บทความวิจัย (Research Article)

อิทธิพลของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติทางไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Influence of sliding velocity and applied load on the tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene.

วิโรจน์ ฉัตรเกษ[1] ไพศาล แก่นนาดี[2] และ มงคล กาสีวงค์[3*]

Wirot Chudget[1], Phaisan Kaennadee[2] and Mongkol Kaseewong[3*]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

[3]สาขาวิชาเครื่องกล (ช่างอากาศยาน) วิทยาลัยการบิน การศึกษา และวิจัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยนครพนม

[1]Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University

[2]Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

[3]International Aviation Education and Research Academy, Nakhon Phanom University

[*]Corresponding author; email: mongkol_kaseewong@npu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
7 มิถุนายน 2569	15 กันยายน 2569	18 กันยายน 2569

บทคัดย่อ

กระบวนการกัดปาดผิวสำเร็จด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรสำหรับอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ต้นทุนต่ำ และสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติไตรโบโลยีของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด เกรด U511 โดยเตรียมตัวอย่าง UHMWPE ด้วยการอัดขึ้นรูป และดำเนินการกัดปาดผิวสำเร็จด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี จากนั้นทำการทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่งภายใต้สภาวะแบบแห้ง โดยควบคุมความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งนี้ ได้ทำการวัดอุณหภูมิของตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ ผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นตามภาระโหลดที่สูงขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.010 ถึง 0.058 ขณะที่อัตราการสึกหรอแปรผันระหว่าง 3.615×10^{-10} ถึง 9.156×10^{-10} mm^3/Nm การเพิ่มความเร็วในการเลื่อนและภาระโหลดแรงกดทำให้เกิดความร้อนสะสมบริเวณผิวสัมผัสจากการเสียดทาน ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวของชิ้นทดสอบเพิ่มขึ้นจาก 25 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงสุด 55 องศาเซลเซียส หลังจากเลื่อนไป 2000 เมตร อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวลง เนื่องจากความร้อนและส่งเสริมการสึกหรอแบบยึดติด นอกจากนี้ สภาพพื้นผิวที่มีความหยาบมากขึ้นยังส่งผลให้เกิดการสึกหรอในระยะเริ่มต้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการก่อตัวของชั้นถ่ายโอนผิวสัมผัสมีแนวโน้มช่วยให้พฤติกรรมการสึกหรอมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: สมบัติไตรโบโลยี, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, อัตราการสึกหรอ, อุณหภูมิตัวอย่าง, พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด

Abstract

The CNC milling process for surface finishing has been widely used in manufacturing of machine components for the food processing industry due to its high efficiency, low cost, and ability to accurately produce complex geometries with high dimensional accuracy. This research investigates the effects of sliding velocity and applied load on the tribological properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE), grade U511. The UHMWPE specimens were fabricated by compression molding, followed by surface finishing using CNC milling. Wear tests were conducted using a block-on-ring configuration under dry conditions, with controlled sliding velocities and normal loads. The specimens' temperature of the coefficient of friction (COF), and wear rate were measured. The results showed that both the COF and wear rate increased with increasing applied load. The COF ranged from 0.010 to 0.058, while the wear rate ranged from 3.615×10^{-10} to 9.156×10^{-10} mm³/Nm. Increasing sliding speed and load promoted frictional heating, raising the surface temperature from 25°C to a maximum of 55°C after 2000 m of sliding. The elevated temperature induced thermal softening of the material and promoted adhesive wear. In addition, rougher surface conditions contributed to higher initial wear; however, the formation of a transfer layer tended to stabilize the wear behavior over time.

Keywords: Tribological Properties, COF, Wear rate, Specimen temperature, UHMWPE

บทนำ

พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra-high molecular weight polyethylene; UHMWPE) เป็นเทอร์โมพลาสติกทางวิศวกรรมที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ในงานด้านการผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักรและระบบกลไกเคลื่อนที่ [1-2] โดยมีการประยุกต์ใช้งานทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น แบริ่ง ลูกล้อ เฟือง [3-4] รวมถึงอุปกรณ์ในระบบของไหล เช่น ใบพัดเรือ ปั๊ม และกังหันไฮดรอลิก [5] เนื่องจากวัสดุนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดีเยี่ยม ความสามารถในการหล่อลื่นด้วยตัวเอง (self-lubrication) ทนต่อแรงกระแทกสูง และทนต่อสารเคมี [5-6] จึงถูกนำมาใช้ทดแทนโลหะดั้งเดิม เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และทองเหลือง [7] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องการลดแรงเสียดทาน ลดการสึกหรอ และเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนในระบบวิศวกรรม

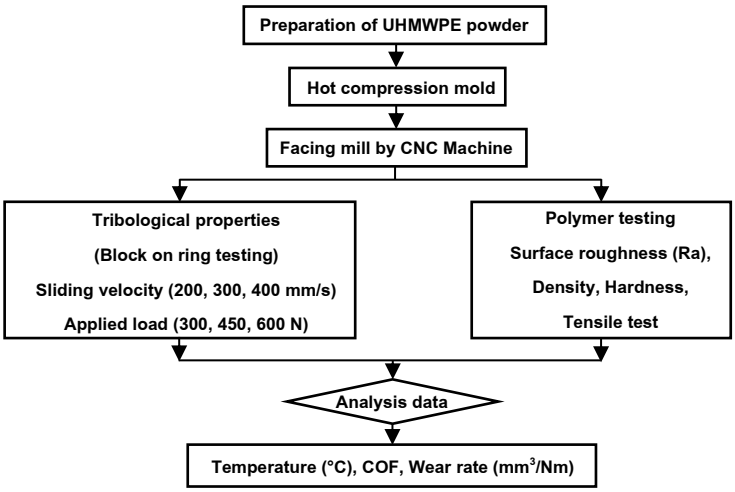
อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงของชิ้นส่วนเครื่องกล มักต้องเผชิญกับการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ หรือการหมุนด้วยความเร็วในการเลื่อนต่ำและภาระโหลดที่แตกต่างกัน [8] ซึ่งสภาวะดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเสียดสีระหว่างพื้นผิวคู่สัมผัสและแรงเสียดทาน [9] ปรากฏการณ์ดังกล่าวมีบทบาทสำคัญต่อการสะสมความเสียหาย การสึกหรอ และการเสื่อมสภาพของวัสดุ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบเสียดทานแห้งของคู่สัมผัสต่างชนิดวัสดุ [10] ในบริบทนี้ พฤติกรรมไตรโบโลยีของ UHMWPE ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะความหยาบผิวที่เกิดจากกระบวนการผลิตหรือการเตรียมผิวก่อนการทดสอบ พื้นผิวใหม่ที่ได้จากการตัดเฉือน (newly generated surface) มักมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากพื้นผิวขัดเงา ซึ่งอาจส่งผลต่อกลไกการสัมผัสและการถ่ายโอนฟิล์มสึกหรอในระบบพอลิเมอร์–โลหะ (เช่น UHMWPE กับ เหล็กกล้าจากปลอกแบริ่ง) ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวสามารถศึกษาได้จากการทดสอบสมบัติไตรโบโลยีด้วยวิธีบล็อกออนริ่ง (Block on ring) [11-12]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่านักวิจัยส่วนใหญ่จะเลือกวิธีการเตรียมพื้นผิวตัวอย่างก่อนการทดสอบการสึกหรอโดยใช้วิธีการขัดเงาด้วยกระดาษทรายละเอียด (เบอร์ 1000 และ 1500) ผลการตรวจสอบพบว่าวัสดุคอมโพสิตมีค่าความหยาบผิว

(Ra) 0.8 ไมโครเมตร (μm) [11] อย่างไรก็ตาม การควบคุมค่าความหยาบผิวของตัวอย่างวงแหวน (Ring) ที่ผลิตจากเหล็ก 45 (S45C) ผ่านการขัดผิวด้วยกระดาษทรายโลหะวิทยา (SiC) มีค่าความหยาบผิว 1.3 μm และก้อนสี่เหลี่ยม (Block) พอลิเมอร์จากพอลิเอไมด์ เกรด PA6 และ UHMWPE มีค่าความหยาบผิว 0.6 μm เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความเข้มสนามแม่เหล็กต่อสมบัติทางด้านแรงเสียดทานในสภาพแวดล้อมน้ำบริสุทธิ์และน้ำทะเล [12] นอกจากนี้ ยังพบการขัดเงาด้วยน้ำยาผสมผงเพชรขนาดอนุภาค 1 μm และ 0.5 μm เพื่อให้พื้นผิวสุดท้ายมีความขรุขระน้อยที่สุด พบว่า UHMWPE บริสุทธิ์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction; COF) สูง เมื่อเทียบกับวัสดุคอมโพสิต แต่มีเส้นโค้งที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนั้นเรียบกว่าเส้นโค้งอื่นๆ มาก [13] นอกจากการขัดผิวแล้ว ยังมีการเตรียมพื้นผิวด้วยกรับวนการตัดเฉือน โดยที่ Basuki และ Ismail [14] รายงานว่าการกัดปาดผิว UHMWPE บริสุทธิ์ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีภายใต้สภาวะการตัดที่เหมาะสมสามารถให้ค่าความหยาบผิวต่ำกว่า 2 μm ได้ ในขณะที่ Song และคณะ [15] ได้ทดสอบการสึกหรอแบบพินออนดิกส์ (Pin on disc) ในสภาวะแบบแห้ง พบว่าสภาวะการตัดเฉือนมีผลต่อโครงสร้างผิวและชั้นใต้ผิวของ UHMWPE ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานและความต้านทานการสึกหรอภายใต้การเลื่อนแบบไปกลับในสภาวะแห้ง (Dry test)

อย่างไรก็ตาม วิธีการเตรียมพื้นผิวดังกล่าวอาจไม่สะท้อนสภาพความเป็นจริงที่เกิดขึ้นของชิ้นส่วนที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนเนื้อวัสดุ UHMWPE ที่มีความเหนียวเป็นพิเศษด้วยเครื่องมือตัด ซึ่งอาจเกิดเป็นรอยคลื่นบนผิวสำเร็จตามการเดินผ่านขอบคมตัดและเป็นสาเหตุสำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบริเวณใกล้ ๆ พื้นผิวของคู่สัมผัส จากเหตุผลดังกล่าว พบว่างานวิจัยทางด้านไตรโบโลยี ส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการวัดเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (COF) อัตราการสึกหรอ(Wear rate) [12-13] ลักษณะพื้นผิว (Surface morphology) [16] และความหยาบผิว (Surface roughness) [17] อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบริเวณใกล้พื้นผิวสัมผัสที่เกิดจากแรงเสียดทานยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างเพียงพอ โดยเฉพาะในกรณีของ UHMWPE ที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding) และผ่านการตัดเฉือนจริง ซึ่งส่งผลให้เกิดลักษณะพื้นผิวและค่าความหยาบผิวที่แตกต่างกัน พื้นผิวดังกล่าวมีความสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมการเสียดทานและการสึกหรอ เนื่องจากสะท้อนสภาวะการใช้งานทางวิศวกรรมได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าพื้นผิวที่ถูกเตรียมขึ้นสำหรับการทดสอบโดยเฉพาะ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อสมบัติไตรโบโลยีของ UHMWPE บริสุทธิ์ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการกัดปาดผิวละเอียด (Finishing) รวมถึงศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของคู่สัมผัสต่างชนิด โดยใช้วิธีการทดสอบแบบบล็อกออนริงภายใต้สภาวะแบบแห้ง นอกจากนี้ ยังมีการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตัวอย่างกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการสึกหรอและพฤติกรรมการเสียดทานของ UHMWPE ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

วิธีดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

วัสดุ

ผง UHMWPE U511 ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 150 μm และน้ำหนักมวลโมเลกุล 5.5x10^6 กรัมต่อโมลเลกุล (g/mol) ดังแสดงในภาพที่ 1 (a) ได้จาก IRPC Public Company limited [18]

การเตรียมตัวอย่าง

ผง UHMWPE ถูกเทลงในแม่พิมพ์เพื่ออัดเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมพื้นผ้า มีขนาดมิติ 80x160x15 มิลลิเมตร (mm) ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (ยี่ห้อ Yong Fong Machine) ดังแสดงในภาพที่ 1 (b) โดยแม่พิมพ์ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจนถึง 190 องศาเซลเซียส (°C) แรงดันในการอัด 30 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (Kg/cm^2) และคงเวลาไว้ 60 นาที (min) จากนั้นปิดระบบความร้อนและแม่พิมพ์ถูกปล่อยให้เย็นตัวลงเองจนถึงอุณหภูมิห้อง [17]

ตัวอย่างถูกกัดปาดผิวละเอียดด้วยดอกเอ็นมิล (End mill) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร จำนวน 2 คมตัด ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีแนวตั้ง 3 แกน ยี่ห้อ Cyclone รุ่น VMC-610 ในขณะกัดปาดผิว ใช้ลมเป่าเพื่อระบายความร้อนและช่วยคายเศษที่เกิดจากการตัดเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 1 (c) และวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่องความหยาบผิว ยี่ห้อ LANDTEK รุ่น SRT-6100 ซึ่งมีค่าความหยาบผิวของตัวอย่าง 1.1536 ± 0.0854 μm เพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักรด้วยเครื่องมือกลพื้นฐานทั่วไป จากนั้น ตัดเป็นก้อนสี่เหลี่ยมขนาดมิติ (กว้างxยาวxสูง) 10x10x10 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3) และเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 (d) เพื่อวัดอุณหภูมิของตัวอย่างในขณะทดสอบการสึกหรอเพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานทั่วไป

นอกจากนี้ วงแหวนที่ใช้เป็นวัสดุเหล็กกล้าจากปลอกแบริ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62 มิลลิเมตร ความกว้าง 21.25 มิลลิเมตร และพื้นผิวมีความหยาบผิว 0.2 μm อย่างไรก็ตาม ก่อนตัวอย่าง UHMWPE ได้ทำการตรวจสอบสมบัติพอลิเมอร์พื้นฐาน ได้แก่ การวัดความหนาแน่นตาม ASTM D792 โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ NADE รุ่น FA2104 วัดความแข็งดูโรมิเตอร์แบบสเกลชอร์ดี ตาม ASTM 2240 โดยใช้เครื่องวัดความแข็งดูโรมิเตอร์ Teclock รุ่น GS702N Type D และทดสอบแรงดึงตาม ASTM D638 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ Lloyd รุ่น LR10K Plus เพื่อประเมินค่าความต้านทานแรงดึง ยังโมดูลัส และอัตราการยืดตัว ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติพอลิเมอร์

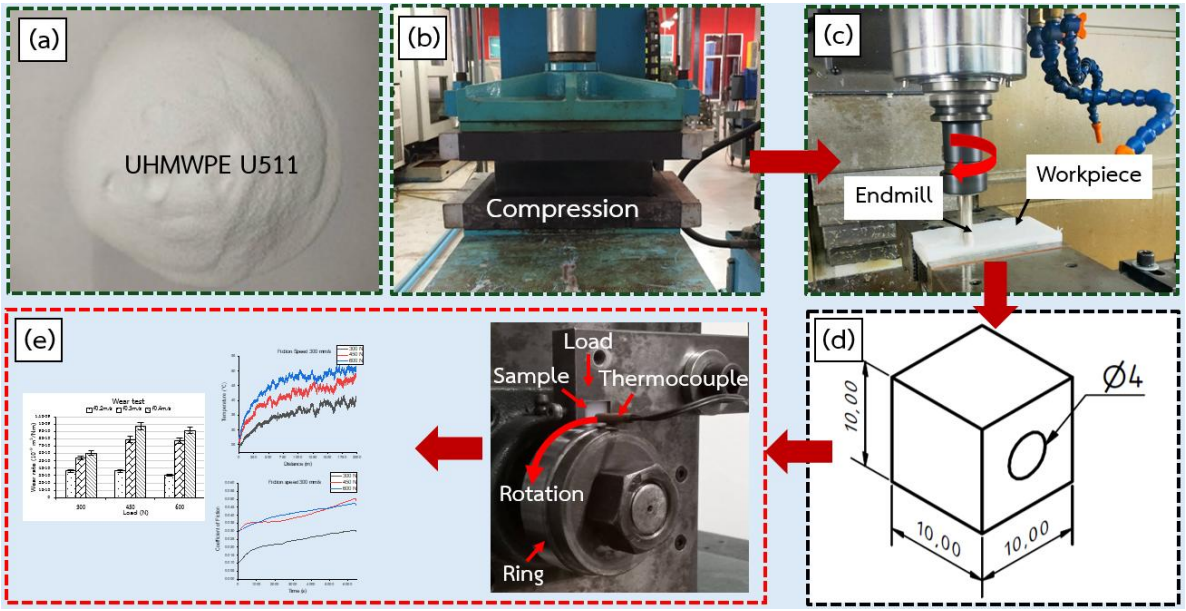
	UHMWPE (U511)
Density (g/cm^3)	0.92
Tensile strength (MPa)	36.72
Young's Modulus (MPa)	631.74
Elongation at break (%)	336.71
Hardness (Shore D)	59
Molecular weight (10^6g/mol)	5.5
Average Particle size (μm)	150

การทดสอบสมบัติไตรโบโลยี

การวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of Friction ; COF) โดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่ง (Block on ring wear test) ตาม ASTM G77 [18] ดังแสดงในภาพที่ 1 (e) โดยกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย แรงกดบนพื้นผิวตัวอย่าง (Applied load) 300 450 และ 600 นิวตัน (N) ความเร็วในการเลื่อน (Sliding velocity) 200 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) และระยะทาง (Distance) 2000 เมตร (m) ภายในสภาพแวดล้อมปกติ ภายใต้สภาวะแบบแห้ง [21] และวัดค่าอุณหภูมิของตัวอย่างโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Type K) ในขณะทดสอบ หลังจากนั้น ตัวอย่างถูกชั่งน้ำหนักที่สูญเสียด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลแบบละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง เพื่อนำค่าน้ำหนักที่สูญเสียไปหาอัตราการสึกหรอ (Wear rate; mm^3/Nm) ตามที่แสดงในสมการที่ (1) [9, 20] นอกจากนี้ ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง UHMWPE หลังทดสอบการสึกหรอถูกนำมาตรวจสอบและวิเคราะห์พื้นผิวคู่สัมผัส โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ของ Dino lite รุ่น AM4115ZT

$$Wear\ rate = \frac{\Delta m}{\rho F_N D} \quad (1)$$

โดยที่ Δm คือ น้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่าง กรัม (*g*) ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ (*g/cm^3*) F_N คือ แรงกดที่ใช้หรือภาระโหลดปกติ นิวตัน และ *D* คือ ระยะทางการเลื่อน เมตร [20]



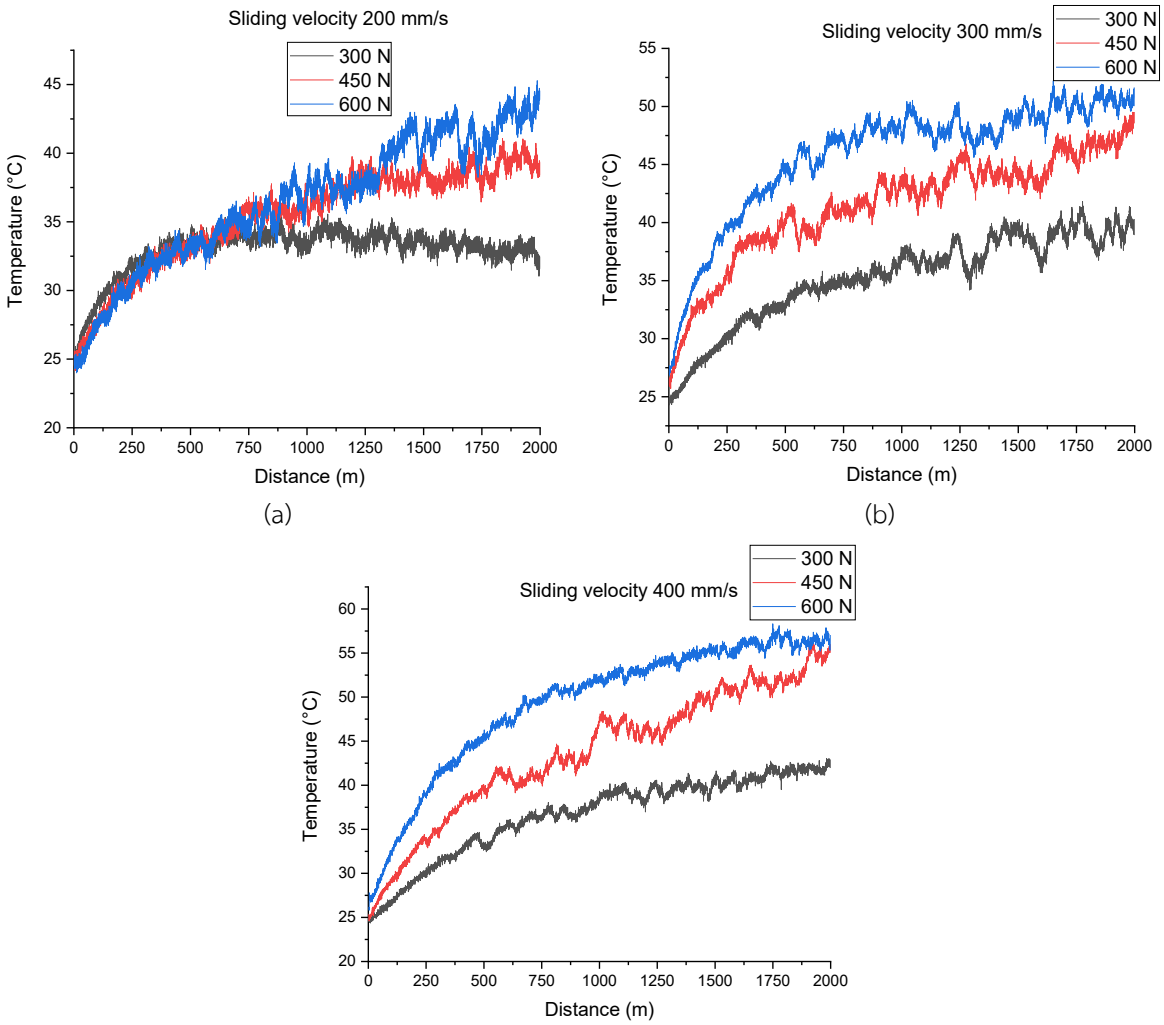
ภาพที่ 1 แสดงการเตรียมชิ้นตัวอย่างและการทดสอบสมบัติไตรโบโลยี (a) ผง UHMWPE U511 (b) การอัดขึ้นรูปแผ่น UHMWPE ด้วยความร้อน (c) การกัดปาดผิวด้วยดอกกัดเอ็นมิลล์ (d) ภาพร่างชิ้นทดสอบการสึกหรอ และ (e) การติดตั้งตัวอย่างสำหรับทดสอบบล็อกออนริ่งและการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

อุณหภูมิของตัวอย่าง

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตัวอย่าง UHMWPE U511 ที่เกิดขึ้นในขณะทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่งภายใต้สภาวะแบบแห้ง โดยใช้ความเร็วเสียดทานและแรงกดบนพื้นผิวที่แตกต่างกัน เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่บันทึกไว้สำหรับระยะทางการเลื่อน 2000 เมตร จากนั้นนำข้อมูลไปสร้างกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตัวอย่าง UHMWPE U511 ดังแสดงในภาพที่ 2 (a) – (c) ตามลำดับ ผลการวัดค่าอุณหภูมิความร้อนของตัวอย่าง UHMWPE U511 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการเลื่อน 200 มิลลิเมตรต่อวินาที พบการเสียดสีกันระหว่างล้อวงแหวนกับพื้นผิวตัวอย่างในช่วงแรกทำให้ความขรุขระลดลงบริเวณผิวสัมผัส ก่อนจะเกิดรอยสึกหรอบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความร้อนสะสมบนพื้นผิวคู่สัมผัส และส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากบริเวณดังกล่าว

นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มแรงกดลงบนพื้นผิวตัวอย่างจาก 300 นิวตัน เป็น 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ ส่งผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยเริ่มต้นอยู่ในช่วง 25 องศาเซลเซียส จากนั้น ค่าอุณหภูมิความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ หลังจากเลื่อนผ่าน 2000 เมตร เพิ่มขึ้นอุณหภูมิของตัวอย่างสูงสุดประมาณ 45 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 2 (a) อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วในการเลื่อนเพิ่มขึ้นเป็น 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิความร้อนของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 2 (b) และ (c) โดยอุณหภูมิของตัวอย่างสูงสุดประมาณ 50 และ 55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิ ความร้อนที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเป็นตัวเร่งให้เกิดรอยสึกหรอได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อความเร็วในการเลื่อนและแรงกดเพิ่มขึ้น [22]

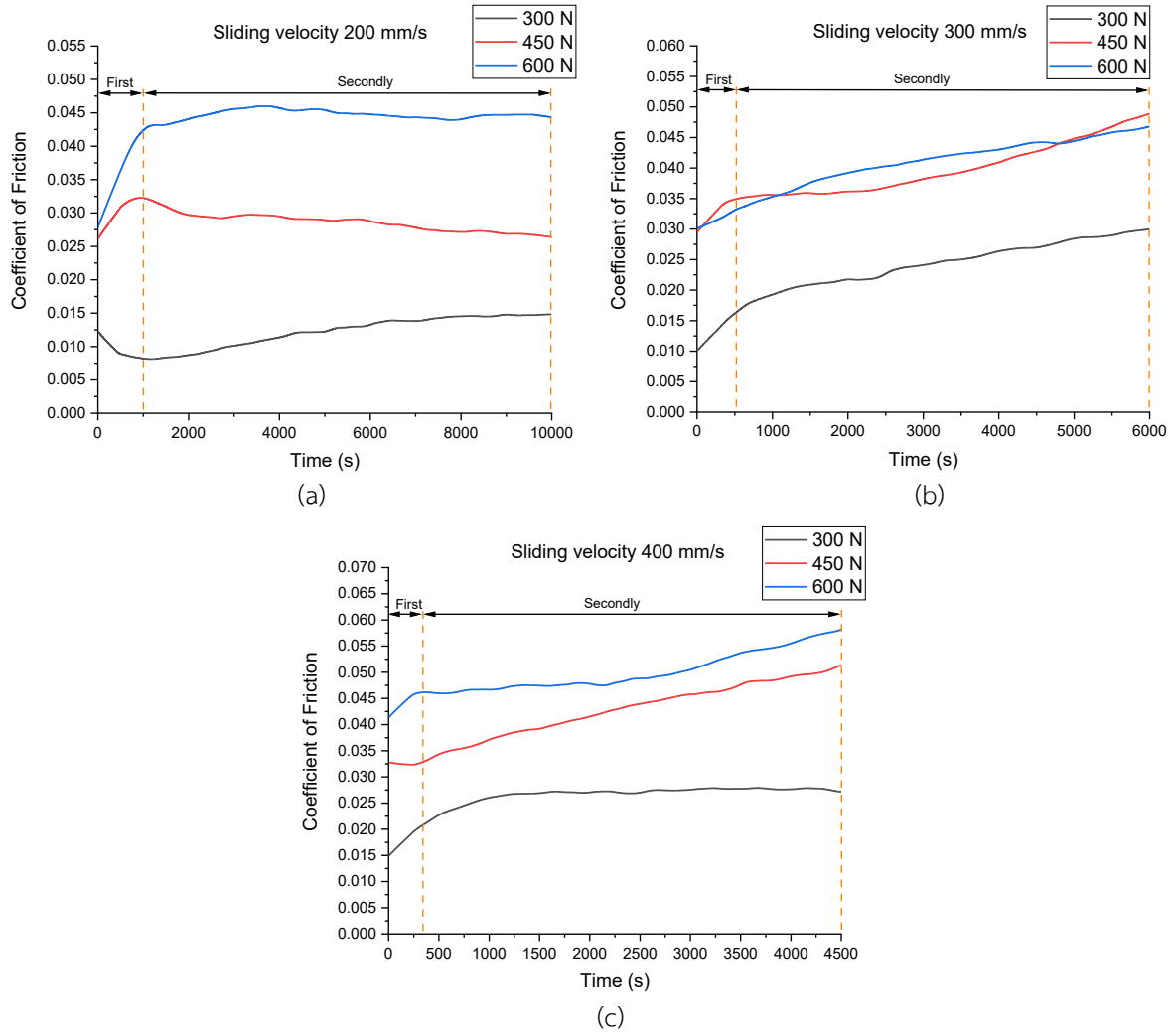


ภาพที่ 2 ผลกระทบของความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่าง UHMWPE U511 (a) ความเร็วในการเลื่อน 200 mm/s (b) 300 mm/s และ (c) 400 mm/s [20]

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของตัวอย่าง UHMWPE U511 ภายใต้ความเร็วเสียดทาน 200, 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และแรงกดที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้อิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งตามเวลา โดยลักษณะเส้นกราฟของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ตามที่ Ming-xue Shen และคณะ [23] ได้กล่าวไว้ ในระยะเริ่มต้น เมื่อล้อวงแหวนเหล็กกล้าหมุนเคลื่อนที่จะเกิดการเสียดสีระหว่างพื้นผิวของคู่สัมผัสภายใต้แรงกดทำให้ยอดคลื่น (Wave peak) หรือความขรุขระของพื้นผิวตัวอย่าง UHMWPE U511 ที่ผ่านการกัดปาดผิวละเอียดลดลงอย่างรวดเร็วและมีความเรียบมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสภาพพื้นผิวคู่สัมผัสเกิดการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้สภาวะทดสอบทำให้พื้นผิวคู่สัมผัสแนบชิดกันมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3 (a) เมื่อแรงกดที่ใช้ 300, 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0.012, 0.026 และ 0.027 ตามลำดับ และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 1000 วินาที แต่ในระยะที่สองค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นและมีความผกผันเล็กน้อย ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นผิวใหม่ (New Surface) เนื่องจากการเสียดสีของคู่สัมผัสทำให้พื้นผิวตัวอย่างเกิดการยืดตัวออกไปตามทิศ

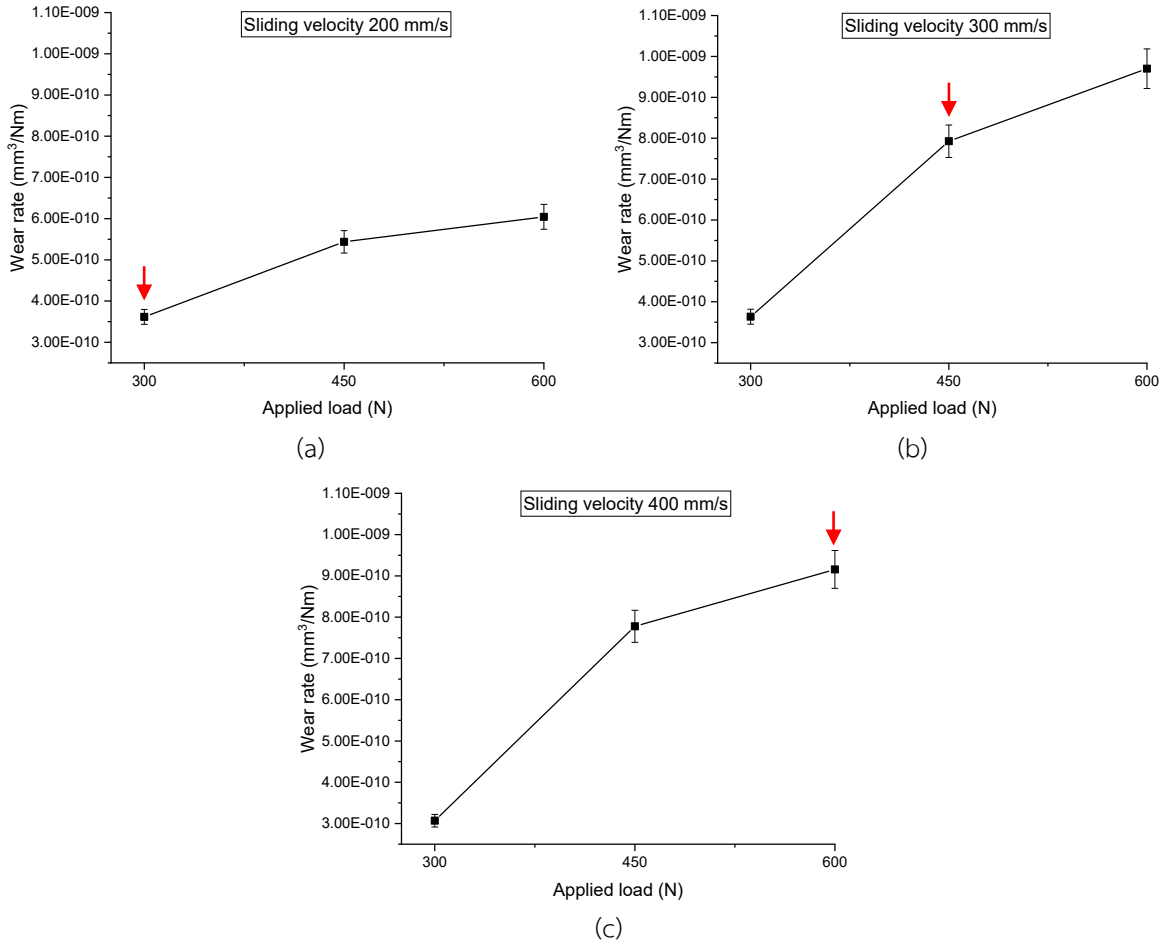
ทางการหมุนของวงแหวน และก่อให้เกิดเศษอนุภาค UHMWPE ขนาดเล็กเกาะติดบนพื้นผิวตัวอย่าง นอกจากนี้ เมื่อแรงกดบนพื้นผิวตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็น 450 นิวตัน และ 600 นิวตัน ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มจะลดลงเล็กน้อย หลังจากเวลาเลื่อนผ่าน 4000 วินาที และเมื่อเวลาในการเลื่อนครบ 10000 วินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.014, 0.026 และ 0.044 ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับตัวอย่างวัสดุ UHMWPE U511 ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน (a) ความเร็วในการเลื่อน 200 mm/s (b) 300 mm/s และ (c) 400 mm/s

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเร็วในการเลื่อน 300 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเวลาเลื่อนผ่าน 500 วินาที และจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามเวลา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเริ่มต้นอยู่ในช่วง 0.010, 0.029 และ 0.030 ตามลำดับ และเมื่อเวลาเลื่อนผ่านครบ 6000 วินาที พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.029, 0.048 และ 0.046 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 3 (b) นอกจากนี้ การเพิ่มแรงกดบนพื้นผิวสัมผัสและความเร็วในการเลื่อน 400 มิลลิเมตรต่อวินาที จะเป็นตัวช่วยเร่งให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน 0.014, 0.032 และ 0.041 ตามลำดับ หลังจากเวลาเลื่อนผ่าน 300 วินาที เมื่อแรงกดบนพื้นผิวตัวอย่างเพิ่มขึ้นเป็น 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ หลังจากนั้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการสะสมอุณหภูมิความร้อนบริเวณผิวสัมผัส ซึ่งส่งผลให้พื้นผิวตัวอย่าง UHMWPE U511 มีแนวโน้มอ่อนตัว

และเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่าย (Plastic deformation) ภายใต้แรงกดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 0.027, 0.051 และ 0.058 ตามลำดับ เมื่อเวลาเลื่อนผ่าน 4500 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 2 (c) นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพพื้นผิวของคู่สัมผัสมีแนวโน้มลดลง เมื่อสภาวะการทดสอบมีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kamil Leksycki และคณะ [23] ตามการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเสียดทานและแรงกด แต่เมื่อแรงกดบนพื้นผิวตัวอย่างลดลงเป็น 300 นิวตัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะแปรผันเล็กน้อย หลังเวลาทดสอบมากกว่า 1000 วินาที จะมีแนวโน้มคงที่และเพิ่มขึ้นตามสภาพพื้นผิวของตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ 3 (c)



ภาพที่ 4 อัตราการสึกหรอของตัวอย่างวัสดุ UHMWPE U511 ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน (a) ความเร็วในการเลื่อน 200 mm/s (b) 300 mm/s และ (c) 400 mm/s

อัตราการสึกหรอ

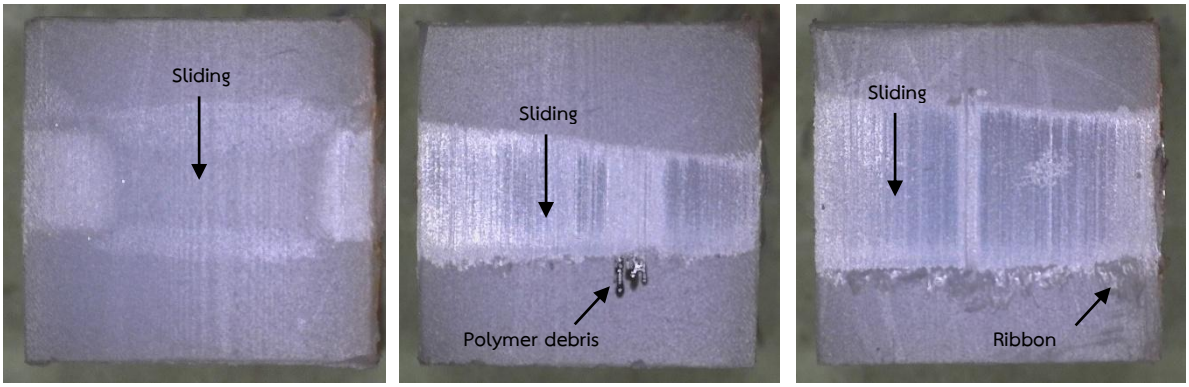
ผลการทดสอบอัตราการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE U511 ที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกระบวนการกัดปาดผิวละเอียด ภายใต้การทดสอบด้วยล้อวงแหวนในสภาวะแบบแห้ง พบว่าอัตราการสึกหรอขึ้นอยู่กับทั้งความเร็วเสียดทานและแรงกดอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ความเร็วในการเลื่อน 200 มิลลิเมตรต่อวินาที และแรงกด 300 นิวตัน ให้ค่าอัตราการสึกหรอต่ำสุดที่ 3.615 x 10^{-10} mm^3/Nm เมื่อเพิ่มแรงกดเป็น 450 และ 600 นิวตัน อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นประมาณ 50% และ 67% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4 (a) แนวโน้มดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานและอุณหภูมิที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งส่งผลต่อเสถียรภาพของชั้นผิวที่เกิดขึ้นระหว่างการเสียดสีลดลง

นอกจากนี้ การเพิ่มความเร็วในการเลื่อนเป็น 300 และ 400 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4 (b) – (c) ทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเห็นอย่างชัดเจน นำไปสู่การสะสมและการแพร่กระจายของความร้อนในบริเวณผิวสัมผัสและโซนใกล้เคียง [18] ซึ่งสภาวะดังกล่าวเอื้อต่อการลดความแข็งแรงและกระตุ้นการไหลตัวเชิงพลาสติกของวัสดุ ในขณะเดียวกัน ยังพบการก่อตัวของชั้นฟิล์มบางถ่ายโอน (Transfer film) ระหว่างวงแหวนเหล็กกล้ากับพื้นผิวตัวอย่าง UHMWPE U511 ซึ่งทำหน้าที่ลดการสัมผัสโดยตรงและเพิ่มประสิทธิภาพการหล่อลื่นของระบบ ทั้งนี้ กลไกดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานผลของ Xincong Zhou และคณะ [11]

ลักษณะพื้นผิว

จากภาพที่ 5 แสดงพื้นผิวที่สึกหรอของตัวอย่าง UHMWPE U511 หลังจากทดสอบการสึกหรอด้วยวิธีล้อวงแหวนในสภาวะแบบแห้ง ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน พบว่ารอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวบริเวณที่มีการเสียดสีของคู่สัมผัส สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ รอยสึกหรอแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangle) และสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoid) ซึ่งรอยสึกหรอทั้งสองนี้จะอยู่บริเวณตรงกลางที่มีรอยเสียดสีลึกลงไปและมีความสว่างแววววาวมากกว่าพื้นผิวโดยรอบที่ไม่สึกหรอ แสดงให้เห็นถึงการขจัดเนื้อออกและขัดเงาพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญในขณะเลื่อนภายใต้แรงกด

อย่างไรก็ตาม ที่แรงกด 300 นิวตัน พบว่าพื้นผิวตัวอย่างแสดงรอยสึกหรอที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยบริเวณผิวสัมผัสปรากฏรอยสึกหรอค่อนข้างจางๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 (a) เมื่อภาระแรงกดเพิ่มขึ้นเป็น 450 และ 600 นิวตัน ตามลำดับ พบว่าความรุนแรงของรอยสึกหรอเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยรอยสึกจะมีความลึกและขยายกว้างครอบคลุมพื้นที่สัมผัสมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5 (b) และ (c)



(a) (b) (c)

ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง UHMWPE U511 หลังทดสอบการสึกหรอ ภายใต้ความเร็วในการเลื่อนและแรงกดที่ใช้แตกต่างกัน (a) แรงกดที่ใช้ 300 นิวตัน (b) 450 นิวตัน และ (c) 600 นิวตัน

นอกจากนี้ ยังพบเศษพอลิเมอร์ที่ถูกดันออกไปจากแรงกดที่ใช้ควบคู่กับความเร็วในการเลื่อนตามทิศทางการหมุนของล้อวงแหวน โดยเศษดังกล่าวจะถูกดันและยืดตัวออกไปทำให้เกิดเป็นรอยเส้นตรงบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการสึกหรอแบบขัดถูร่วม (Abrasive wear) กับการสึกหรอแบบยึดติดเป็นเศษครีบคล้ายกับริบบิ้น (Ribbon-link debris) และการรวมตัวกันเป็นก้อนพอลิเมอร์ (agglomerated polymer debris) ตลอดแนวการเสียดสี ดังแสดงในภาพที่ 5 (b) และ (c) อย่างไรก็ตาม ความไม่สม่ำเสมอของรอยสึกหรอในบริเวณตรงกลาง อาจเกี่ยวกับสภาพพื้นผิวของตัวอย่างเริ่มต้นและพฤติกรรมการสัมผัส เช่น การกระจายแรงไม่สม่ำเสมอ รวมถึงการเลื่อนผ่านซ้ำ ๆ ของคู่สัมผัส (Repeated sliding) ซึ่งปัจจัยนี้เหล่านี้ส่งผลให้เกิดการสะสมอุณหภูมิความร้อนในบริเวณสัมผัส ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจะส่งเสริมให้วัสดุอ่อนตัวลงและทำให้เกิดการเสียรูปพลาสติกได้ง่ายขึ้น

สรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของความเร็วเสียดทานและแรงกดต่อวัสดุตัวอย่าง UHMWPE U511 ภายใต้การทดสอบการสึกหรอแบบบล็อกออนริ่งในสภาวะแบบแห้ง โดยการวิเคราะห์อุณหภูมิของตัวอย่าง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) อุณหภูมิของตัวอย่าง UHMWPE U511 ภายใต้การทดสอบแบบแห้งเพิ่มขึ้นตามความเร็วเสียดทานและแรงกด โดยมีค่าอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 25 ถึง 55 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลให้วัสดุอ่อนตัวและเกิดการสึกหรอได้ง่ายขึ้น โดยมีอัตราการสึกหรอสูงสุดเท่ากับ 9.156×10^{-10} mm^3/Nm

2) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในช่วง 0.010 ถึง 0.058 และแปรผันตามแรงกดที่เพิ่มขึ้น

3) ความหยาบผิวและสภาพพื้นผิวของตัวอย่างหลังจากที่ผ่านการเสียดสีกับผิววงแหวนเหล็กกล้ามีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและอัตราการสึกหรอ รวมถึงกลไกการสึกหรอของวัสดุ UHMWPE U511

4) พื้นผิวรอยสึกหรอมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีความลึกตามแนวส่วนโค้งของวงแหวนและความกว้างตามแนวผิวคู่สัมผัส นอกจากนี้ ยังพบการเกิดเศษพอลิเมอร์และการสึกหรอแบบผสม ทั้งแบบขัดถูและยึดติด เนื่องจากภาระแรงกด การเลื่อนซ้ำ ๆ และความร้อนสะสมที่ทำให้วัสดุอ่อนตัวและเสียรูปได้ง่าย

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเร็วในการเลื่อนและแรงกดส่งผลให้เกิดการเสียดสีบริเวณพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมอุณหภูมิความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความร้อนดังกล่าวส่งผลให้พื้นผิวของวัสดุ UHMWPE U511 อ่อนตัวลงและทำให้เสียรูปได้ง่ายขึ้น งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาการใช้สารหล่อลื่นและการปรับปรุงสภาพพื้นผิวสำเร็จด้วยกระบวนการตัดเฉือนอื่น ๆ รวมถึงพฤติกรรมการสึกหรอของคู่สัมผัสต่างชนิด เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม SUS 304 กับ UHMWPE เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริงของชิ้นส่วนเครื่องจักรในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา โดยมีความร่วมมือกับสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

เอกสารอ้างอิง

1. V. Kapps, M. M. Maru, O. Kuznetsov, C. A. Achete. Identifying differences in the tribological performance of GUR 1020 and GUR 1050 UHMWPE resins associated to pressure × velocity conditions in linear reciprocating sliding tests. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2023; 145: 106038. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106038
2. B. P. Chang, H. M. Akil, R. Md. Nasir. Mechanical and Tribological Properties of Zeolite-reinforced UHMWPE Composite for Implant Application. Procedia Engineering. 2013; 68: 88-94, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.152
3. S. M. Kurtz. A Primer on UHMWPE. In: UHMWPE Biomaterials Handbook (Third Edition). Elsevier; 2016. p. 1-6. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780323354011000016
4. S. Li, C. Dong, C. Yuan, X. Bai. Friction-reducing and vibration-absorbing performances on a novel thermoplastic bearing material reinforced by nano-WS2 and UHMWPE. Tribology International. 2022; 176: 107893. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107893
5. P. Gangwani, J. Kovač, N. Emami, M. Kalin. Effect of multi-scale fillers on the tribological behavior of UHMWPE composites in water-lubricated contacts. Tribology International. 2024; 196: 109669. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109669
6. D. Havalder, J. Walter, A. Starý, L. Cvrček, R. Gabor, K. Mašek, E. Filová, L. Staňková, Z. Jeníková, K. Pawar. Mechanical and tribological behaviour of $BaTiO_3$ nanoparticles reinforced UHMWPE nanocomposite for prospective load-bearing applications. Materials & Design. 2025; 256: 114349. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114349
7. J. Tong, Y. Ma, M. Jiang. Effects of the wollastonite fiber modification on the sliding wear behavior of the UHMWPE composites. Wear. 2003; 255(1-6): 734-741. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00221-7
8. B. Li, X. Zhou, J. Huang, Q. Huang, X. Guo, X. Liu. Investigation of multi-scale fillers on tribological properties of UHMWPE composites for water-lubricated bearings. Tribology International. 2025; 212: 110961. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110961
9. T. Kanchanasangtong, R. Saodaen, M. Kaseewong, W. Chudget. Study of the Surface Roughness affecting on the Tribological Properties of Polyoxymethylene by Turning Process. J. Manuf. Manage. Technol., 2024; 3(1): https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jMMT/article/view/255678
10. T. Cai, S. Zhan, T. Yang, Y. Li, D. Jia, J. Tu, J. Li, H. Duan. Study on the tribological properties of UHMWPE modified by UV-induced grafting under seawater lubrication. Tribology International. 2022; 168: 107419. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107419
11. X. Zhou, L. Wang, S. Xing, Z. Zhou. Influence of oil-water mixing conditions on the friction and wear performance of ship tail-bearing materials. Surface Science and Technology. 2024; 2(33): 1-12. https://doi.org/10.1007/s44251-024-00063-4

12. Y. Zhou, H. Duan, S. Zhan, L. Liu, T. Yang, S. Chen, D. Jia. The effect of magnetic field intensity on the tribological properties of PA6 and UHMWPE in pure water and seawater environments. Tribology International. 2025; 206: 110482. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110482
13. S. K. Nayak, J. K. Hirwani, S. K. Sinha, R. K. Pandey. Mechanical and bio-tribological behaviours of UHMWPE based composites for prosthetic hip joint implant application. Tribology International. 2024; 199: 109945. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109945
14. B. Basuki, A. A. Ismail. Effects of CNC Milling Parameters on the Surface Roughness of UHMWPE Biomaterial. International Journal of Research in Engineering and Technology. 2018; 7(10): 68-73. https://doi.org/10.15623/ijret.2018.0710011
15. J. Song, P. Liu, M. Cremens, P. Bonutti. Effects of machining on tribological behavior of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) under dry reciprocating sliding. Wear. 1999; 225-229(2): 716-723. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00066-6
16. M. Padhan, U. Marathe,-J. Bijwe. A comparative assessment of nano and microparticles of carbides for performance augmentation of UHMWPE in abrasive and erosive wear modes. Wear. 2023; 514-515: 204568. https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204568
17. J. Lan, C. Mo, X. Chen, T. Hu, X. Li, C. Zhang. Carbon fiber/nano SiO_2 reinforced polyelectrolyte-graft UHMWPE for water lubricated superlubricity. Tribology International. 2025; 202: 110303. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110303
18. งามพรรณ ชะโล, ประกอบ ชาติภุกต์. สมบัติทางกลของพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวดเชิงประกอบด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์สำหรับการใช้งานทางวิศวกรรม. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2022; 16(1): 192-202. https://doi.org/10.14456/jrmutp.2022.16
19. Z. Tong, Q. Ma, Y. Ni, T. Mei, J. Li, G. Dong. Tribological properties of carbon fabric reinforced phenolic-based composites containing CNTs@MoS_2 hybrids. J Mater Sci. 2019; 54(23): 14354-14366. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03723-1
20. S. Jiang, J. S. S. Wong, D. Puhan, T. Yuan, X. Bai, C. Yuan. Tribological evaluation of thermoplastic polyurethane-based bearing materials under water lubrication: Effect of load, sliding speed, and temperature. Friction. 2024; 12(8): 1801-1815. https://doi.org/10.1007/s40544-023-0856-1
21. P. L. Menezes, S. V. Kailas. Role of surface texture and roughness parameters on friction and transfer film formation when UHMWPE sliding against steel. Biosurface and Biotribology. 2016; 2(1): 1-10. https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2016.02.001
22. Á. Kalácska, V. Parmentier, P. De Baets, G. Kalácska. Wear investigation of PTFE, PEEK and UHMWPE-based reciprocating shaft seal materials with lunar/Martian regolith simulants. Wear. 2025; 571: 205791. https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205791

23. M. Shen, B. Li, D. Ji, G. Xiong, L. Zhao, J. Zhang, Z. Zhang. Effect of Particle Size on Tribological Properties of Rubber/Steel Seal Pairs Under Contaminated Water Lubrication Conditions. Tribol Lett. 2020; 68: 40. https://doi.org/10.1007/s11249-020-1285-1

24. K. Leksycki, E. Feldshtein, R. W. Maruda, N. Khanna, G. M. Królczyk, C. I. Pruncu. An insight into the effect surface morphology, processing, and lubricating conditions on tribological properties of Ti6Al4V and UHMWPE pairs. Tribology International. 2022; 170: 107504. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107504