

อิทธิพลของความเร็วเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 และเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL

The Influence of Sliding Velocity and Contact Pressure on Tribological Behavior of The Mating Surfaces of SKD11 Tool Steel and Ferritic Stainless Steel 430 HL

เจษฎา จันทร์ผา¹ ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ^{2*}

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

²ศูนย์เทคโนโลยีแม่พิมพ์ (TDTC) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

217 ถนนนทบุรี 1 ตำบลสวนใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000

Jedsada Junpha¹ Bhadpiroon Watcharasresomroeng^{2*}

¹Department of Science, Faculty of Science and Technology

²Tool and Die Technology Center (TDTC), Faculty of Engineering and Architecture

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

217 Nonthaburi 1 Road, Suanyai, Muang, Nonthaburi, 11000

*Corresponding author Email: bhadpiroon.s@rmutsb.ac.th

(Received: September 16, 2020; Accepted: December 15, 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวสัมผัสวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ขูดขัดกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ภายใต้สภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่น การศึกษาใช้การจำลองการทดสอบ Pin-on-Disk ตามมาตรฐาน ASTM G99-95a ความเร็วในการเลื่อนไถลของวัสดุคู่สัมผัสมี 3 ระดับ คือ 50 100 และ 150 mm/s ภายใต้แรงกระทำตั้งฉากกับการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 5 และ 8 N ผลการศึกษาพบว่าลักษณะความเสียหายของผิวเหล็กกล้าเครื่องมือที่เคลื่อนสัมผัสบนวัสดุชิ้นงานมี 2 รูปแบบ คือ การสึกหรอแบบขูดถูและการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสมีค่าอยู่ในช่วง 0.707 ถึง 0.904 ความเร็วในการเลื่อนไถลและความดันสัมผัสไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุเครื่องมือไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงขึ้น ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือกับระยะทางการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันและแปรผันตามความดันที่เกิดขึ้นระหว่างผิวคู่สัมผัส ในขณะที่จะแปรผกผันกับความเร็วในการเลื่อนไถลบนวัสดุชิ้นงาน

คำสำคัญ: ความเร็วเลื่อนไถล ความดันสัมผัส ไทรบอโลยี เหล็กกล้าเครื่องมือ เหล็กกล้าไร้สนิม

ABSTRACT

The objective of this article is to study the influence of sliding velocity and contact pressure on the tribological behavior of the mating surfaces of hardened SKD11 tool steel against ferritic stainless steel 430 HL workpiece material under dry conditions. The study was conducted by simulation testing with Pin-on-Disk according to ASTM G99-95a. There are three levels of sliding velocity of the contact surface material: 50 100 and 150 mm/s under normal loads of 2 5 and 8 N. The study found that relative damage of tool steel surface on the workpiece material comes in two forms: abrasive wear and adhesion of workpiece material. The coefficient of friction between the contact surfaces ranged from 0.707 to 0.904. Sliding velocity and contact pressure do not linearly correlate with the coefficient of friction between the contact surfaces of the tool material and the workpiece material. The adhesion of the workpiece material to the tool surface does not affect to increase the coefficient of friction. The quantitative of tool material wear and the sliding distance correlated in the same direction, also wear is proportional to the pressure generated between the contact surfaces, which is inversely proportional to the sliding velocity on the workpiece material.

Keyword: Sliding Velocity, contact pressure, tribology, tool steel, stainless steel.

1. บทนำ

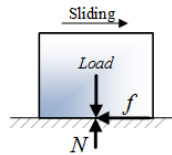
การขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ต้องการปริมาณการผลิตสูง โดยทั่วไปใช้ชุดแม่พิมพ์ (Die Set) เป็นเครื่องมือในการขึ้นรูปโลหะแผ่นให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic Deformation) เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ ชิ้นส่วนหลักของชุดแม่พิมพ์ที่สำคัญได้แก่ พันช์ (Punch) ดาย (Die) และแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank Holder) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่น ชิ้นส่วนหลักจะสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานและเคลื่อนที่สัมพัทธ์กัน (Relative Movement) เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสเนื่องจากแรงที่ให้กับวัสดุชิ้นงานเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปถาวร [1]

จากการสัมผัสกันระหว่างวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานในลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ส่งผลให้เกิดความเสียดทาน (Friction) ระหว่างผิวคู่สัมผัส และเมื่อใช้งานเครื่องมือดังกล่าวไปช่วงระยะเวลาหนึ่งก็จะเกิดการสึกหรอ (Wear) กับวัสดุเครื่องมือดังกล่าวรวมถึงวัสดุชิ้นงาน ก็จะได้รับเสียหายจากการสึกหรอของเครื่องมือ

ดังนั้นในการขึ้นรูปโลหะแผ่นจึงมีการปรับปรุงสมบัติระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานด้วยการหล่อลื่น (Lubrication) เช่น การใช้สารหล่อลื่นจำพวกน้ำมันทาบนวัสดุชิ้นงานที่ต้องการขึ้นรูป เป็นต้น ทำให้มีการศึกษาในศาสตร์ไทรบอโลยี (Tribology) ซึ่งเกี่ยวข้องกับเรื่องของความเสียดทาน การสึกหรอ และการหล่อลื่นในงานขึ้นรูปโลหะเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์หรือพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน เพื่อความต้องการในการออกแบบและควบคุมกระบวนการขึ้นรูปโลหะให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

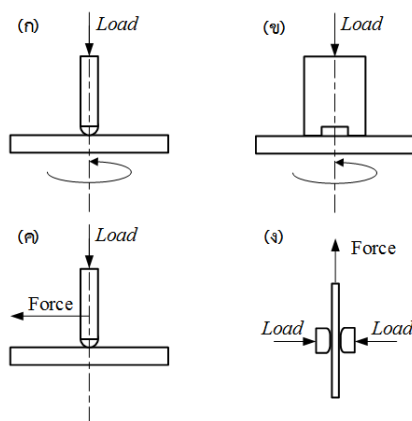
เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาเรื่องความเสียดทานที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันดังรูปที่ 1 จะสามารถอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทาน (Friction Force; f) กับความดันกระทำตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Normal Pressure; N) ที่รู้จักกันในชื่อ Coulomb Friction ดังสมการ (1) โดยที่ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction) [1]

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (1)$$



รูปที่ 1 กลไกการเกิดความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน

จากรูปที่ 1 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานได้เมื่อทราบค่าความดันที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัสและแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างผิวคู่สัมผัสหรือค่าแรงเสียดทาน ซึ่งในกระบวนการขึ้นรูปโลหะเพื่อผลิตชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ในภาคอุตสาหกรรมอาจทำการหาค่าแรงเสียดทานหรือศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานได้ยาก ดังนั้นจึงมีการใช้การจำลองการทดสอบ (Simulation Testing) เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของวัสดุคู่ผิวสัมผัสดังกล่าว



รูปที่ 2 การจำลองการทดสอบทางไทรบอโลยี

(ก) Pin-on-Disk (ข) Twist Compression Test (ค) Slider-on-flat Surface Test และ (ง) Strip Drawing Test [1]

ตัวอย่างการจำลองการทดสอบทางไทรบอโลยีแสดงดังรูปที่ 2 โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัส เช่น Pin-on-Disk Test [2-13] Twist Compression Test [14] Slider-on-Flat Surface Test [15,16] และ Strip Drawing Test [14] เป็นต้น แต่ด้วยการทดสอบแบบ Pin-on-Disk เป็นวิธีการทดสอบการสึกหรอของวัสดุผิวคู่สัมผัสที่เคลื่อนที่สัมผัสกันภายใต้มาตรฐาน ASTM G99-95a [17] ที่มีความสะดวกในการทดสอบ เนื่องจากปัจจุบันมีผู้ผลิตไทรบอมิเตอร์ (Tribometer) ที่มีหลักการทำงานเป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าวออกมาจำหน่าย และสามารถรายงานผลค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสได้ ในขณะที่วิธีการทดสอบแบบอื่นผู้ทดสอบต้องสร้างเครื่องมือขึ้นใช้ทดสอบและศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีเอง ทำให้การจำลองการทดสอบด้วยวิธี Pin-on-Disk Test นิยมใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสโดยเฉพาะในชิ้นรูปโลหะ เช่น Premanond [2] ได้ใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวด้วยไทรบอมิเตอร์ศึกษาพฤติกรรมด้านไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือเกรดต่าง ๆ กับวัสดุชิ้นงานหลักกล้ากล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดวัสดุและสารหล่อลื่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย การสึกหรอของวัสดุทำแม่พิมพ์แต่ละชนิดในกรณีที่ไมใช้สารหล่อลื่น อิทธิพลของการหล่อลื่นและค่าความแข็งของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่มีต่อการสึกหรอของวัสดุแม่พิมพ์ โดยการทดสอบได้ใช้ลูกบอลจับยึดด้วยตัวจับยึด (Holder) แทนการใช้หมุดหรือพิน (Pin) ซึ่งอาจเรียกวิธีการนี้ว่า “Ball-on-Disk” ในขณะที่ Sriprasird et al. [3] ใช้ Pin-on-Disk ไทรบอมิเตอร์ศึกษาการสึกหรอของผิวคู่สัมผัสระหว่างเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel) เกรด SKD11 (JIS) ที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแข็งบาง (Hard Thin Film) ชนิดต่าง ๆ กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก Lawanwong et al. [4] ใช้ Pin-on-Disk ไทรบอมิเตอร์ประเมินชนิดของฟิล์มแข็งบางที่เลื่อนไถล (Sliding) บน

วัสดุชิ้นงานโลหะแผ่นกลุ่มเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง (High Strength Steel) เกรด 440 590 และ 780 ขณะที่ Sresomroeng et al. [5] ใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือกับโลหะแผ่นเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงพิเศษ (Advanced High Strength Steel) เกรด 980 โดยเปรียบเทียบกรณีการทำงานที่ใช้และไม่ใช้สารหล่อลื่น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2-5] การใช้ไทรบอมิเตอร์จำลองการทดสอบทางไทรบอโลยีระหว่างวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน สามารถทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสและทำนายการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือภายใต้สภาวะทางไทรบอโลยีที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะต่าง ๆ ด้วยการจำลองการทดสอบ Pin-on-Disk เช่น ที่สภาวะอุณหภูมิการทำงานต่าง ๆ [6-8] พฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุต่างชนิดกัน [9-12] รวมถึงใช้การจำลองการทดสอบดังกล่าวประเมินประสิทธิภาพทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสที่มีการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อนำผลการจำลองการทดสอบที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการทำงานจริง เช่น งานด้านระบบราง (Railway Systems) [13] แต่งานศึกษาที่ผ่านมา [2-13] กำหนดค่าความดันสัมผัสระหว่างผิววัสดุทำแม่พิมพ์และวัสดุชิ้นงานรวมถึงความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคงที่ ซึ่งตัวแปรทั้งสองเป็นตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการขึ้นรูปโลหะ [1] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการใช้การจำลองการทดสอบแบบ Pin-on-Disk ศึกษาตัวแปรทั้งสองที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของวัสดุทำแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงาน เพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบแม่พิมพ์ให้แก่ภาคอุตสาหกรรมและเป็นแนวทางให้ผู้สนใจใช้วิธีการ Pin-on-Disk ในการศึกษาพฤติกรรมทางไทรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานหรือประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นที่เกี่ยวข้อง

2. วัสดุ เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุผิวคู่สัมผัส

เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (Cold Work Tool Steel) เกรด SKD11 ตามมาตรฐาน JIS หรือเทียบเท่า เกรด D2 ตามมาตรฐาน AISI ถูกเลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากการขึ้นรูปโลหะแผ่นโดยทั่วไปใช้กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Forming Process) วัสดุดังกล่าวจึงนิยมถูกนำมาใช้ทำชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ต้องสัมผัสกับวัสดุชิ้นงานขณะทำการขึ้นรูปเพราะมีสมบัติทนการสึกหรอได้ดี [18,19] ดังนั้นผู้ศึกษาจึงเลือกวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุผิวคู่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic Stainless Steel) เกรด 430 HL (Hair Line: การขัดผิวเชิงเส้น) หรือ SUS430 HL ตามมาตรฐาน JIS ซึ่งเป็นเหล็กกล้ารีดเย็น (Cold Rolled) ผสมธาตุโครเมียม (Chromium; Cr) ในปริมาณสูง (16.0-19.0 % โดยน้ำหนัก) ทำให้มีสมบัติทนการกัดกร่อนที่ดี โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกจะไม่มีการผสมธาตุ निकิล (Nickel; Ni) หรือผสมในปริมาณที่น้อยมากทำให้มีราคาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Expansion) ต่ำและนำความร้อนได้ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก จึงทำให้วัสดุดังกล่าวนิยมใช้ในสภาวะแวดล้อมที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนสูงและมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ชิ้นส่วนในงานสถาปัตยกรรม และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกยังคงมีสมบัติความเป็นแม่เหล็กเนื่องจากโครงสร้างของวัสดุเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) [20-22]

สมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 430 HL ได้จากการทดสอบด้วยแรงดึง (Tensile Testing) ตามมาตรฐาน ASTM E8 [23] องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Compositions) ของวัสดุเครื่องมือและวัสดุชิ้นงานใช้เทคนิควิธี Optical Emission Spectrometry (OES) ในการระบุธาตุประกอบที่มีอยู่ ผลการทดสอบสมบัติทางกลและตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ศึกษา

Symbol	$\sigma_{0.2\%}$	σ_U	Elongation		
[JIS]	[MPa]	[MPa]	[%]		
SUS430 HL	382	513	27.7		
	Chemical Compositions [wt%]				
	C	Si	Mn	P	S
	0.0116	0.4913	0.3380	0.0317	0.0064
	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
	18.5576	0.3235	0.1771	0.0028	0.5149
	Nb	Ti	V	B	
	0.4138	0.0028	0.0998	<0.0001	
SKD11	C	Si	Mn	P	S
	1.4346	0.2285	0.2869	0.0337	0.0028
	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
	11.6004	0.8489	0.4832	0.0067	0.1656
	Nb	Ti	V	B	Fe
	-	-	0.2421	-	Bal.

จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุชิ้นงานพบว่าปริมาณธาตุโครเมียมในช่วงค่ามาตรฐาน (16.0-19.0%) มีค่าความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress; $\sigma_{0.2\%}$) ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (Ultimate Stress; σ_U) หรือค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Tensile Strength) และร้อยละการยืดตัว (%Elongation) เท่ากับ 382 MPa 513 MPa และ 27.7 ตามลำดับ ซึ่งสมบัติทางกลของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ศึกษา มีค่าไม่น้อยกว่าค่ามาตรฐานที่ระบุไว้ และจากผู้ผลิต [22] จึงยืนยันได้ว่าวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก เกรด 430 HL โดยมีค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบความแข็ง (Hardness Testing) เท่ากับ 85 HRB

เนื่องจากวัสดุชิ้นงานที่ศึกษามีการปรับปรุงสภาพผิวด้วยการขัดเจียเส้นแบบต่อเนื่องทั่วทั้งแผ่นชิ้นงานตามทิศทางการรีด (Rolled Direction) ของวัสดุ และเพื่อให้ทราบค่าความหยาบผิวของวัสดุชิ้นงานที่ศึกษาซึ่งถือเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน [1] ผู้ศึกษาจึงตรวจสอบค่าความหยาบผิว

(Surface Roughness) R_a ของวัสดุชิ้นงานด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวแบบเข็มลาก (Stylus) ของ Marsurf รุ่น PS1 ด้วยระยะความยาวเข็มลากเคลื่อนที่เท่ากับ 8.6 mm และมีระยะทางในการกรองความถี่ของความยาวที่วัด (Cut-off Length) เท่ากับ 0.8 mm ค่าความหยาบผิวของวัสดุชิ้นงานที่วัดได้มีค่าเฉลี่ย R_a เท่ากับ 0.0938 μm ตามทิศทางแนวรีด และมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a เท่ากับ 0.2342 μm ตั้งฉากกับทิศทางแนวรีด ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวของวัสดุชิ้นงานในแต่ละทิศทางของแนวรีดมีค่าแตกต่างกัน

2.2 เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

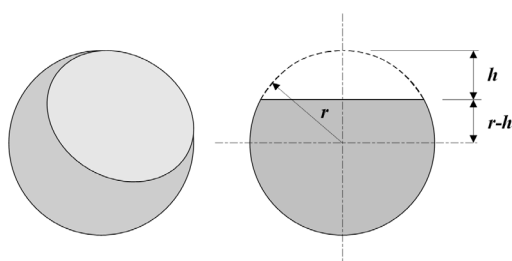
เครื่องไทรบอมิเตอร์แบบ Pin-on-Disk ยี่ห้อ Anton Paar ถูกใช้เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการเลื่อนไถลและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไทรบอโลยีของผิวคู่สัมผัสเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน การทดสอบใช้ลูกบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm จับยึดด้วยด้ามจับ (Ball Holder) แทนการใช้หมุด (Pin) เพื่อให้สามารถหมุนเปลี่ยนตำแหน่งการทดสอบได้รอบลูกบอล และเพื่อให้สอดคล้องกับกระบวนการขึ้นรูปเย็น ลูกบอลถูกเตรียมจากวัสดุ SKD11 ชุบแข็งเพื่อให้ได้ค่าความแข็ง 60 ± 2 HRC ปรับแต่งผิวให้มีค่าความหยาบผิว R_a ในช่วง $0.1 \pm 0.05 \mu\text{m}$ ซึ่งค่าความแข็งและค่าความหยาบผิวที่เลือกใช้เป็นค่าที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะทั่วไป [14,20,19,24] วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 430 HL ความหนา 1.5 mm ถูกเตรียมเป็นแผ่นดิสก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ด้วยเครื่องไวร์ อีดีเอ็ม (Wire EDM) เพื่อป้องกันการเสียรูปและอิทธิพลจากการเปลี่ยนรูปพลาสติก (Plastic Deformation)

ความเร็วเลื่อนไถล (Sliding Velocity) ที่ศึกษามี 3 ระดับ คือ 50 100 และ 150 mm/s ซึ่งเป็นช่วงความเร็วที่ใช้ในงานขึ้นรูปโลหะ [15,25,26] ความดันสัมผัสที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัสให้โดยตุ้มน้ำหนักขนาด 2 5 และ 8 N ซึ่งเท่ากับค่าความดันสัมผัส 807 1095 และ 1280 MPa ตามสมการของ Hertzian [27] การทดสอบทำใน

ห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ $23 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
และ $50 \pm 3 \%$ ตามลำดับ

การทดสอบทำในสภาวะไม่ใช้สารหล่อลื่นเนื่องจาก
ปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะมีความพยายามลดการใช้สารหล่อ
ลื่นจำพวกน้ำมันเนื่องจากเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานและ
สภาพแวดล้อม [28] อีกทั้งยังต้องกำจัดสารหล่อลื่น
ดังกล่าวหลังจากการขึ้นรูปเสร็จก่อนนำไปใช้งานซึ่งถือเป็น
ต้นทุนการผลิตอย่างหนึ่ง ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าเป็นการ
ทดสอบในสภาวะปราศจากสารหล่อลื่น (Dry Condition)
ลูกบอลและแผ่นดิสก์ถูกล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) โดย
เทคนิคอัลตราโซนิค (Ultrasonic) เป็นเวลา 2 นาที

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัส
ของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานได้จากซอฟต์แวร์
InstrumX เวอร์ชัน 7.0.10 ซึ่งต่อพ่วงกับชุดไดรบบิเตอร์
โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่นำมารายงานผลเป็น
ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในช่วงระยะทางการทดสอบ
100 m ที่ทุก ๆ ระยะทางการทดสอบ 100 m ลูกบอล
SKD11 ชุบแข็ง จะถูกนำมาตรวจสอบลักษณะความ
เสียหายและวัดความกว้างของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิว
ลูกบอลทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ Mitutoyo MF-
B1010D ที่ต่อพ่วงกับชุดประมวลผลภาพ Mitutoyo
Vision Unit โดยการทดสอบจะทำจนถึงระยะทางการ
เคลื่อนที่ 1200 m ลักษณะรอยสึกหรอของบอลแสดงดัง
รูปที่ 3 โดยสามารถหาปริมาณการสึกหรอของลูกบอล
SKD11 ชุบแข็ง ได้จากสมการ (2)



รูปที่ 3 ลักษณะและตัวแปรในการวัดรอยสึกหรอของ
ลูกบอล

$$V = \pi h^2 \left(r - \frac{h}{3} \right) \quad (2)$$

เมื่อ V คือ ปริมาณการสึกหรอ, mm^3

r คือ รัศมีของลูกบอลทดสอบ, mm

h คือ ความสูงจากส่วนโค้งของผิวลูกบอลจนถึง
รอยสึกหรอ, mm

โดยค่าความสูงจากส่วนโค้งของผิวลูกบอลจนถึงรอย
สึกหรอสามารถหาได้จากสมการ (3) เมื่อ s คือ เส้นผ่าน
ศูนย์กลางของรอยสึกหรอที่เกิดขึ้น มีหน่วยเป็น mm

$$h = \frac{8r - \sqrt{64r^2 - 16s^2}}{8} \quad (3)$$

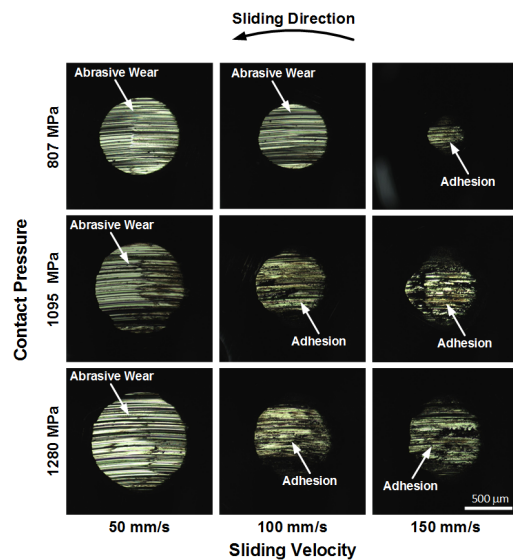
3. ผลและการวิเคราะห์

3.1 ลักษณะความเสียหายของผิวบอล

จากการทดสอบ Pin-on-Disk ที่ระยะทางการทดสอบ
100 m เมื่อนำลูกบอลมาตรวจสอบลักษณะความเสียหายที่
เกิดกับผิวสัมผัสดังรูปที่ 4 พบว่ามีรูปแบบความเสียหายที่
แตกต่างกันตามค่าความเร็วในการเลื่อนไถลและค่าความดัน
สัมผัสที่ให้แก่ผิวคู่สัมผัส คือ มีการสึกหรอแบบขัดถู
(Abrasive Wear) กับเกิดการยึดติด (Adhesion) ของวัสดุ
ชิ้นงานบนผิวของลูกบอล ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุที่เคลื่อนที่
สัมผัสกันจะเกิดการสึกหรอในลักษณะขัดถูและเกิดการยึด
ติดของวัสดุชิ้นงาน [1,27,29] แต่ปัญหาการขึ้นรูปเหล็กกล้า
ไร้สนิมหรือวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงสูงมักพบปัญหาวัสดุ
ชิ้นงานเกาะและยึดติดกับผิวของวัสดุเครื่องมือดังรายงานใน
งานวิจัยที่ผ่านมา [30-32]

จากผลการทดสอบพบว่าปัญหาวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้า
ไร้สนิมเกรด 430 HL เกาะและยึดติดกับผิวของวัสดุ
เครื่องมือเกรด SKD11 ชุบแข็ง จะรุนแรงเมื่อผิวคู่สัมผัส
เคลื่อนที่สัมผัสกันด้วยความเร็วสูงและมีค่าความดันผิวคู่
สัมผัสสูงดังพิจารณาได้จากลักษณะความเสียหายของ
ผิวสัมผัสลูกบอลในรูปที่ 4 นอกจากลักษณะความเสียหายที่
เกิดกับผิวสัมผัสของลูกบอลวัสดุเครื่องมือชุบแข็งแล้ว เมื่อ
พิจารณาความกว้างของรอยสึกหรอของลูกบอลที่สภาวะ
เงื่อนไขการทดลองที่ต่างกันพบว่าเมื่อความเร็วในการ

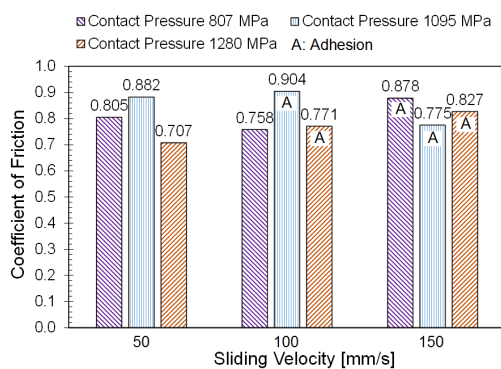
เลื่อนไกลเพิ่มขึ้นรอยสึกหรอของลูกบอลจะมีขนาดเล็กลง ในขณะที่เมื่อเกิดความดันที่ผิวคู่สัมผัสสูง รอยสึกหรอที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสของลูกบอลจะมีขนาดใหญ่ขึ้น



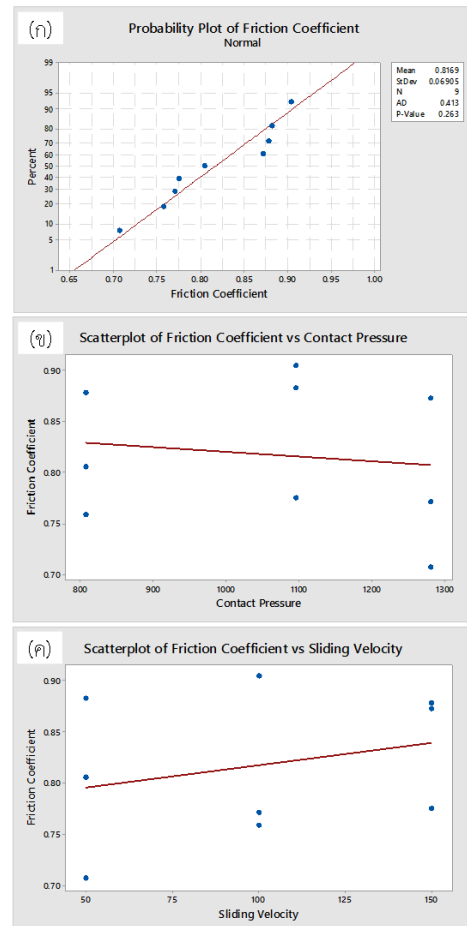
รูปที่ 4 ลักษณะความเสียหายที่เกิดกับผิวลูกบอลที่ระยะทางการทดสอบ 100 m

3.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ชุบแข็ง ที่เคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ภายใต้สภาวะความดันสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไกลต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัส



(ง) Correlation: Friction Coefficient, Contact Pressure, Sliding Velocity

Friction Coefficient	
Contact Pressure	-0.139
	0.722
Sliding Velocity	0.274
	0.476
Cell Contents	
Pearson correlation	
P-Value	

รูปที่ 6 ผลการทดสอบทางสถิติ (ก) การทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูล (ข) และ (ค) การวิเคราะห์ด้วยแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูล (ง) ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์

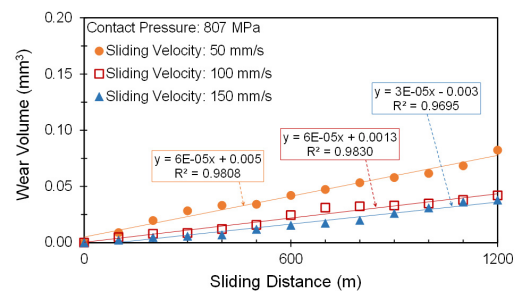
จากรูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ได้ภายใต้สภาวะที่ศึกษามีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.707 ถึง 0.904 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าความดันสัมผัสและความเร็วเลื่อนไกลไม่มีแนวโน้มความสัมพันธ์ต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในลักษณะความสัมพันธ์เชิง

เส้น เมื่อนำค่าที่ได้ไปทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังผลการทดสอบในรูปที่ 6 พบว่า (ก) ชุดข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางลบกับความดันสัมผัส (ค) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีแนวโน้มที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวกกับความเร็วเลื่อนไถล แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ดังรูปที่ 6 (ง) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในระดับต่ำมาก คือ 0.139 และ 0.274 ในกรณีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับความดันสัมผัส และกรณีวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายกับความเร็วเลื่อนไถลตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า P-Value ของทั้งสองกรณีพบว่ามีความมากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (0.05) ซึ่งแปลความหมายได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความดันสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไถลของวัสดุคู่สัมผัสหลักเครื่องงานเย็นเกรด SKD11 ชุบแข็งกับเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [3] ที่รายงานว่าความดันสัมผัสไม่มีอิทธิพลที่ชัดเจนต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายแต่ไม่ได้อธิบายเหตุผลประกอบ ซึ่งจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้และรายงานในเอกสารอ้างอิง [3] ไม่สอดคล้องกับสมการ (1) ทั้งนี้เอกสารอ้างอิง [34] ได้อธิบายว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายเป็นสมบัติของวัสดุที่ขึ้นกับตัวแปรหลายตัว นอกเหนือจากค่าความดันสัมผัสที่เกิดระหว่างผิวคู่สัมผัส เช่น อุณหภูมิที่เกิด ณ จุดสัมผัสขณะผิววัสดุคู่สัมผัสเคลื่อนที่สัมผัสกัน รวมถึงสภาพผิวของวัสดุผิวคู่สัมผัส เป็นต้น จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าสภาพผิวของวัสดุผิวคู่สัมผัสมีความแตกต่างกันเนื่องจากเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวของวัสดุแม่พิมพ์ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองที่แตกต่างกัน และการเกิดการยึดติดเป็นรูปแบบที่ไม่ตายตัว [35] ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความดันสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไถลของวัสดุคู่สัมผัสที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

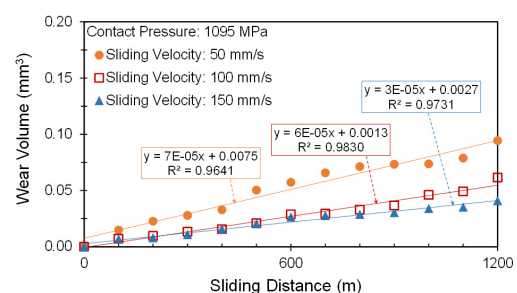
ในกรณีที่ผิวของวัสดุเครื่องมือเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานจะเกิดความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสสูง ทำให้ต้องใช้แรงในการเอาชนะแรงยึดติดระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงานสูงจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงด้วยซึ่งได้อธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง [2] นั้น เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของวัสดุผิวคู่สัมผัสที่สภาวะเงื่อนไขที่เกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน (A) บนผิววัสดุเครื่องมือพบว่าผลการศึกษามีความแตกต่างกับงานวิจัยดังกล่าว คือ การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุเครื่องมือไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่สูงขึ้น

3.3 พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือ

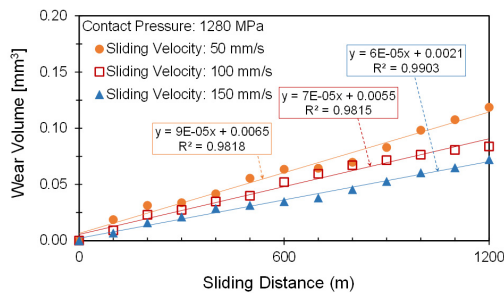
พฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสึกหรอกับระยะทางการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 7-9



รูปที่ 7 ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือที่ความดันสัมผัส 807 MPa



รูปที่ 8 ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือที่ความดันสัมผัส 1095 MPa



รูปที่ 9 ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือที่ความดันสัมผัส 1280 MPa

ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 ชูบแข็งกับระยะทางการเคลื่อนมีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวกในทุกสภาวะเงื่อนไขการทดลอง โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าสถิติ R^2 ที่มีค่ามากกว่า 0.95 ดังนั้นเมื่อวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือชูบแข็งเคลื่อนที่ไปบนวัสดุชิ้นงาน ด้วยระยะทางการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น วัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือจะเกิดการสึกหรอในปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [1,2,3,5,29]

จากสมการเส้นตรงของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแต่ละสภาวะเงื่อนไขการทดลอง เมื่อพิจารณาปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่พบว่า ปริมาณการสึกหรอจะแปรผันตามค่าความดันสัมผัสซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง [1,3] คือ ในสภาวะที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงจะส่งผลให้ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือสูง ในขณะที่ปริมาณการสึกหรอจะแปรผกผันกับความเร็วในการเคลื่อนไถของวัสดุคู่สัมผัส

จากผลการศึกษาพฤติกรรมทางไตรบอโลยีระหว่างผิวคู่สัมผัสวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน ปัญหาสำคัญในการทำงานกับวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL พบว่ามีปัญหาการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุทำแม่พิมพ์ โดยเฉพาะในสภาวะที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงที่ส่งผลให้วัสดุชิ้นงานที่มีค่าความแข็งน้อยกว่าวัสดุทำแม่พิมพ์เกิดการเปลี่ยนรูปถาวรแล้วหลุดไปเกาะและยึดติดกับวัสดุแม่พิมพ์ซึ่งมีค่าความแข็งที่สูงกว่า แต่ยังไม่

เป็นที่ยืนยันว่าความเร็วในการเคลื่อนไถของวัสดุเครื่องมือบนผิววัสดุชิ้นงานส่งผลต่อการเกิดการยึดติดดังกล่าวหรือไม่ จากงานวิจัยที่ผ่านมา [14-16,25,33] ได้รายงานว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิวของวัสดุเครื่องมือได้แก่ ความดันสัมผัสที่เกิดระหว่างผิวของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน ระยะทางการเคลื่อนที่ของวัสดุเครื่องมือบนวัสดุชิ้นงาน ค่าความหยาบผิว และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเครื่องมือ แต่ยังไม่มีการกล่าวถึงความเร็วเคลื่อนไถ ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวหรือความเร็วที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะต่อการเกิดการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน ผู้ศึกษาจะได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวในกระบวนการขึ้นรูปโลหะด้วยการทดสอบขึ้นรูปจริงต่อไป

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของความเร็วในการเคลื่อนไถและความดันสัมผัสที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางไตรบอโลยีของผิวสัมผัสวัสดุเครื่องมือเหล็กกล้า SKD11 ชูบแข็งและวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก 430 HL ด้วยวิธีการทดสอบ Pin-on-Disk สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ความเสียหายของผิววัสดุเครื่องมือที่เคลื่อนที่สัมผัสบนวัสดุชิ้นงานมี 2 รูปแบบ คือ การสึกหรอแบบขีดถูและการยึดติดของวัสดุชิ้นงาน
- 2) ความเร็วในการเคลื่อนไถและความดันสัมผัสไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคู่สัมผัสของวัสดุเครื่องมือกับวัสดุชิ้นงาน
- 3) การยึดติดของวัสดุชิ้นงานบนผิววัสดุเครื่องมือไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่สูงขึ้น
- 4) ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือกับระยะทางการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นทางบวก
- 5) ในสภาวะที่เกิดความดันระหว่างผิวคู่สัมผัสสูงจะส่งผลให้ปริมาณการสึกหรอของวัสดุเครื่องมือสูง ในขณะที่ปริมาณการสึกหรอจะแปรผกผันกับความเร็วในการเคลื่อนไถของวัสดุคู่สัมผัส

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Lange, *Handbook of Metal Forming*. New York, McGraw-Hill, 1985.
- [2] V. Premanond, "Tribological Behavior of tool materials against stainless steel workpiece material in a ball-on-disk model wear device," in *the 18th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Khon Kaen, 2004, p. 5.
- [3] J. Sriprasird, A. Khantachawana, V. Premanond and P. Kaewtatip, "Wear behavior of contacting between thin film coating on SKD11 ball and 304 stainless steel disk," (in Thai), *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 6, pp. 1591-1598, 2007.
- [4] K. Lawanwong, B. Sresomroeng and V. Premanond, "The study type of hard film coating and strength of materials to wear volume by ball-on-disk technique," (in Thai), *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 20, no. 4, pp. 85-91, 2009.
- [5] B. Sresomroeng and N. Angsuseranee, "Ball-on-Disk simulation to study tribological behavior in sheet metal forming," in *the 1st Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi National Conference*, Phranakhon Si Ayutthaya, 2016, pp. 96-103.
- [6] L. Wang, J. Cai, J. Zhou and J. Duszczek, "Characteristics of the friction between aluminium and steel at elevated temperatures during ball-on-disc tests," *Tribol Lett.*, Vol. 36, pp. 183-190, 2009.
- [7] L. Wang, Y. He, J. Zhou and J. Duszczek, "Effect of temperature on the frictional behavior of an aluminium alloy sliding against steel during ball-on-disc tests," *Tribology International*, vol. 43, pp. 299-306, 2010.
- [8] R. Wang, H. J. Mei, R. S. Li, Q. Zhang, T. F. Zhang and Q. M. Wang, "Friction and wear behavior of AlTiN-coated carbide balls against SKD11 hardened steel at elevated temperatures," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 31, pp. 1073-1083, 2018.
- [9] L. Yan, Y. Liu and E. Liu, "Wear behavior of martensitic NiTi shape memory alloy under ball-on-disk sliding tests," *Tribology International*, vol. 66, pp. 219-224, 2013.
- [10] D. Toboła, W. Brostow, K. Czechowski and P. Rusek, "Improvement of wear resistance of some cold working tool steels," *Wear*, vol. 382-383, pp. 29-39, 2017.
- [11] J. Moravčíková, R. Moravčík, M. Kusý and M. Necpal, "Influence of laser surface texturing on tribological performance of tool steels," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, pp. 5417-5426, 2018.
- [12] M. Alvarez-Vera, J. C. Torres-Méndez, H. M. Hdz-García, R. Muñoz-Arroyo, A. I. Mtz-Enriquez, J. L. Acevedo-Dávila, M. A. L. Hernandez-Rodriguez, "Wear resistance of TiN or AlTiN nanostructured Ni-based hardfacing by PTA under pin on disc test," *Wear*, vol. 426-427, pp. 1584-1593, 2019.
- [13] F. Hernández, N. Demas, K. Gonzales and A. Polycarpou, "Correlation between laboratory ball-on-disk and full-scale rail performance tests," *Wear*, vol. 270, pp. 479-491, 2011.

- [14] H. Kim, S. Han, Q. Yan and T. Altan, "Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS)," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 299–304, 2008.
- [15] A. Gåård, P. V. Krakhmalev, J. Bergström and N. Hallbäck, "Galling resistance and wear mechanisms – cold work tool materials sliding against carbon steel sheets," *Tribol Lett.*, Vol. 26 no. 1, pp. 67–72, 2007.
- [16] P. Karlsson, A. Gåård and P. Krakhmalev, "Influence of tool steel micro structure on friction and initial material transfer," *Wear*, vol. 319, pp. 12–18, 2014.
- [17] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM G 99 – 95a, 2000.
- [18] T. Altan, S. Oh and H. Gegel, *Metal Forming: Fundamentals and Applications*, Ohio, ASM International, 1995.
- [19] V. Boljanovic, *Sheet Metal Stamping Sies: Die Design and Die-Making Practice*. New York, Industrial Press Inc., 2013.
- [20] Outokumpu, *Handbook of Stainless Steel*, Espoo, Outokumpu Oyj, 2013.
- [21] JFE Steel Corporation. (2020, September 9). Stainless Steels [Online]. Available: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/stainless/catalog/g1e-001.pdf>
- [22] Juthawan. (2020, September 9). Stainless Steel [Online]. Available: <https://www.juthawan.co.th/product-group/stainless-steel/>
- [23] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M – 13a, 2013.
- [24] Standard components for press dies 2007.9 – 2008.8 catalog, Misumi Corporation, 2008.
- [25] Y. Abe, W. Daodon, N. Takahashi and K. Mori, "Improvement of seizure resistance by roughening surface of stainless steel drawn cup in ironing using die having lubricant pockets," *Production Engineering Research and Development*, vol. 10, pp.551–562, 2016.
- [26] T. Altan and A.E. Tekkaya, *Sheet Metal Forming Processes and Applications*, Ohio, ASM International, 2012.
- [27] B. Bhushan, *Modern tribology handbook*, Florida, CRC Press LLC, 2001.
- [28] F. Vollertsen and F. Schmidt, "Dry metal forming: definition, chances and challenges," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1 no. 1, pp. 59–62, 2014.
- [29] G. W. Stachowiak, *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*, Hoboken, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- [30] S. Kataoka, M. Murakawa, T. Aizawa and H. Ike, "Tribology of dry deep-drawing of various metal sheets with use of ceramics tools," *Surface and Coatings Technology*, vol. 177-178, pp. 582–590, 2004.
- [31] B. Podgornik, S. Hogmark and O. Sandberg, "Influence of surface roughness and coating type on the galling properties of coated forming tool steel," *Surface and Coatings*

- Technology*, vol. 184, no. 2-3, pp. 338–348, 2004.
- [32] B. Podgornik, S. Hogmark and O. Sandberg, “Proper coating selection for improved galling performance of forming tool steel,” *Wear*, vol. 261, no. 1, pp. 5–21, 2006.
- [33] W. Dong, L. Xu, Q. Lin and Z. Wang, “Experimental and numerical investigation on galling behavior in sheet metal forming process,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 88, pp. 1101–1109, 2017.
- [34] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 3rd ed., Massachusetts, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [35] N. Angsuseranee, B. Watcharasresomroeng, P. Bunyawanichkul and S. Chartniyom, “Tribological behavior of tool steel substrate and solid films against 304 BA austenitic stainless steel under dry sliding,” *Advances in Tribology*, vol. 2020, pp. 1–11, 2020.