AMM054

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การสึกหรอของอิพอกซีเรซินเติมด้วยซิลิก้าบด Wear of epoxy resin filled with crushed silica particles

นิติกร นรภัยพิพากษา และ ชาวสวน กาญจโนมัย* ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120 โทร 02-5643001 โทรสาร 02-5643010 *อีเมล์ kchao@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

ผลกระทบของแรงสัมผัส (70-200 นิวตัน) และความเร็วการไถล (0.2-2 เมตรต่อวินาที) ที่มีต่อการสึกหรอของอิพอกซีเติมด้วยซิลิกาบด (ขนาด 20-30 ไมครอน และปริมาณ 390% ต่อน้ำหนัก) ได้ถูกศึกษา ด้วยชุดทดสอบ pin on disc ในสภาพไร้สารหล่อลื่น โดยการสึกหรอจะ เพิ่มขึ้นตามความเร็วการไถลในช่วงความเร็วการไถลต่ำ และจะลดลง ตามความเร็วการไถลในช่วงความเร็วการไถลสูง อุณหภูมิของชิ้น ทดสอบแบบหมุดคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วการไถลในช่วงความเร็วการ และเพิ่มขึ้นตามความเร็วการไถลในช่วงความเร็วการไถลสูง ไถลต่ำ กลไกการสึกหรอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลไก คือ (1) การสึกหรอ แบบขูด โดยมีการสึกหรอต่ำ เกิดภายใต้แรงสัมผัสและความเร็วการไถล ขนาดต่ำ (แรงสัมผัส 70 นิวตัน และ ความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อ ้วินาที) (2) การสึกหรอแบบขูดร่วมกับความเสียหายที่อุณหภูมิต่ำ โดยมี การสึกหรอสูง เกิดภายใต้สภาพที่ความเร็วการไถลไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิ ของชิ้นทดสอบแบบหมุด (ความเร็วการไถลต่ำกว่า 2, 1.4 และ 0.8 เมตรต่อวินาที่ ภายใต้แรงสัมผัส 70, 140 และ 200 นิวตัน ตามลำดับ) และ (3) การสึกหรอแบบขูดร่วมกับความเสียหายที่อุณหภูมิสูง โดยมี เกิดภายใต้สภาพที่ความเร็วการไถลส่งผลต่อ การสึกหรอปานกลาง อุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบหมุดสูงขึ้น (ความเร็วการไถลสูงกว่า 0.8, 1.4 และ 0.8 เมตรต่อวินาที่ ภายใต้แรงสัมผัส 70, 140 และ 200 นิวตัน ตามลำดับ)

Abstract

The effects of contact load as well as sliding speed on sliding wear behavior of epoxy resin filled with crushed silica particles (20-30 μ m and volume fraction of 390 wt.%) were evaluated using pin-on-disc tests. For each contact load, there was an increasing in the volume losses over a range of low sliding speeds, and then volume loss decreased up to a sliding speed of 2 m/s. The bulk temperature of pin was stable at low sliding speeds, and became increasing bulk temperature with sliding speed. Three wear mechanisms were observed. Abrasive wear occurred at low contact load and low sliding speed. The transition from abrasive wear to abrasive wear with low temperature fracture occurred gradually as contact load and/or sliding speed increased. At this wear mechanism, the highest wear rate could be observed. With further increasing in contact load and/or sliding speed, the wear mechanism became abrasive wear with high temperature fracture, and resulted in the reduction of wear rates.

1.บทน้ำ

วัสดุเซรามิกเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความแข็ง ทนทานต่อความร้อน ทนทานต่อสิ่งแวดล้อมที่เป็นกรดและด่างได้ดีกว่า โลหะและโพลีเมอร์ แต่การขึ้นรูปเซรามิกจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง และ ชิ้นงานที่ได้มีความเปลาะ จึงทำให้ยากในการผลิตชิ้นส่วนที่มีความ ซับซ้อนด้วยเซรามิก [1-3] เพื่อเป็นการชดเชยข้อด้อยของเซรามิก จึง ได้มีการผลิตวัสดุอิพอกซีเรซินเติมด้วยซิลิก้าบด (epoxy resin filled with crushed silica particles) ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกาบดเป็นวัสดุหลัก และใช้อีพอกซีเรซินเป็นตัวประสาน ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมี คุณสมบัติใกล้เคียงเซรามิก จึงสามารถใช้ทดแทนเซรามิกในการใช้งาน ที่อุณหภูมิต่ำได้ แต่ในสภาพการใช้งานที่มีการสัมผัสกันระหว่างวัสดุอิ พอกซีเรซินเติมด้วยซิลิก้าบดกับวัตถุแข็งชนิดอื่น อาจส่งผลให้เกิด ้ความเสียหายที่ผิว เช่น การสึกหรอ (wear) ได้ ซึ่งความเข้าใจใน พฤติกรรมและกลไกของการสึกหรอในวัสดุผสมระหว่างเซรามิกและโพ มีความจำเป็นในการพัฒนาวัสดุผสมให้สามารถใช้งานทาง ลิเมอร์ วิศวกรรมได้

Xing and Li [4] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการสึกหรอ ของอิพอกซีที่เติมอนุภาคซิลิกาแบบทรงกลมขนาดเล็ก (เส้นผ่าน ศูนย์กลางขนาด 120 และ 510 nm) พบว่าอนุภาคซิลิกาแบบทรงกลม ขนาดเล็กสามารถเพิ่มการต้านทานการสึกหรอได้ เมื่อเติมลงไปใน อัตราส่วน 0.5-4 % โดยน้ำหนัก Durand และคณะ [5] ได้ทำการศึกษา พฤติกรรมการสึกหรอแบบไร้สารหล่อลื่นของอิพอกซีเสริมด้วยอนุภาค เซรามิก (Al₂O₃, TiC, SiC) โดยเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาค (5-100 μm) และสัดส่วนโดยมวลของอนุภาค (5 - 40%) พบว่าการสึกหรอเกิดจาก รอยร้าวและการแยกตัวของอนุภาคจากวัสดุหลัก โดยอนุภาคขนาด ใหญ่ (~100 μm) สามารถป้องกันการสึกหรอได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็ก (~20 μm) และสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคมากกว่า 20% ไม่ส่งผลให้ ความต้านทานการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น Shi และคณะ [6] ได้ทำการศึกษา การสึกหรอแบบไร้สารหล่อลื่นของอิพอกซีเสริมด้วยอนุภาคซิลิกอนไน -ไตรด์ขนาดนาโนเมตร พบว่าอนุภาคซิลิกอนไนไตรด์ขนาดนาโนเมตร สามารถเพิ่มความต้านทานการสึกหรอและสมบัติทางกล เมื่อเติมลงไป ในวัสดในปริมาณที่ต่ำ (น้อยกว่า 1% โดยปริมาตร) โดยการยึดติด ระหว่างซิลิกอนในไตรด์กับอิพอกซี ช่วยลดการบิดตัวเนื่องมาจาก อุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและอัตราการสึกหรอ

ในขณะที่มีงานวิจัยจำนวนมาก ได้ศึกษาการสึกหรอของวัสดุผสม ระหว่างเซรามิกกับโพลิเมอร์ โดยโพลิเมอร์เป็นวัสดุหลัก (matrix) และ เซรามิกเป็นวัสดุเสริมความแข็งแรง (reinforcement) แต่ยังไม่มี งานวิจัยใดที่ศึกษา การสึกหรอของวัสดุผสมที่มีเซรามิกเป็นวัสดุหลัก และมีโพลิเมอร์เป็นตัวประสาน (binder) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษา ผลกระทบของความเร็วการไถล (sliding speed) และแรงสัมผัส (contact load) ที่มีต่อการสึกหรอของวัสดุอิพอกซีเติมด้วยซิลิกาบด (ขนาด 20-30 μm และสัดส่วนโดยปริมาตรเป็น 390% ต่อน้ำหนัก) ภายใต้สภาพไร้สารหล่อลื่น โดยวัสดุนี้สามารถใช้เป็นบุชของมอเตอร์ใน อาร์ดดิสต์ขนาดเล็ก

2. วัสดุและขั้นตอนการวิจัย

2.1 วัสดุ

อิพอกซีเรซินเติมด้วยซิลิกาบด เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากการนำอิ พอกซีเรซิน (biphenol resin ผสมกับ acid anhydridel hardener ใน อัตราส่วน 100:80 โดยน้ำหนัก) ผสมกับซิลิกาบดขนาด 20-30 μm โดยส่วนผสมของซิลิกาบดเป็น 390% โดยน้ำหนักของอิพอกซีเรซิน วัสดุผสมที่ได้ถูกเทลงในแบบ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ผสมถูกดูดออกโดยใช้ปั้มสุญญากาศ วัสดุผสมถูกทิ้งให้แข็งตัวที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงทางกล โครงสร้างของอิพอก ซีเรซินเติมด้วยซิลิกาถูกแสดงในรูปที่ 1 ในขณะที่องค์ประกอบและ คุณสมบัติเชิงกลแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



30 µm

รูปที่ 1 อิพอกซีเรซินเติมด้วยซิลิก้าบดโดย ซิลิกาบดแสดงด้วยบริเวณสี ขาว และอิพอกซีแสดงด้วยบริเวณสีดำ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของอิพอกซีเรซินเสริมเติมด้วยซิลิก้าบด [1]

Composition of material used			
Epoxy resin:	Biphenol	100	
Hardener:	Acid Anhydridel	80	
Silica filler:	Amorphous	390	
Dha (a sa buadas di sé assia, bu unisht)			

Phr (per hundred of resin by weight)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของอิพอกซีเรซินเสริมเติมด้วยซิลิก้าบด [1]

1	
Tensile strength (MPa)	79.0
Modulus of elasticity (GPa)	12.5
Hardness (HRB)	114.5
Fracture toughness, KIC (MPa.m ^{1/2})	2.5
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ K)	21.0
Glass transition temperature (°C)	108
Density (g/cm ³)	1.73



รูปที่ 2 ชิ้นทดสอบแบบหมุด (pin specimen) และชิ้นทดสอบแบบจาน (disk specimen) (ขนาดเป็นมิลลิเมตร)

Disc specimen

2.2 การทดสอบการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอในสภาวะไร้สารหล่อลื่น sliding (dry condition) ทำโดยใช้ชุดทดสอบแบบ pin-on-disc (Phoenix Tribology: TE88) วิธีการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G99 – Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk [7] ดำเนินการ ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 ± 2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 5 % (relative humidity, RH) โดยชิ้นทดสอบแบบจาน (disc specimen) ทำจาก เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ขึ้นรูปด้วยวิธีทางกล (wrought stainless steel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร และชิ้น ทดสอบแบบหมุด (pin specimen) ทำจากอิพอกซีเรซินเติมด้วยซิลิ ก้าบด ขนาด 8 มิลลิเมตร × 8 มิลลิเมตร × 20 มิลลิเมตร โดยลักษณะ ของชิ้นทดสอบทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2 ก่อนการใช้งานชิ้นทดสอบทั้ง สองถูกนำไปผ่านขั้นตอนการเตรียมผิวและวัดความหยาบผิว (Mitutoyo Roughness Tester รุ่น SJ-301) โดยกำหนดให้ชิ้นทดสอบมีความ หยาบผิวเริ่มต้น 0.2 µm Ra โดยทำการทดสอบภายใต้ภาระสัมผัส (contact load) 70 - 200 นิวตัน ความเร็วการไถล (sliding speed) 0.2 - 2.0 เมตรต่อวินาที และระยะไถล (sliding distance) 2,000 เมตร ใน แต่ละการทดสอบทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แรงเสียดทานและอุณหภูมิถูก บันทึกค่าอย่างต่อเนื่องตลอดการทดสอบด้วยโหลดเซล (load cell) และ เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K (thermocouple type K) การเปลี่ยนแปลงความ สูงของชิ้นทดสอบแบบหมุด ในระหว่างการทดสอบถูกวัดด้วย ทรานสดิวเซอร์ (transducer) ในขณะที่มวลของชิ้นทดสอบแบบหมุด ก่อนและหลังการทดสอบถูกชั่งด้วย เครื่องชั่งแบบดิจิตอล (Mettler Toledo รุ่น AB204) โดยมีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม การสึกหรอวัด ได้จากการเปลี่ยนแปลงมวลหลังสิ้นสุดการทดสอบและนำมาคำนวณหา อัตราการสูญเสียมวล (volume loss, V) ดังนี้

$$v = \frac{\Delta m}{\rho} \tag{1}$$

โดยที่ ⊿m คือ มวลที่สูญเสียไปในการทดลองของชิ้นทดสอบแบบเข็ม p คือ ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบแบบเข็ม

พื้นผิวการสึกหรอ (worn surface) และเศษการสึกหรอ (debris) หลังสิ้นสุดการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายพฤติกรรมการสึก หรอโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงและ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.ผลและการวิเคราะห์

3.1 พฤติกรรมการสึกหรอ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียมวล (volume loss) กับระยะการไถล (sliding speed) พบว่า การสูญเสียมวลเกิดขึ้นอย่าง รวดเร็วในช่วงแรกและเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady stage) เมื่อระยะการ ไถลสูงกว่า 500 เมตร โดยความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียมวล ภายหลังการทดสอบการสึกหรอกับความเร็วการไถลแสดงดังรูปที่ 3a และ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอและความเร็วการไถลแสดง ดังรูปที่ 3b การสูญเสียมวลเพิ่มขึ้นตามแรงสัมผัสที่มีค่ามากขึ้น และ การสูญเสียมวลจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วงความเร็วการไถลด่ำ และลดลง ในช่วงความเร็วการไถลสูง





อุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบเข็มจะเพิ่มขึ้นตามระยะการไถล และ เข้าสู่สภาวะสมดุลดังแสดงในรูปที่ 4a ในกรณีแรงสัมผัส 70 นิวตัน ความเร็วการไถลที่เพิ่มสูงขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของชิ้น ทดสอบแบบเข็มในช่วง 0.2-1.5 เมตรต่อวินาที โดยอุณหภูมิสูงขึ้น เล็กน้อยเมื่อความเร็วการไถลเป็น 2 เมตรต่อวินาที ในขณะที่แรง สัมผัส 140 นิวตัน และ 200 นิวตัน ส่งผลให้อุณหภูมิของชิ้นทดสอบ แบบหมุดจะคงที่ที่ความเร็วการไถลต่ำ และเพิ่มสูงขึ้นหลังจากความเร็ว การไถล 1.4 เมตรต่อวินาที กรณีแรงสัมผัส 140 นิวตัน และความเร็ว การไถล 0.7 เมตรต่อวินาที กรณีแรงสัมผัส 200 นิวตัน

ขณะทำการทดสอบการสึกหรอ แรงเสียดทานมีค่าสูงในช่วง เริ่มต้น และลดลงเมื่อระยะการไถลเพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นแรงเสียด ทานจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานที่สภาวะ คงตัวกับความเร็วการไถลแสดงดังรูป 4b โดยแรงเสียดทานจะเพิ่ม ตามแรงสัมผัส ที่แรงสัมผัส 200 นิวตัน แรงเสียดทานจะลดลงตาม ความเร็วการไถลที่สูงขึ้น ในขณะที่แรงสัมผัส 70 นิวตัน และ 140 นิว ดัน แรงเสียดทานจะลดลงตามความเร็วการไถลที่สูงขึ้น และเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเร็วการไถลสูงกว่า 1.4 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (a) อุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบ เข็มและความเร็วการไถล (b) แรงเสียดทานและความเร็วการไถล



รูปที่ 5 พื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบแบบหมุด ทดสอบด้วยแรงสัมผัส 70 นิวตัน (a) ความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายต่ำ (b) ความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายสูง (c) ความเร็วการไถล 0.8 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายต่ำ (d) ความเร็วการไถล 0.8 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายสูง (e) ความเร็วการไถล 2 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายต่ำ (f) ความเร็วการไถล 2 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายสูง (ทิศทางการไถลจากด้านซ้ายไปด้านขวา)



รูปที่ 6 พื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบแบบหมุด ทดสอบด้วยแรงสัมผัส 200 นิวตัน (a) ความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายต่ำ (b) ความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที-(c) ความเร็วการไถล 0.8 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายต่ำ (d) ความเร็วการไถล 0.8 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายสูง (e) ความเร็วการไถล 2 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายต่ำ (f) ความเร็วการไถล 2 เมตรต่อวินาที-กำลังขยายสูง (ทิศทางการไถลจากด้านซ้ายไปด้านขวา)

3.2 กลไกการสึกหรอ

การศึกษาพื้นผิวการสึกหรอที่ทดสอบภายใต้แรงสัมผัส 70 และ 200 นิวตัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) แสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พื้นผิวการสึกหรอภายใต้แรงสัมผัส 70 นิวตัน และความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที รูปที่ 5a-b แสดงการสึกหรอแบบขูด (abrasive wear) ส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียมวลน้อยและอุณหภูมิของชิ้นทดสอบ แบบหมุดต่ำ ซึ่งอุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบหมุดมีค่าคงที่ตาม ความเร็วการไถลในช่วง 0.2-1.5 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 4a) ดังนั้นกลไก การสึกหรอภายใต้แรงสัมผัส 70 นิวตัน และความเร็วการไถลในช่วง 0.2-1.5 เมตรต่อวินาทีขึ้นกับความเร็วการไถลเท่านั้น จากงานวิจัยก่อน หน้านี้ [8] พบว่าความทนทานการแตกหัก (fracture toughness) ของอิ พอกซีขึ้นอยู่กับเวลา โดยความทนทานการแตกหักลดเมื่อเพิ่มอัตรา ภาระ ภายใต้ความเร็วการไถลที่แตกต่างกัน เวลาสำหรับกลไกการเกิด ดังนั้นกลไกการสึกหรอภายใต้แรง การสึกหรอก็จะแตกต่างกันด้วย สัมผัส 70 นิวตัน จึงเปลี่ยนจากกลไกการสึกหรอแบบขูดไปเป็นกลไก การสึกหรอแบบผสมระหว่างการสึกหรอแบบขูดกับความเสียหายที่ขึ้น -กับเวลา (time-dependent fracture) ซึ่งสอดคล้องกับการสูญเสียมวล เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วการไถลเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เมตรต่อวินาที เป็น 0.8 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 3) พื้นผิวความเสียหายภายใต้แรงสัมผัส 70 นิวตันและความเร็วการไถล 0.8 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 5c-d) แสดงความ เสียหายแบบผสมระหว่างการสึกหรอแบบขูดและการแตกหัก เนื่องจาก พื้นผิวสัมผัสและความแข็งแรงของชิ้นทดสอบแบบหมุดลดลง

ผลการตรวจวัดอุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบหมุดพบว่าภายใต้แรง สัมผัส 70 นิวตัน และความเร็วการไถล 2 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิจะมี ค่าสูงกว่าอุณหภูมิในช่วงความเร็วการไถล 0.2-1.5 เมตรต่อวินาที ซึ่ง อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อิพอกซีเรซินที่ผิวสัมผัสของชิ้นทดสอบแบบ หมุดอ่อนตัวลง สามารถดูดซึมพลังงานทางกลได้มากขึ้น และส่งผลให้ ความต้านทานการแตกหักสูงขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้การสึกหรอลดลงด้วย (รูปที่ 3) และการแตกหักที่ผิวลดลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผิวการ แตกหักภายใต้ความเร็วการไถล 0.8 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 5c และ 5e)

ภายใต้แรงสัมผัส 200 นิวตัน อุณหภูมิของชิ้นงานทดสอบแบบ หมุดคงที่ในช่วงความเร็วการไถลด่ำ จากนั้นจะสูงขึ้นเมื่อความเร็วการ ไถลเพิ่มขึ้นเป็น 0.8 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 4a) ในช่วงความเร็วการไถล ด่ำ (อุณหภูมิคงที่) พื้นผิวการสึกหรอแสดงการรวมกันของความ เสียหายที่ขึ้นกับเวลาและการสึกหรอแบบขูด (รูปที่ 6a-d) โดยการ สูญเสียมวลเพิ่มขึ้นตามความเร็วการไถล (รูปที่ 3) เมื่ออุณหภูมิของชิ้น ทดสอบแบบหมุดสูงขึ้น (ความเร็วการไถลสูงกว่า 0.8 เมตรต่อวินาที) กลไกการเกิดความเสียหายที่ขึ้นกับอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการยึดตัวของ วัสดุ และความทนทานการแตกหักของวัสดุสูงขึ้น [9, 10] ดังนั้นการสึก หรอจึงลดลง เมื่อความเร็วการไถลสูงกว่า 0.8 เมตรต่อวินาที (รูปที่ 3) และพื้นผิวการสึกหรอแสดงกลไกแบบผสมระหว่างการสึกหรอแบบขูด และการแตกหักที่อุณหภูมิสูง (รูปที่ 6e และ 6f)

การรวมของความเสียหายที่ขึ้นกับเวลาและการสึกหรอแบบขูดจะ เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิของชิ้นทดสอบต่ำเรียกว่า การสึกหรอแบบขูด ร่วมกับความเสียหายที่อุณหภูมิต่ำ (abrasive wear and low - temperature fracture) ในทางตรงกันข้าม การรวมกันของความ เสียหายที่ขึ้นกับอุณหภูมิและการสึกหรอแบบขูดจะเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิ ของชิ้นทดสอบสูงเรียกว่า การสึกหรอแบบขูดร่วมกับความเสียหายที่ อุณหภูมิสูง (abrasive wear and high temperature fracture) ในการ ทดสอบการสึกหรอภายใต้แรงสัมผัส 140 นิวตัน นั้นจะเกิดพฤติกรรม การสึกหรอคล้ายกับการสึกหรอภายใต้แรงสัมผัส 200 นิวตัน โดยจุด เปลี่ยนจากการสึกหรอแบบขูดร่วมกับความเสียหายที่อุณหภูมิสูงจะอยู่ ที่ความเร็วการไถล 1.4 เมตรต่อวินาที

เศษการสึกหรอ (wear debris) จากการทดสอบภายใต้แรงสัมผัส 70 นิวดัน และความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที มีขนาดเล็ก ในขณะ ที่เศษการสึกหรอจากการทดสอบอื่นๆ มีลักษณะเป็นองค์ประกอบ ระหว่างอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคขนาดใหญ่ และเศษขดเกรียว โดย ขนาดของเศษการสึกหรอดังกล่าวสอดคล้องกับขนาดของร่อง (groove) และการแตกหักบนผิวการสึกหรอ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของ เศษการสึกหรอด้วยวิธี energy dispersive X-ray spectrometer (EDS) พบว่าอนุภาคขนาดเล็กมีองค์ประกอบของ อิพอกซีเรซิน ซิลิกา และ เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่มีองค์ประกอบเป็น -ซิลิกา และเศษขดเกรียวมีองค์ประกอบเป็น เหล็กกล้าไร้สนิม 304

4.สรุป

จากการศึกษาผลกระทบของแรงสัมผัส (70-200 นิวตัน) และ ้ความเร็วการไถล (0.2-2 เมตรต่อวินาที) ที่มีต่อการสึกหรอของอิพอกซี เติมด้วยซิลิกาบด (ขนาด 20-30 ไมครอน และปริมาณ 390% ต่อ ้น้ำหนัก) ด้วยชุดทดสอบ pin on disc ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ 1) การสึกหรอจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วการไถลในช่วงความเร็วการไถล ้ต่ำ และจะลดลงตามความเร็วการไถลในช่วงความเร็วการไถลสูง โดยมี จุดเปลี่ยนอยู่ที่ความเร็วการไถล 0.8, 1.4 และ 0.8 เมตรต่อวินาที ภายใต้แรงสัมผัส 70, 140 และ 200 นิวตัน ตามลำดับ อุณหภูมิของชิ้น ทดสอบแบบหมุดภายใต้แรงสัมผัส 70 นิวตัน คงที่ไม่ขึ้นกับความเร็ว การไถล ในช่วงความเร็วการไถล 0.2 ถึง 1.5 เมตรต่อวินาที ในขณะที่ อุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบหมุดภายใต้แรงสัมผัส 140 และ 200 นิว ้ตัน จะคงที่ไม่ขึ้นกับความเร็วการไถล ในช่วงความเร็วการไถลต่ำ และ เพิ่มขึ้นตามความเร็วการไถลในช่วงความเร็วการไถลสูง โดยการ เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการสึกหรอ และอุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบ หมุด เกิดที่จุดเปลี่ยนเดียวกัน คือ 1.4 และ 0.8 เมตรต่อวินาที ภายใต้ แรงสัมผัส 140 และ 200 นิวตัน ตามลำดับ

2) กลไกการสึกหรอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลไก คือ (1) การสึก หรอแบบขูด มีการสึกหรอต่ำ เกิดภายใต้แรงสัมผัส 70 นิวตัน และ ความเร็วการไถล 0.2 เมตรต่อวินาที, (2) การสึกหรอแบบขูดร่วมกับ ความเสียหายที่อุณหภูมิต่ำ มีการสึกหรอสูง เกิดภายใต้สภาพที่ความ -เร็วการไถลไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบหมุด (ความเร็วการ ไถลต่ำกว่า 2, 1.4 และ 0.8 เมตรต่อวินาที ภายใต้แรงสัมผัส 70 140 และ 200 นิวตัน ตามลำดับ) และ (3) การสึกหรอแบบขูดร่วมกับความ เสียหายที่อุณหภูมิสูง มีการสึกหรอปานกลาง เกิดภายใต้สภาพที่ ความเร็วการไถลส่งผลต่ออุณหภูมิของชิ้นทดสอบแบบหมุด (ความเร็ว การไถลสูงกว่า 0.8,1.4 และ 0.8 เมตรต่อวินาที ภายใต้แรงสัมผัส 70 140 และ 200 นิวตัน ตามลำดับ)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคำแนะนำและการสนับสนุนจาก คุณชวิศา คุณความสุข สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติ (MTEC)

เอกสารอ้างอิง

- Nagata, K., et al., Fretting wear and fatigue properties of epoxy resin filled with crushed silica particles. Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part A, 2006. 72(4): p. 560-567.
- ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, การสึกหรอความรู้เบื้องดันและ การป้องกัน, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, 2545.
- ปนัดดา นิรนาทล้ำพงค์ และคณะ, การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, 2547.
- Xing, X.S. and R.K.Y. Li, Wear behavior of epoxy matrix composites filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles. Wear, 2004. 256(1-2): p. 21-26.
- Durand, J.M., M. Vardavoulias, and M. Jeandin, Role of reinforcing ceramic particles in the wear behaviour of polymer-based model composites. Wear, 1995. 181-183: p. 833-839.
- Shi, G., et al., Friction and wear of low nanometer Si3N4 filled epoxy composites. Wear, 2003. 254(7-8): p. 784-796.
- ASTM G99-90: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, in ASTM standards. 1998, The American Society for Testings and Materials. p. 399-403.
- Kanchanomai, C., S. Rattananon, and M. Soni, Effects of loading rate on fracture behavior and mechanism of thermoset epoxy resin. Polymer Testing, 2005. 24(7): p. 886–892.
- Raghavan, J. and M. Meshii, Creep of polymer composites. Composites Science and Technology, 1998. 57(12): p. 1673-1688.
- Kwon, S.-C., T. Adachi, and W. Araki, Temperature dependence of fracture toughness of silica/epoxy composites: Related to microstructure of nano- and microparticles packing. Composites Part B: Engineering, 2008. 39(5): p. 773-781.
- 11. Matthews, F.L. and R.D. Rawlings, Composite materials: engineering and science. 1994, London: Chapman & Hall.

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 2 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22