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 ดังรูปที่ 2

3. ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ

3.1 ผลการศึกษาวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของผงวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

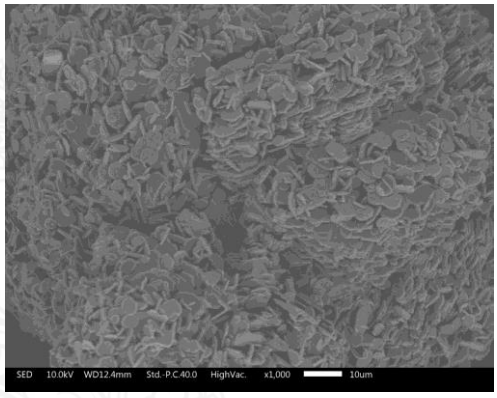
ผงอลูมิเนียมออกไซด์ Al_2O_3 เป็นวัสดุฟิลเลอร์ที่ใช้ในการทำวิจัย ก่อนการอัดขึ้นรูปแผ่นเซรามิกส์ทำการศึกษากระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างของผงวัสดุที่ทดสอบ ก่อนจะนำชิ้นงานวิเคราะห์จะต้อง

ทำการเคลือบทองคำลงบนผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง Sputter Coaters ยี่ห้อ QUORUM รุ่น Q150R ES ใช้สำหรับการเคลือบผิวเป็นขั้นตอนสุดท้ายการเตรียมตัวอย่าง ซึ่งจะทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าในสภาวะความเป็นสุญญากาศสูง (HV) ซึ่งจะใช้โลหะฉาบลงบนตัวอย่างภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อทำให้เกิดสภาพการนำไฟฟ้า

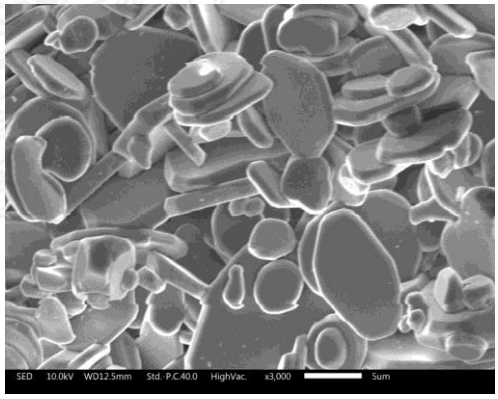


รูปที่ 3 รูปลักษณ์สัณฐานของ Al_2O_3 HTM 30 grade ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด, (ก) ที่กำลังขยาย x1000 และ (ข) ที่กำลังขยาย x3000

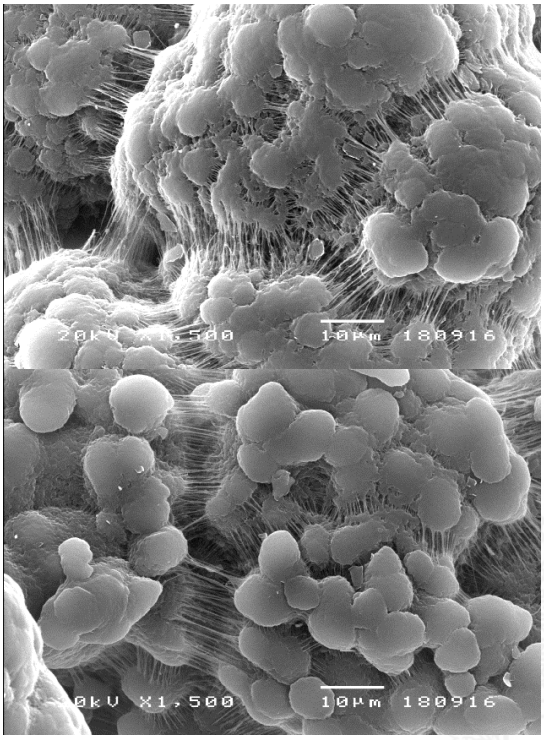
จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope : (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-IT300 ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างขนาดเล็กมาก ๆ ของตัวอย่างทางชีวภาพ และยังได้ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผงวัสดุทดสอบด้วย ชุดวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : (EDS) ยี่ห้อ OXFORD รุ่น X-MAX (IE-350) จากนั้นนำชิ้นงานทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) : ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Miniflex ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นี้สามารถแสดงโครงสร้างผลึกของสสารได้ โดยลำแสงอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุ ทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 2 และ 3 มิติ ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 4 รูปลักษณ์สัณฐานของ Al_2O_3 Calcined B grade ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด, ที่กำลังขยาย x1000



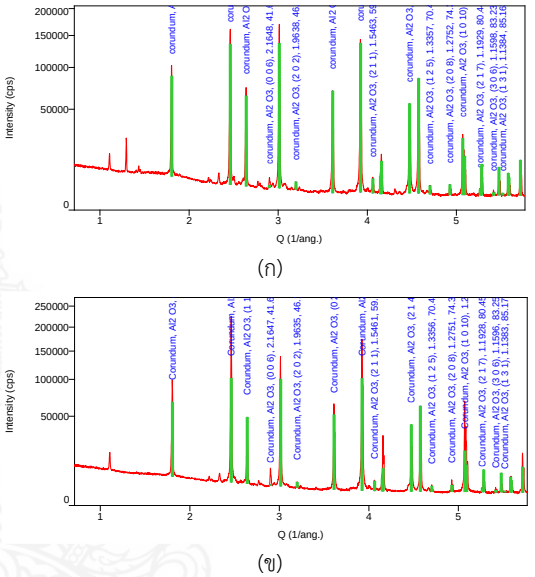
รูปที่ 5 รูปลักษณ์สัณฐานของ Al_2O_3 Calcined B grade ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด, ที่กำลังขยาย x3000



รูปที่ 6 รูปลักษณ์สัณฐานของ UHMWPE ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ภาพลักษณะสัณฐานของผงอลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 ด้วยกำลังขยายที่ 1,000 และ 3,000 เท่า จากการศึกษาโครงสร้างพบว่า Alumina Al_2O_3 B-Grade มีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 5 µm และอนุมัติผงจะมีขนาดไล่เลี่ยใกล้เคียงกัน แต่สำหรับ Alumina Al_2O_3 HTM 30 มีขนาดอนุภาคผงอยู่ที่ประมาณ 2-5 µm มีขนาดไม่สม่ำเสมอคละเคล้ากันไปอยู่ในช่วง 2-5 µm

ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ X-Ray Diffractometer : (XRD) จะบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆได้ ยิ่งไปกว่านั้นผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนางานวิจัย งานในกระบวนการผลิต จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึง XRD Pattern ของอะลูมิเนียมออกไซด์และ UHMWPE ได้อย่างชัดเจน เป็น Corundum Al_2O_3 มีรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอลรูปหกเหลี่ยม

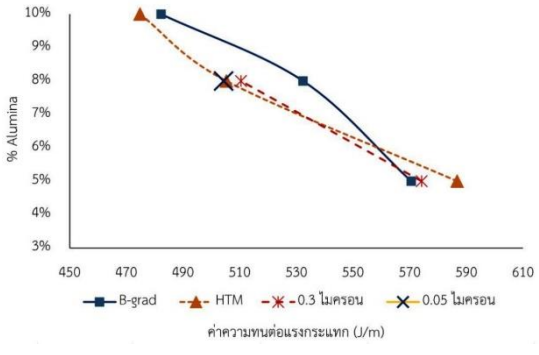


รูปที่ 7 รูปลักษณ์วิเคราะห์ธาตุอลูมิเนียมออกไซด์ (ก) Calcined Al_2O_3 B grade และ (ข) Calcined Al_2O_3 HTM 30

3.2 ผลการทดสอบแรงกระแทก

ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก มีขนาดชิ้นงานทดสอบ ความกว้างxความหนา โดยประมาณเท่ากับ 12.7x10 มิลลิเมตร มีความลึกของรอยบาก 2.54 มิลลิเมตร ที่มีการผสมระหว่าง UHMWPE ที่เป็นวัสดุหลัก และผสมฟิลเลอร์ที่เป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ขนาดอนุภาค 0.3 µm (300 nm), 0.05 µm (50 nm), Calcined Al_2O_3 B-grade 5 µm และ Al_2O_3 HTM 2-5 µm ที่อัตราส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5, 8 และ 10 แต่ละอัตราส่วนผสมผ่านการทดสอบแรงกระแทกด้วยชิ้นงานทดสอบชุดละ 6 ชิ้นทดสอบ ทำให้

ได้ผลการทดวอบคือค่า Impact Energy (J) และค่าความทนต่อแรงกระแทก (J/m) จากรูปที่ 8 และตารางที่ 3 พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกต่ำลง แม้ว่าการเพิ่มร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ลงไปใน UHMWPE ที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าของความแข็งสูงขึ้นก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5 พบว่า Al_2O_3 HTM 2-5 µm จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าอลูมิเนียมออกไซด์เกรดอื่นๆ ด้วยค่าที่สูงถึง 586.8 J/m ในด้านขนาดอนุภาคของอลูมิเนียมออกไซด์ตั้งแต่ 0.05 µm, 0.3 µm และ 5 µm แม้ว่าเกรดของอลูมิเนียมออกไซด์จะต่างกัน แต่ก็ไม่ได้ส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกแตกต่างจนมีนัยสำคัญ และขนาดอนุภาคอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากจะยิ่งต้นทุนราคาที่สูงตามไปด้วย ซึ่งต้องมองในด้านของต้นทุนที่จะเป็นบทสรุปนำไปใช้ต่อยอดสู่การใช้งานจริงอย่างเป็นรูปธรรม สำหรับการพิจารณาในด้านค่าความทนต่อแรงกระแทกเบื้องต้นนี้ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละของอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 5 และ 8 เป็นส่วนผสมที่ควรนำไปพิจารณาประกอบกับค่าการดสอบด้านอื่นๆ ต่อไป (ทั้งนี้อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 จะดีกว่าที่ร้อยละ 8)



รูปที่ 8 ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ส่วนผสมของอลูมิเนียมออกไซด์ต่างๆ

ตารางที่ 3 ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่ร้อยละของ Al_2O_3 ที่เกรดต่างๆ

Al_2O_3	B-grade	HTM30	0.3 µm	0.05 µm
5%	570.54	586.79	574.27	-
8%	532.36	505.31	510.47	504.35
10%	482.26	474.81	-	-

3.3 ผลการทดสอบความแข็ง

การวัดความแข็งที่ถูกต้องจะต้องเลือกการทดสอบให้ถูกต้อง เช่น ในการทดสอบนี้จะเลือกเครื่องวัดความแข็ง Durometer ยี่ห้อ TECLOCK รุ่น GS-702G Type D ดังรูปที่ 9 ในการทดสอบแบบ Shore D ที่หัวเข็มมีลักษณะแหลม (หัวเข็มเป็นส่วนสำคัญมากที่จะต้องเลือกให้ถูกต้อง) การวัดความแข็งในหน่วย Shore D นั้นจะวัดความแข็งออกมาด้วยการพิจารณาจากระยะของหัวเข็มที่จมลงไปในเนื้อวัสดุแล้วแปลงค่าออกมาเป็นค่าความแข็งในหน่วย Shore ผลการทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 (JIS K 7215 D, ISO R 868 D)

รูปที่ 9 เครื่องทดสอบความแข็ง Durometer แบบ Shore D

ผลของค่าที่เพิ่มขึ้นจะหมายถึงวัสดุนั้นมีค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 4 พบว่าขนาดอนุภาคผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่า จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น สำหรับชนิดของ Calcined Al_2O_3 B-grade 5 µm และ Al_2O_3 HTM 2-5 µm เมื่อผสมลงไปใน UHMWPE แล้วจะไม่เห็นความแตกต่างของค่าความแข็ง ทั้งนี้ความแตกต่างของอนุภาคที่เล็กลง คือ 0.3 µm หรือ 0.05 µm จะไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างของค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 5 และ 8 ของ Calcined Al_2O_3 B-grade 5 µm และ Al_2O_3 HTM 2-5 µm เป็นสิ่งที่ควรนำไปประกอบการพิจารณาเลือกใช้

ตารางที่ 4 ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ร้อยละของ Al_2O_3 ที่เกรดต่างๆ

Specimens	Durometer Hardness (Shore D)	SD
B-grade 5%	56.6	0.92
B-grade 8%	58.4	1.02
B-grade 10%	59.2	0.75
HTM-30 5%	58.8	1.72
HTM-30 8%	59.2	1.60
HTM-30 10%	59.4	0.49
Alumina 0.3 µm 5%	60.8	1.66
Alumina 0.3 µm II 8%	59.7	0.90
Alumina 0.05 µm 8%	61.9	2.47

3.4 ผลการทดสอบแรงดึง

ในการทดสอบแรงดึงจะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa), Ultimate Tensile Strength (MPa), Breaking Strength (MPa), Elongation at Break (%) และ Modulus of elasticity (MPa) ด้วยการเตรียมชิ้นงานทดสอบชุดละ 5 ชิ้นงานและนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละค่า จากการทดสอบพบว่าที่ส่วนผสมระหว่าง UHMWPE และอลูมิเนียมออกไซด์ที่เหมาะสม คือ UHMWPE+HTM-30 5% ค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบจาก UHMWPE ผสมกับ Al_2O_3 ร้อยละ 5, 8 และ 10 ด้วยขนาดอนุภาค 0.3 µm, 0.05 µm, Calcined Al_2O_3 B-grade 5 µm และ Al_2O_3 HTM 2-5 µm

Specimens (140° C, 10 MPa, 45min)	Yield Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE + B-grad 5%	12.2	12.2	12.2	12.7	12.7	12.41	0.25
UHMWPE+B-grad 8%	12.3	12.2	12.2	12.2	12.3	12.21	0.05
UHMWPE+B-grad 10%	11.3	10.9	10.6	10.6	11	10.88	0.27
UHMWPE+HTM-30 5%	20.6	21.3	20.2	20.2	20.3	20.52	0.43
UHMWPE+HTM-30 8%	10.6	11.2	11.5	10.8	10.9	11.01	0.33
UHMWPE+HTM-30 10%	11.8	11.5	10.7	11.9	11	11.36	0.46
UHMWPE+Al2O3 0.3 5%	13	12.2	12.4	12.2	12.7	12.5	0.33
UHMWPE+Al2O3 0.3ll 8%	21.9	22.2	21.7	21.9	21.5	21.86	0.22
UHMWPE+Al2O3 0.05 8%	11.1	10.9	12.1	11.5	10.7	11.26	0.48

Specimens (140° C, 10 MPa, 45min)	Elongation at Break (%)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE + B-grad 5%	253	255	258	253	252	254.24	1.95
UHMWPE+B-grad 8%	256	255	255	257	259	256.42	1.54
UHMWPE+B-grad 10%	239	238	243	239	239	239.52	1.6
UHMWPE+HTM-30 5%	265	260	268	266	270	265.8	3.2
UHMWPE+HTM-30 8%	228	225	227	226	230	227.33	3.79
UHMWPE+HTM-30 10%	248	250	257	252	248	251.22	2.46
UHMWPE+Al2O3 0.3 5%	262	258	260	260	263	260.34	1.81
UHMWPE+Al2O3 0.3ll 8%	256	258	258	265	253	258.09	3.77
UHMWPE+Al2O3 0.05 8%	252	253	255	255	252	253.42	1.41

Specimens (140° C, 10 MPa, 45min)	Ultimate Tensile Strength (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE + B-grad 5%	29	28.4	29.5	30.2	29	29.2	0.6
UHMWPE+B-grad 8%	28.8	29.1	28.7	29.8	29.5	29.16	0.42
UHMWPE+B-grad 10%	30.9	28.9	28.3	29.1	30.6	29.57	1
UHMWPE+HTM-30 5%	29	29.4	30.5	30.9	30	29.96	0.71
UHMWPE+HTM-30 8%	29.7	29	28.5	28.2	27.8	28.63	0.87
UHMWPE+HTM-30 10%	29.2	28.6	28.8	30.5	28.9	29.19	0.69
UHMWPE+Al2O3 0.3 5%	29.8	28.8	29.7	30.3	31	29.91	0.71
UHMWPE+Al2O3 0.3ll 8%	28.2	30.7	28.7	29.2	29	29.15	0.82
UHMWPE+Al2O3 0.05 8%	30.5	28.8	29.6	31	29.5	29.85	0.78

Specimens (140° C, 10 MPa, 45min)	Modulus of elasticity (MPa)						
	1	2	3	4	5	Average	SD
UHMWPE + B-grad 5%	795	794	797	795	802	796.62	3.13
UHMWPE+B-grad 8%	845	855	844	848	847	847.66	3.77
UHMWPE+B-grad 10%	909	902	907	913	909	907.99	3.35
UHMWPE+HTM-30 5%	781	784	781	790	786	784.46	3.28
UHMWPE+HTM-30 8%	832	838	837	834	839	836.05	2.5
UHMWPE+HTM-30 10%	869	861	866	867	864	865.54	2.79
UHMWPE+Al2O3 0.3 5%	853	854	857	858	852	854.75	2.23
UHMWPE+Al2O3 0.3ll 8%	886	889	886	883	881	885.04	2.94
UHMWPE+Al2O3 0.05 8%	884	889	887	908	888	889.09	4.84

4. สรุปและอภิปรายผล

พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) ใช้เป็นผงวัสดุหลัก และมีผงอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 เป็นวัสดุเสริม อัตราส่วนระหว่าง UHMWPE และ Al_2O_3 จะอยู่ที่ 95:5 ถึง 92:8 ตามลำดับ ซึ่งรูปลักษณ์สัณฐานจะแบนกลม ขนาดอนุภาคของผง Al_2O_3 จะอยู่ที่ 5 μm ภายใต้การอัดขึ้นรูปร้อนที่แรงอัด 10 MPa ที่อุณหภูมิ 140 ºC เป็นเวลานาน 45 min พบว่า Al_2O_3 HTM 2-5 μm จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าอลูมิเนียมออกไซด์เกรดอื่นๆ ด้วยค่าที่สูงถึง 586.8 J/m ที่อัตราส่วนผสมอลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 5 การทดสอบค่าความแข็งของ UHMWPE+ Al_2O_3 HTM 2-5 μm พบว่าให้ค่าความแข็งอยู่ที่ 58.8 ด้วยเครื่องมือมาตรฐาน Durometer การทดสอบแรงดึงจะได้ค่าต่างๆ ประกอบด้วย Yield Strength (MPa) = 20.52 MPa, Ultimate Tensile Strength (MPa) = 29.96 MPa, Breaking Strength (MPa) = 22.83 MPa, Elongation at Break (%) =265.8% และ Modulus of elasticity (MPa) = 784.46 MPa (ค่าต่างๆ เหล่านี้ซึ่งได้จากการทดลองจะสามารถนำไปใช้ต่อในการวิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์) จึงกล่าวได้ว่าสูตรในการผสมและกระบวนการผลิตในห้องทดลองทำให้ได้ตัวอย่างสูตรที่จะนำไปใช้ในการทดลองสร้างล้อนิรภัยรันแฟลท (Run-Flat) ที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งกระบวนการออกแบบและสร้างล้อรันแฟลทจะเป็นอีกส่วนหนึ่งที่ต้องใช้กระบวนการวิศวกรรมย้อนรอยเข้ามาแก้ไขปัญหาและจะต้องดำเนินการทดสอบการใช้งานจริงทั้งในห้องปฏิบัติการและบนสนามทดสอบจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ พ.ศ. 2561 ตามสัญญาเลขที่ กบง./2559-194 คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และเครื่องมือเครื่องจักร สาธารณูปโภคต่างๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุรัตน์ วรรณศรี ที่ปรึกษาห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

6. บรรณานุกรม

[1] S. Matitopanum, S.Torsakul and S. Wannasri, “The Influence of Forming Variable on Wear Resistance Property of UHMWPE in Ram Extrusion Process,” in Proceeding of IE Network Conference 2013, 16-18 Aug. 2013, Chonburi.

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

[3] M. Hussain et al., “Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as a Promising Polymer Material for Biomedical Applications: A Concise Review,” *Polymers*, vol. 12, no. 323, pp. 1-28, Feb. 2020.

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

[5] POLIMAXX, Safety data sheet, (2017 May), IRPC Public Company Limited, Bangkok.

[6] Alumina, alpha Al_2O_3, 99.5%, Matweb Material property data, Online. [Available]: https://www.matweb.com/search/datasheet

.aspx?matguid=0654701067d147e88e8a38c646dda195&n=1&ckck=1

[7] 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.

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

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

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

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

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

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