

การออกแบบแขนกดชิ้นงานทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disk และทดสอบกลไกการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

Arm Press Design of Pin-on-Disk Wear Testing Machine and Wear Testing of Stainless Steel 304

ภาณุพงษ์ เพชรประดับ¹, นุชจิรา ดีแจ่ม^{1*} และ อมริสา มณีรุ่ง²

Panupong Petpadap¹, Nuchjira Dejang^{1*} and Amarisa Maneerung²

¹ฟิสิกส์ประยุกต์(สาขาวัสดุศาสตร์) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

²สาขาวิชา เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

¹Apply physics (Materials), Physics Department, Faculty of Science, Naresuan University

²Electronics Technology, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

Received : 12 June 2018

Accepted : 10 October 2018

Published online : 18 October 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบแขนกดทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk ที่มีเครื่องชั่งงานเป็นจานหมุน และศึกษา กลไกการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ผิวชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM G99-04 (2014) ลักษณะของชุด แขนกดน้ำหนักและจานหมุนทดสอบแยกออกจากกัน น้ำหนักทดสอบถูกวางไว้ในแนวเดียวกับหัวกดที่มีทิศทางตั้งฉากกับ ชิ้นงาน ทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีเงื่อนไขทดสอบที่ความเร็วรอบ 80 และ 160 รอบต่อนาที น้ำหนักกด 200, 400 และ 600 กรัม และมีระยะทดสอบ 600 เมตร ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานทดสอบมีร่องการสึกหรอที่ปรากฏเป็นวง รัศมีคงที่ ค่าอัตราการสึกหรอที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นของปริมาตรที่หายไปกับระยะทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น ตามน้ำหนักกดและความเร็วรอบของจานหมุน ลักษณะของความกว้างร่องการสึกหรอจะมีความกว้างเพิ่มขึ้นตามระยะ ทดสอบ ที่ระยะทดสอบ 600 เมตร มีค่าอัตราการสึกหรอมากที่สุด 8.97×10^{-4} และ 19.000×10^{-4} เมตรต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร ของความเร็วรอบจานหมุน 80 และ 160 รอบต่อนาที ตามลำดับ ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและกลไกของร่องการสึกหรอที่ สังเกตจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าร่องการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้ สนิมที่ปรากฏมีการเปลี่ยนรูปแบบถาวร, รอยขีดและอนุภาคที่หลุดออกบนร่องผิวสึกหรอ ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับตาม พฤติกรรมการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม จึงสรุปได้ว่าแขนกดทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk ที่สร้างขึ้นสามารถใช้ ทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ได้

คำสำคัญ : การสึกหรอแบบไถล, pin-on-disk, การสึกหรอ

*Corresponding author. E-mail : nuchjirad@nu.ac.th

Abstract

In this research, it was designs the arm press for wear testing using rotating of grinding and wear testing mechanism of stainless steel 304. The surface specimen for sliding wear test was prepared under the condition of ASTM G99-04 (2014) standard. The characteristics of the arm set, the weight and the test plate were separated that loading was aligned with the head with the perpendicular moving direction. The stainless steel was examined by the wear testing with the rotating disc 80 and 160 rpm and different leading 200, 400 and 600 g, distance test 600 m. The test results showed that the test specimen had a constant radius of wear track. The wear rate result from slope of the graph of linear relationship between volume loss and distances. It increased with test loading weight and rotational speed of the rotating of disc. The physical of width wear track should be growth with distance test. The wear rate is highest wear rate at testing distanced 600 m, 8.97×10^{-4} and 19.00×10^{-4} m/mm^3 for speed of rotary plates was 80 and 160 rpm, respectively. The microstructure and wear mechanism were observed by optical microscope and scanning electron microscope. It was found that the wear of stainless steel appeared the plastic deformation, scaring and particles pull out on wear track. This phenomena was corresponds to the wear behavior of stainless steel. It can be concluded that the pin-on-disc wear test arm can be used to test wear of stainless steel 304.

Keywords : wear, pin-on-disk, stainless steel

บทนำ

การสึกหรอ (wear) คือการสูญเสียเนื้อวัสดุบริเวณผิวสัมผัสที่เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของวัสดุพื้นผิวหนึ่งที่สัมผัสวัสดุที่เคลื่อนที่ เมื่อจำกัดความหมายให้แคบลง การสึกหรอเป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวผลจากการสูญเสียเนื้อวัสดุที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ระหว่างผิวของวัสดุสองชนิดที่สัมผัสกัน อาจกล่าวถึงลักษณะการสึกหรอโดยรวมได้ดังนี้ 1) การแทนที่เนื้อวัสดุที่เกิดขึ้นที่ผิว (เป็นการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของวัสดุแต่ไม่มีการสูญเสียเนื้อวัสดุ) เป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ 2) กระบวนการสึกหรอปกติที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรสามารถพบทั้งแบบลื่นไถลและกึ่งลื่นภายใต้สภาวะระบบการทำงาน ที่มีสารหล่อลื่นและไม่มีสารหล่อลื่น 3) ลักษณะการสึกหรอที่พิเศษ คือ การสึกหรอแบบขูดถูที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่มีความแข็งกระทำอยู่ระหว่างพื้นผิวทั้งสองที่เคลื่อนที่ รวมถึงของเหลวที่ไหลอยู่ระหว่างสองผิวที่มีอนุภาคปนอยู่ด้วย (Stachowiak, 2005)

ปัญหาการสึกหรอมักพบอยู่เสมอในเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่มีการขัดถูระหว่างผิวชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ไปมา เช่น การสึกหรอของเพลลา ข้อเหวี่ยง ลูกบิดสับ เป็นต้น ความเสียหายที่พบบนชิ้นงานอาจเกิดในระดับเพียงเล็กน้อยจนถึงความเสียหายที่รุนแรง ขึ้นส่วนที่เกิดความเสียหายจากการสูญเสียเนื้อวัสดุ ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องจักรไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเครื่องจักรหรือบริเวณที่ประสบปัญหา การแก้ปัญหาส่วนใหญ่มักจะเป็นการเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ในจุดที่เกิดการเสียหาย ส่งผลทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในภาคอุตสาหกรรม รวมทั้งระยะเวลาการสั่งซื้อสินค้าเป็นเวลานาน นอกจากนี้ชิ้นส่วนบางอย่างจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ การทำความเข้าใจและปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอเป็น

วิธีการลดความเสียหายหรือการสูญเสียของการทำงานเครื่องจักร และต้นทุนการผลิตได้ (ASTM G 99 – 04, 2014) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุหรือการออกแบบวัสดุพื้นผิวที่ช่วยยืดอายุการใช้งาน และมีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อการแก้ปัญหาที่นั้น ๆ ผลลัพธ์ที่ได้ต้องคุ้มค่าต่อการใช้งาน ลดปัญหาต้นทุนในระยะยาว การเลือกวัสดุในการออกแบบพื้นผิวก็จะเป็นส่วนสำคัญจะต้องให้เหมาะสมกับกลไกการเกิดการสึกหรอในแต่ละสภาวะ ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอ ได้แก่ ความเร็ว อุณหภูมิ ขนาดของอนุภาคของวัสดุ และความแข็งของวัสดุ เป็นต้น เพื่อเข้าใจกลไกการสึกหรอบนชิ้นงานสามารถทำได้โดยการจำลองเหตุการณ์ ด้วยการทดสอบการสึกหรอภายใต้สถานการณ์ต่างกัน เช่น การทดสอบแบบลื่นไถล การทดสอบแบบขัดถู และการทดสอบการสึกหรอร่วมกับการกัดกร่อน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการสึกหรอที่พบมากที่สุดชนิดหนึ่ง คือ การสึกหรอแบบลื่นไถล (sliding wear) เป็นการสึกหรอที่เกิดจากผิววัสดุสองชิ้นมาทำการไถลสัมผัสกันด้วยในระยะเวลา น้ำหนักกดในสภาวะ และเงื่อนไขอื่น ๆ เป็นต้น

ในปัจจุบันห้องปฏิบัติการทางวัสดุศาสตร์มักมีเครื่องขัดชิ้นงาน ที่มีลักษณะเป็นจานหมุนทั้งที่สามารถควบคุมความเร็วของจานหมุนได้และไม่ได้ การนำเครื่องขัดชิ้นงานดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือเพื่อประกอบการเรียนการสอนและงานวิจัยที่สอดคล้องกับเนื้อหาเรื่อง การสึกหรอ ด้วยการจำลองสถานการณ์การสึกหรอแบบลื่นไถลด้วยเทคนิค pin-on-disc ตามมาตรฐาน ASTM (Budinski, 2000; ASTM G 99 – 04, 2014; Wahlström *et. al.*, 2017) โดยเทคนิค pin-on-disc เป็นการทดสอบการสึกหรอของการลื่นไถลที่ผิววัสดุที่สัมผัสกัน กล่าวคือ วัสดุที่ถูกทดสอบในลักษณะเป็นแผ่นเรียบและหัวบอลทดสอบ (pin) ที่กดลงบนชิ้นงานทดสอบภายใต้แรงกด (loading) ชิ้นงานจะถูกยึดบนแท่นหมุน ผลที่ได้จะปรากฏร่องรอยการสูญเสียเนื้อวัสดุบนชิ้นงาน เรียกว่า ร่องการสึกหรอ (wear track) บนชิ้นงาน ทำการวัดความกว้างของร่องการสึกหรอและคำนวณหาปริมาณที่หายไป นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณที่หายไปและระยะทดสอบ ค่าที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของการทดสอบ ได้แก่ น้ำหนัก ระยะทดสอบ และความเร็วรอบของจานหมุน เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์การสึกหรอแบบ pin-on-disc อย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามพบว่าเครื่องมือดังกล่าวมีความซับซ้อนและมีต้นทุนสูง เพื่อเป็นทางเลือกในการศึกษาการสึกหรอเบื้องต้น สำหรับสถานศึกษาหรือหน่วยงานวิจัยที่ประสบปัญหาค่าใช้จ่ายในการผลิตหรือสร้างเครื่องมือทดสอบที่มีกลไกไม่ซับซ้อนและต้นทุนต่ำ อีกทั้งเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อประกอบการเรียนการสอนและเปรียบเทียบผลการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบชุดแผนกต้นแบบสำหรับการทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disc และการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM G 99 – 04, (2014) ลักษณะแผนกต้นแบบสามารถปรับระดับรัศมีวงทดสอบพร้อมสมดุลแรง และทำการศึกษาคัดเลือกและศึกษากลไกการสึกหรอของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ คือ น้ำหนักกด ความเร็วรอบและระยะทดสอบที่แตกต่างกัน เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการสึกหรอ ตรวจสอบกลไกการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม วิเคราะห์ผลและสรุปผล

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ส่วนที่ 1 รายละเอียดและการออกแบบชุดทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disc ส่วนที่ 2 การทดสอบการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม

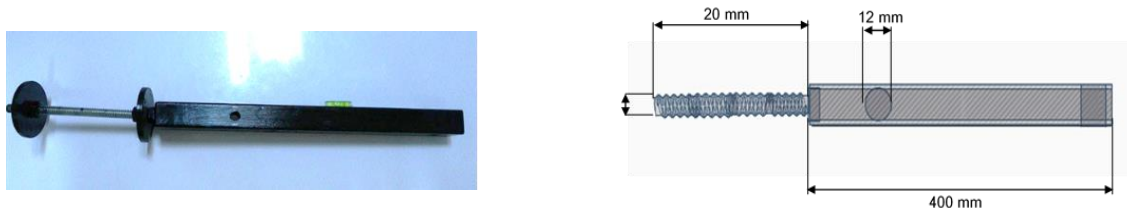
1. รายละเอียดและการออกแบบชุดทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disc

งานวิจัยนี้ทำออกแบบชุดทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disc ดังภาพที่ 1 ประกอบด้วยชุดแกนกดชิ้นงานจับยึดหัวบอลทดสอบทำหน้าที่ออกแรงกดชิ้นงานลงบนจานหมุนของเครื่องขัดงานที่มีตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิม มีรายละเอียดการดำเนินงาน ดังนี้



ภาพที่ 1 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk

- แกนกดชิ้นงานและระบบสมดุลแรง แกนกดชิ้นงานออกแบบให้มีลักษณะเป็นชิ้นเดียวกับแกนใสน้ำหนักกดและมีระบบสมดุลแรง ทำหน้าที่สร้างความสมดุลให้กับแกนกดทั้งสองด้านของแกนกดชิ้นงานสมดุลกัน เพื่อให้ได้น้ำหนักที่ใส่กับแกนกดชิ้นงานเป็นน้ำหนักที่แท้จริง แกนกดที่ออกแบบทำจากเหล็กกล่องขนาด 30x40 ตารางมิลลิเมตรมีลักษณะ ดังภาพที่ 2 และปรับระดับสมดุลด้วยการหมุนต็มน้ำหนักตามเกลียว

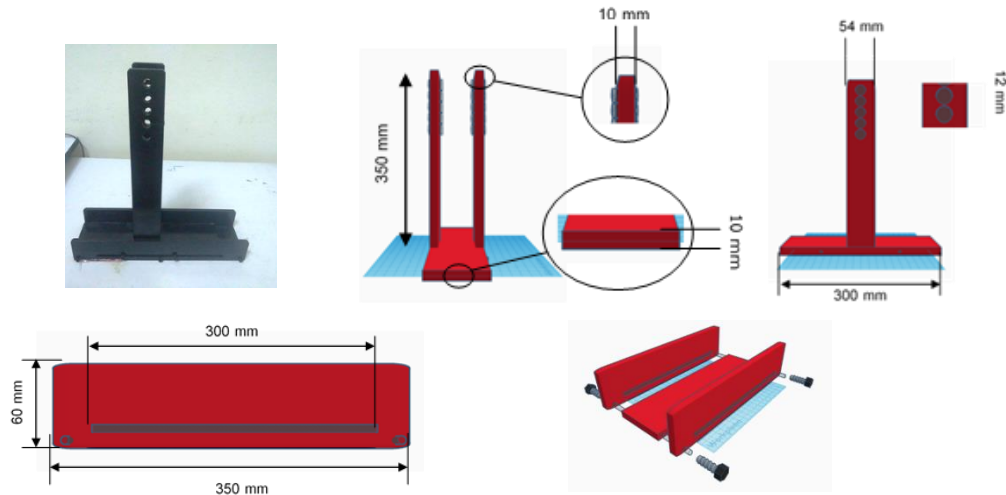


ภาพที่ 2 แกนกดและสมดุลแรง

- หัวกดชิ้นงาน มีลักษณะดังภาพที่ 3 ถูกออกแบบให้แยกส่วนกับแกนกดชิ้นงาน เพื่อให้สะดวกต่อการปฏิบัติงานทดสอบสามารถใส่หัวบอลทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ในงานวิจัยนี้ใช้หัวบอลทดสอบทำจากเซรามิกเซอร์โคเนีย (ZrO_2) สามารถสวมเข้ากับแกนต็มน้ำหนักที่เป็นแกนใสน้ำหนักในการทดสอบการสึกหรอ เมื่อประกอบชุดหัวกดชิ้นงานเข้ากับแกนกดชิ้นงานและ ทำการปรับระดับแกนกดชิ้นงานโดยสังเกตจากระดับน้ำเพื่อให้ได้ระนาบตั้งฉากกับกับทิศของน้ำหนักกดชิ้นงาน



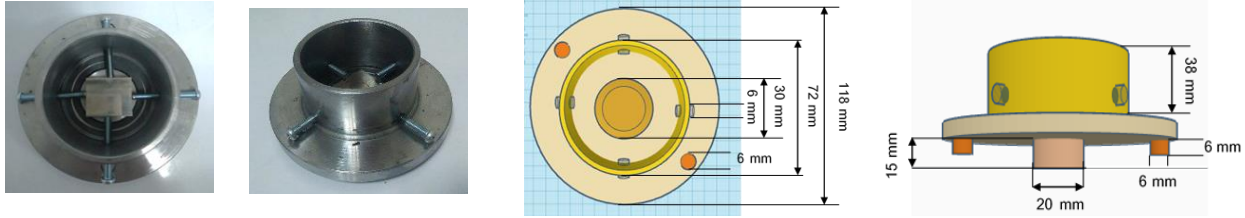
ภาพที่ 3 แท่นยึดและเม็ดบอลทดสอบ



ภาพที่ 4 ฐานยึดคานและอานเลื่อนปรับรัศมี

- ชุดฐานยึดคานและอานเลื่อนปรับรัศมี ทำจากเหล็กแผ่นขนาด 5 มิลลิเมตร ติดกับฐานยึดแกนดัดขึ้นงานที่สามารถปรับระดับความสูงของแกนดัดขึ้นงานได้ 4 ระดับ โดยฐานยึดแกนดัดขึ้นงานจะสวมเข้ากับแกนดัดขึ้นงานด้วยเหล็กเพลลาขาวที่ทำหน้าที่เป็นจุดหมุนของแกนดัดขึ้นงาน และเลื่อนปรับรัศมีได้ด้วยกลไกการออกแบบให้มีร่องวางเลื่อน เข้า-ออก เพื่อปรับรัศมีของวงรอบของทดสอบการสึกหรอ ดังภาพที่ 4

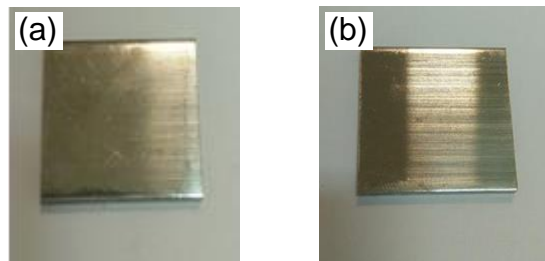
- ฐานจับยึดขึ้นงาน ประกอบเข้ากับจานหมุนของเครื่องขัดขึ้นงานแบบหัวเดียวซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้สูงสุด 300 รอบต่อนาที ยี่ห้อ Yangjiang Weiyi Polishing Material Co., Ltd. ประเทศจีน โดยออกแบบฐานจับยึดขึ้นงานให้มีความแม่นยำ และแนบสนิทกับจานหมุนของเครื่องขัดเพื่อลดการสั่นสะเทือนขณะทดสอบ ดังภาพที่ 5 ฐานจับยึดขึ้นงานออกแบบให้สามารถทดสอบการสึกหรอแบบไถลได้ 2 สภาวะ คือ แบบไถลแห้ง และแบบมีสารหล่อลื่น ลักษณะการใส่ชิ้นงานทดสอบจะถูกยึดด้วยน็อตและสกรู 4 ตัว เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเคลื่อนขณะทำการทดสอบ



ภาพที่ 5 ฐานยึดจับชิ้นงานบนจานหมุน

2. การทดสอบการสึกหรอแบบเส้นไถลของเหล็กกล้าไร้สนิม

การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบการสึกหรอ นำเหล็กกล้าไร้สนิมที่จำหน่ายในท้องตลาดทั่วไปที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร นำมาตัดให้มีขนาด 2.5×2.5 เซนติเมตร² ตามขนาดของฐานรองรับชิ้นงานที่ออกแบบ ดังภาพที่ 6(a) นำชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ถูกขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800 และ 1,000 ตามลำดับ และนำไปขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินา ขนาด 1 ไมโครเมตร ด้วยเครื่องขัดชิ้นงานยี่ห้อ Struers รุ่น Labopol-1 ประเทศ เดนมาร์ก จนไม่มีรอยขีดข่วนบนผิวชิ้นงานเมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังภาพที่ 6(b)



ภาพที่ 6 ลักษณะผิวชิ้นงาน (a) ก่อนขัดผิวชิ้นงาน และ (b) หลังขัดผิวชิ้นงาน

นำชิ้นงานที่ผ่านการเตรียมผิวใส่ในที่ยึดชิ้นงานและยึดด้วยน็อตให้แน่น ทำการปรับสมดุลแรงแกนกดก่อนการใส่ น้ำหนักนำหัวกดบอลทดสอบวางลงบนชิ้นงานที่ใส่น้ำหนักทดสอบลงบนแกนกด ที่มีรัศมีการหมุนเป็นวงกลมบนชิ้นงาน 6 มิลลิเมตรทดสอบด้วยความเร็ว 80 และ 160 รอบต่อนาที ที่น้ำหนักกด 200, 400 และ 600 กรัม ต่อระยะทดสอบ 600 เมตร ทำการบันทึกความกว้างของร่องการสึกหรอบนชิ้นงานทุก ๆ ระยะ 100 เมตร นำค่าความกว้างของร่องการสึกหรอมาคำนวณหาค่าปริมาตรที่หายไป (W) ตามสมการที่ 1

$$W = \pi(\text{รัศมีการเคลื่อนที่, มิลลิเมตร}) \times (\text{ความกว้างของร่องสึกหรอ, มิลลิเมตร})^3 / (6 \times (\text{รัศมีของหัวบอลทดสอบ, มิลลิเมตร})) \quad (1)$$

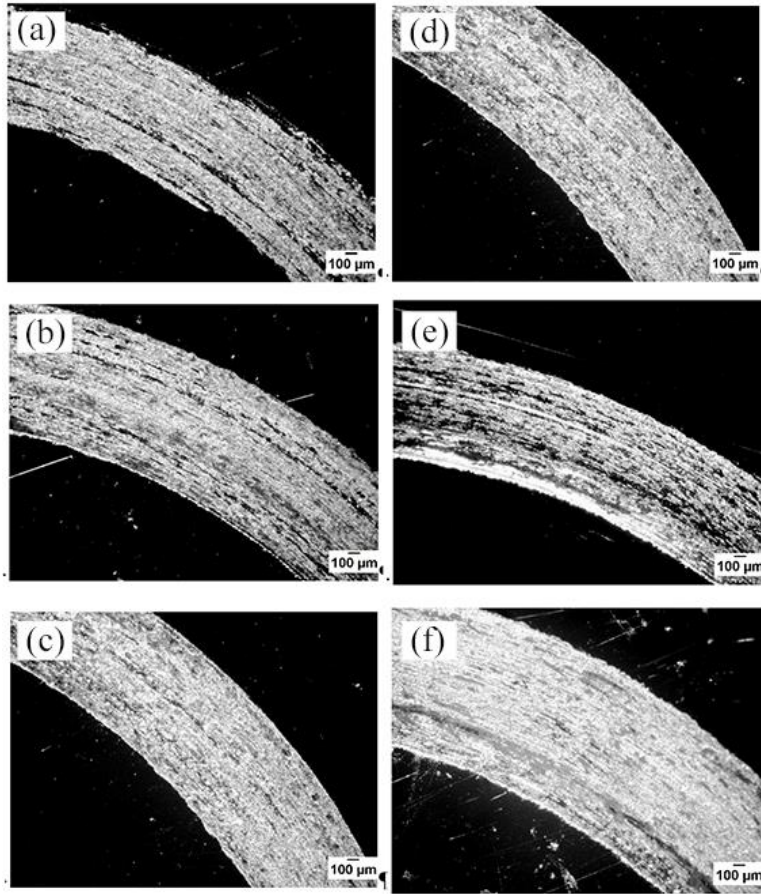
จากสมการที่ 1 นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างระยะทดสอบ (D หน่วย เมตร) กับปริมาตรที่หายไป (W หน่วย ลูกบาศก์เมตร) จะได้ค่าอัตราการสึกหรอ ดังนี้

$$\text{ความชันเส้นกราฟ} = \text{อัตราการสึกหรอ} = W/D \quad (2)$$

ทำการตรวจสอบร่องการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเทคนิคการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vicker microhardness) ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบความแข็งที่น้ำหนักกด 200 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที และใช้โปรแกรม ImageJ version 4 ทำการวัดความกว้างของร่องการสึกหรอจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง สรุปลงและวิเคราะห์ผล

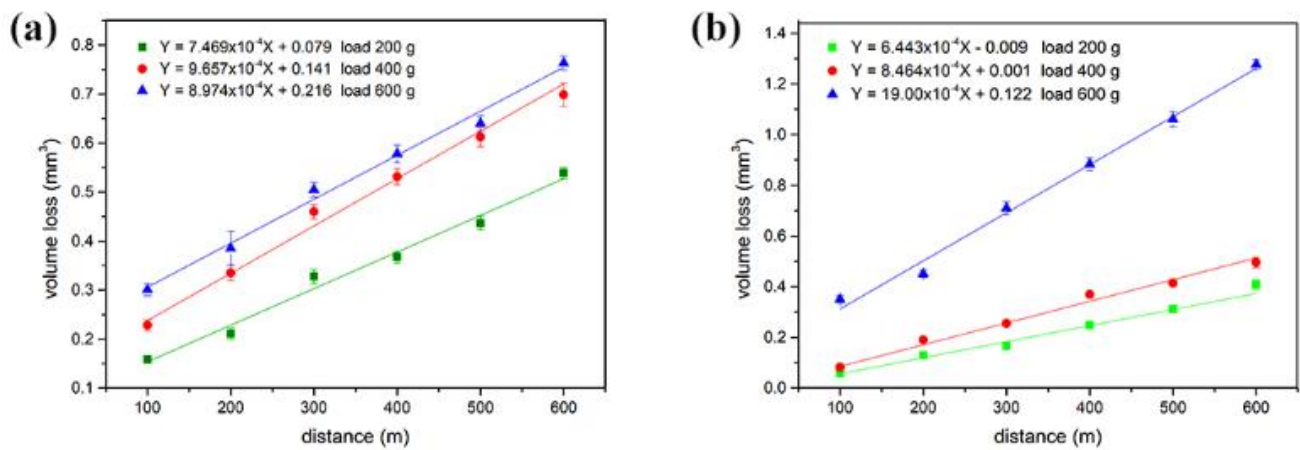
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการทดสอบค่าความแข็งของเหล็กกล้าไร้สนิมที่น้ำหนักกด 200 กรัม เป็นเวลา 15 วินาที พบว่าค่าความแข็ง HV_{200g} มีค่าเท่ากับ 155.15 ± 8.33 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร พิจารณาภาพที่ 7 ซึ่งงานที่ความเร็วรอบ 80 และ 160 รอบต่อนาทีที่น้ำหนักกด 200, 400 และ 600 กรัม ลักษณะความกว้างของร่องการสึกหรอ มีการขยายเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอทุก ๆ เงื่อนไขการทดสอบและมีปริมาตรที่หายไปในลักษณะเชิงเส้น ดังภาพที่ 8 ค่าอัตราการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกดที่ความเร็วรอบของทดสอบทั้งสอง จากลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ของปริมาตรและระยะทางทดสอบความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที (ภาพที่ 8 (a)) มีระยะห่างระหว่างเส้นกราฟประมาณ 1 เท่า ต่อการเพิ่มน้ำหนัก 200 กรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาตรที่หายไปทุก ๆ ระยะทดสอบ ค่าอัตราการสึกหรอที่น้ำหนักทดสอบ 400 กรัม มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 9.657×10^{-4} เมตรต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับระยะทดสอบ 600 เมตร ค่าทั้งสองนี้มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก สามารถอธิบายได้ว่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นของระยะทดสอบ 400-600 เมตร ดังตารางที่ 1 กลไกการสึกหรอในระยะดังกล่าว ปรากฏเป็นแบบไถลและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปถาวร ทำให้ผิวของร่องเรียบมีความขรุขระต่ำส่งผลให้เกิดลักษณะการไถลสิ้นส่งผลให้เกิดแรงเฉือนที่ผิวต่ำที่ระยะ 600 เมตร (Bayer, 2004) เมื่อเพิ่มความเร็วรอบเป็นสองเท่าจากเดิม คือ 160 รอบต่อนาที ค่าอัตราการสึกหรอที่น้ำหนักกด 200-400 กรัม (ดังภาพที่ 8(a) และ (b)) มีค่าน้อยกว่าความเร็ว 80 รอบต่อนาที ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับความกว้างของร่องการสึกหรอ ดังภาพที่ 8 ที่น้ำหนักกด 600 กรัม ค่าอัตราการสึกหรอมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเท่ากับ 19.000×10^{-4} เมตรต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร ร่องการสึกหรอมีความกว้างอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่น ๆ (ภาพที่ 7(f)) การเปลี่ยนแปลงรูปของวัสดุที่เกิดจากแรงเฉือนจากหัวกดที่กระทำกับชิ้นงานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวร อย่างไรก็ตาม อัตราการสึกหรอที่เพิ่มขึ้นทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอแตกต่างกัน เนื่องจากความเร็วรอบและน้ำหนักมากขึ้นส่งผลทำให้เกิดการสึกหรออย่างรุนแรงและรวดเร็วในชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม โดยปรากฏการหลุดออกของผิววัสดุ (pull out) ที่เกิดจากความล้า เนื่องจากการเกิดแรงกดกระทำซ้ำๆ และการสึกหรอที่เกิดจากกลไกการขัดถูเป็นผลจากเม็ดอนุภาคที่หลุดออกจากร่องการสึกหรอถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปตามร่องการสึกหรอส่งผลให้เนื้อวัสดุถูกเฉือนออกจากเพิ่มขึ้น (Stachowiak, 2005) ดังนั้น ความเร็วรอบ และน้ำหนักกดมีผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานในการทดสอบการสึกหรอในสภาวะไถลแห้ง



ภาพที่ 7 ลักษณะร่องการสึกหรอบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ระยะทดสอบ 600 เมตร ที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที น้ำหนักกด

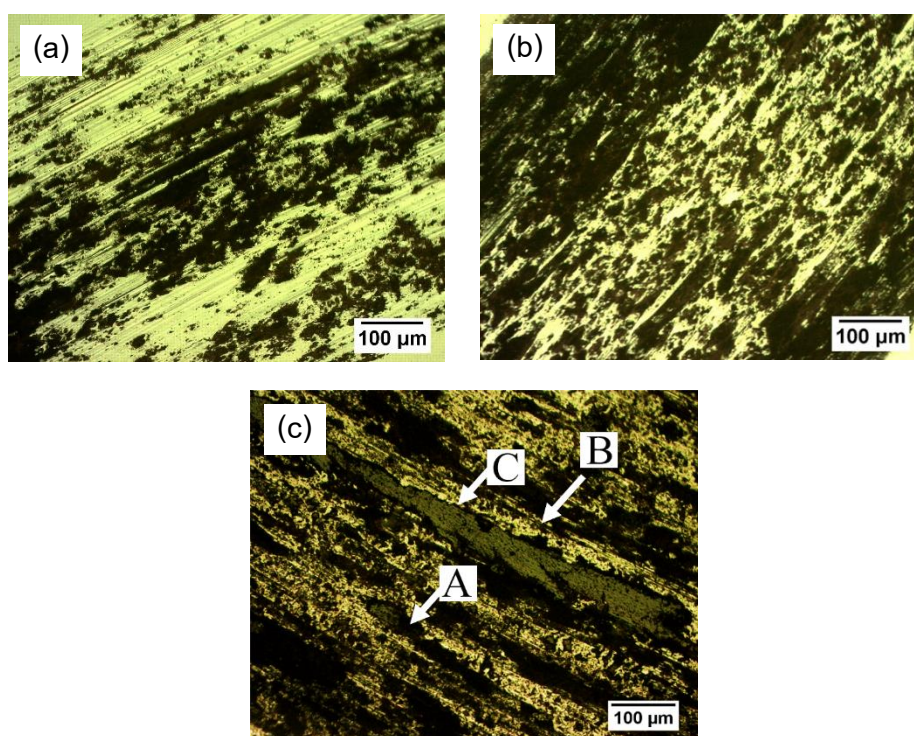
(a) 200 กรัม, (b) 400 กรัม, (c) 600 กรัม และที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที น้ำหนักกด (d) 200 กรัม, (e) 400 กรัม, (f) 600 กรัม



ภาพที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทดสอบกับปริมาตรที่หายไปบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกกดด้วยน้ำหนักกด 200, 400 และ 600 กรัม ความเร็ว (a) 80 รอบต่อนาที และ (b) 160 รอบต่อนาที

ตารางที่ 1 อัตราการสึกหรอแบบเส้นไถของเหล็กกล้าไร้สนิมที่น้ำหนักกดและความเร็วรอบที่ต่างกัน ที่ระยะทดสอบ 600 m

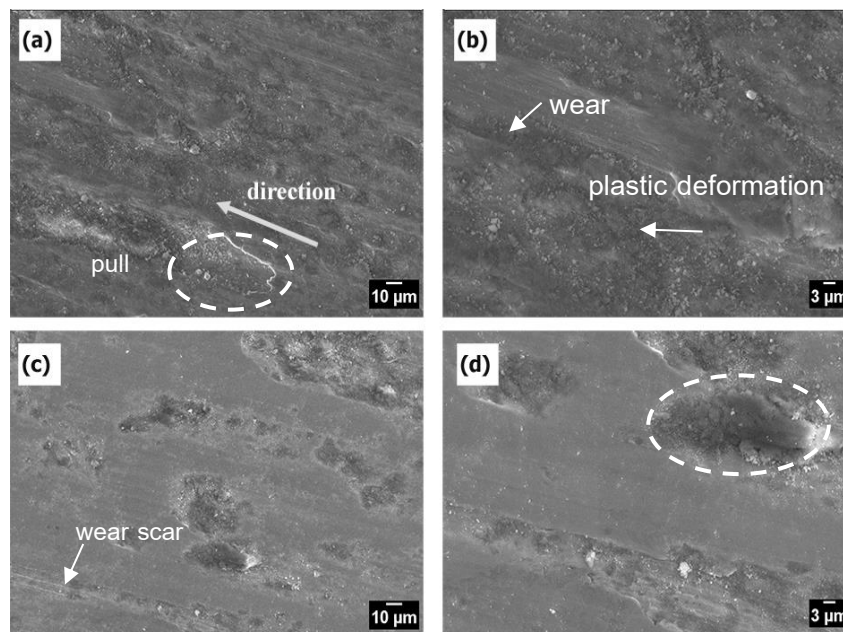
น้ำหนักกด (กรัม)	อัตราการสึกหรอ ($\times 10^{-4}$ เมตร/ลูกบาศก์มิลลิเมตร)	
	80 รอบต่อนาที	160 รอบต่อนาที
200	7.469	6.443
400	9.657	8.464
600	8.974	19.000



ภาพที่ 9 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงลักษณะร่องการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมที่เงื่อนไขน้ำหนักกด (a) 200 กรัม (b) 400 กรัม และ (c) 600 กรัม ที่ความเร็วรอบ 160 รอบต่อนาที ที่ระยะทดสอบ 600 เมตร

ลักษณะพื้นผิวชิ้นงานที่ถูกทดสอบการสึกหรอแบบแห้งด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที ชิ้นงานทดสอบที่น้ำหนักกด 200 กรัม (ภาพที่ 9 (a)) พื้นผิวของร่องการสึกหรอมีความเรียบและรอยขรุขระ และพื้นผิวของร่องการสึกหรอที่น้ำหนักกด 400 กรัม (ภาพที่ 9 (b)) พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเป็นร่องหลุมสีดำและเกิดการเปลี่ยนรูปของวัสดุเมื่อเพิ่มน้ำหนักกด 600 กรัม (ภาพที่ 9 (c)) พบว่าร่องหลุมสีดำมีความกว้างและมีรอยขูดมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่หลุดออกบนผิวร่องการสึกหรอมีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้เกิดกระบวนการขัดถูบริเวณผิวชิ้นงานอย่างรุนแรง ซึ่งสอดคล้องกับผลการสึกหรอ ดังตารางที่ 1 และขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอ ดังภาพที่ 7(f) และ ภาพที่ 9(c)

ชิ้นงานจะรับแรงกดของหัวบอลทดสอบที่มีน้ำหนักกดบริเวณผิวหน้าชิ้นงานที่สัมผัสจะเกิดแรงดันสูง (แรงที่กระทำต่อหน้าผิวสัมผัส ณ จุดนั้น ๆ) เมื่อมีการเคลื่อนที่บริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงานจะเกิดแรงเฉือนที่ขนานกับการเคลื่อนที่และเกิดแรงกดของหัวกดกระทำต่อชิ้นงานในเวลาเดียวกัน ลักษณะพื้นผิวของร่องการสึกหรอจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวร (plastic deformation) (Dejang, *et. al.*, 2010; Dalmau *et. al.*, 2018) ลักษณะดังกล่าวแรงเฉือนมีผลต่อการเปลี่ยนรูปและทำให้เกิดการสึกหรอ (ดังภาพที่ 9(a)) ทำให้ผิวหน้าชิ้นงานเกิดการขูดและเฉือนผิวหน้าวัสดุ เนื้อวัสดุที่ถูกขูดเฉือนและเฉือนจะเกิดการหลุดออกจากพื้นผิวชิ้นงานและถูกผลักให้เคลื่อนที่ตามทิศการเคลื่อนที่ของหัวกด ทำให้อนุภาคดังกล่าวไปกระทำต่อผิววัสดุทำให้เกิดรอยขีดเป็นร่อง เรียกว่า Wear scar (Bayer, 2004) พิจารณาภาพที่ 9(c) ตำแหน่ง B ที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่ปรากฏบนร่องการสึกหรอและถูกผลักให้ไหลบนผิวชิ้นงาน อนุภาคดังกล่าวเป็นอนุภาคของผิวชิ้นงานที่หลุดออกมาเนื่องจากแรงเฉือนที่กระทำซ้ำ ๆ วนที่ชิ้นงานหมุนจะเกิดการกระทำซ้ำ ๆ ที่ตำแหน่งเดิมทำให้เกิดความล้าบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงานกับหัวกด ส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรโดยสะสมความเค้นและความเครียดเพิ่มขึ้นจนเกินจุดความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) (Cardarelli, 2008) ทำให้บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ และหลุดออกเป็นเศษการสึกหรอ สอดคล้องกับตำแหน่ง A มีลักษณะเป็นหลุมจึงสันนิษฐานว่าเกิดจากกลไกที่กล่าวมาข้างต้น และเมื่อพิจารณาจากลักษณะร่องการสึกหรอที่ปรากฏหลังรอยที่เกิดขึ้นของตำแหน่ง A มีลักษณะเป็นรอยขูดไหลแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของหัวกด จึงสันนิษฐานว่าเศษการสึกหรอที่หลุดออกไปขูดผิวของชิ้นงานเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสึกหรออย่างรุนแรง สอดคล้องกับตำแหน่ง C กลไกที่เกิดขึ้นลักษณะนี้เมื่อกระทำซ้ำ ๆ เป็นเวลานานทำให้เกิดการสึกหรอที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้นและมีความกว้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 10 ลักษณะร่องการสึกหรอที่น้ำหนักกด 600 กรัม ที่กำลังขยาย 200 และ 1000 เท่า ของชิ้นงานที่หมุนด้วยความเร็ว 80 รอบต่อนาที (a) และ (b) ความเร็ว 160 รอบต่อนาที (c) และ (d) ตามลำดับ

พิจารณาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ ภาพที่ 10 (a)-(b) การแผ่ออกของเนื้อวัสดุจะแผ่ออกไปตามทิศทางของการเคลื่อนที่มีอนุภาคขนาดเล็กอยู่ภายในร่องการสึกหรอ โดยร่องดังกล่าวเกิดจากพื้นผิวที่เปลี่ยนรูปแบบถาวรและถูกกระทำซ้ำ ๆ แล้วหลุดออก (pull out) บริเวณผิวการสึกหรอทั้งสองเงื่อนไขจะเกิดการสึกหรอแบบขีดยุติที่เกิดจากการเฉือนระดับไมโคร (microcutting) (Ludema, 1996; Stachowiak, 2005) ส่วนมากพบในผิววัสดุเหนียว เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานที่ความเร็ว 80 และ 160 รอบต่อนาทีพบว่าลักษณะพื้นผิวมีความแตกต่างกัน โดยที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที การลากหัวกดอย่างช้า ๆ ส่งผลทำให้ชิ้นงานได้รับแรงกดในแนวตั้งฉากต่อระยะเวลามากกว่าที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที ส่งผลทำให้เกิดการขีดยุติและถูกกระทำด้วยระยะเวลาอันทำให้เกิดการสะสมความร้อนและความล้าได้มากกว่าการเคลื่อนที่ด้วยรอบความเร็วสูง สามารถสังเกตได้จากความขรุขระที่ผิวของชิ้นงานที่ทดสอบด้วยความเร็วสูงมีลักษณะเรียบ นอกจากนี้การหมุนด้วยความเร็วรอบสูงแรงที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวหรือแรงกด มีค่าน้อยกว่า ทำให้การต้านทานการเคลื่อนที่มีค่าน้อยกว่า เมื่อหัวกดเคลื่อนที่ทำให้ผิวด้านบนของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรด้วยแรงเฉือนมากกว่าเงื่อนไขของความเร็ว 80 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม ความกว้างของร่องการสึกหรอที่น้ำหนักกด 600 กรัมที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที มีอัตราการสึกหรอที่สูง เนื่องจากเกิดการสึกหรออย่างรุนแรง (severe wear) และมีการเปลี่ยนรูปแบบถาวรที่ผิวของชิ้นงานเกิดการหลุดออกซึ่งเกิดจากความล้าของพื้นผิวที่ปรากฏรอยแตกของกลุ่มก้อนอนุภาค (Neale, et. al., 2000; Takadom, 2007; Novak et. al., 2014) ดังภาพที่ 10(d) เมื่อมีการกระทำของหัวกดซ้ำจุดเดิมทำให้ก้อนอนุภาคขนาดใหญ่ที่กำลังหลุดออกมาเกิดการแตกตัวกลายเป็นอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการถูกกระทำด้วยหัวกด อนุภาคขนาดใหญ่ที่หลุดออกมาจะไปขูดที่ผิวชิ้นงานทำให้เกิดร่องการสึกหรอที่มีขนาดใหญ่ ดังภาพที่ 10(a) ส่งผลทำให้กลไกการสึกหรอมีความรุนแรงมากขึ้นสอดคล้องกับค่าอัตราการสึกหรอ ดังตารางที่ 1 ค่าการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิม ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักทดสอบและความเร็วรอบที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการสึกหรออย่างชัดเจน

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองชุดทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disc สามารถทำการศึกษากลไกการสึกหรอได้ดี และลักษณะร่องการสึกหรอบนผิวชิ้นงานสอดคล้องกับกลไกการสึกหรอ ที่เกิดจากการกระทำภายใต้แรงกดและแรงเฉือนที่เกิดจากหัวกดกระทำกับผิวชิ้นงานและกระทำซ้ำ ๆ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุบริเวณดังกล่าว การทดสอบที่ความเร็ว 80 รอบต่อนาที การสึกหรอมีความรุนแรงน้อยกว่าที่ความเร็ว 160 รอบต่อนาที ดังนั้นความเร็วรอบของการทดสอบส่งผลต่อการสึกหรอของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ และสาขาวิชา เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ASTM G 99 – 04. (2014). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. USA: ASTM International.
- Bayer, R. G. (2004). *Mechanical wear fundamentals and testing* (2nd ed.). USA: Marcel Dekker Inc.
- Budinski, K. G. (2000). *Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing*. CRC Press Inc.
- Cardarelli, F. (2008). *Materials Handbook* (2nd ed.). London: Springer-Verlag.
- Dalmáu, A., Richard, C., Igual – Muñoz, A. (2018). Degradation mechanisms in martensitic stainless steels: wear, corrosion and tribocorrosion appraisal. *Tribology International*, 121, 167-179.
- Dejang, N., Watcharapasorn, A., Wirojupatump, S., Niranatump, P., Jiansirisomboon, S. (2010). Fabrication and properties of plasma-sprayed Al₂O₃/TiO₂ composite coatings: A role of nano-sized TiO₂ addition. *Surface and Coatings Technology*, 204, 1651-1657.
- Ludema, K.C. (1996). *Friction, wear, lubrication*. Florida: CRC Press Inc.
- Neale, M., Gee M, J. (2000). *Guide to Wear Problems and Testing for Industry*. New York: William Andrew Publishing.
- Novak, R., Polcar, T. (2014). Tribological analysis of thin films by pin-on-disc: Evaluation of friction and wear measurement uncertainty. *Tribology International*, 74, 154-163.
- Stachowiak, G. W. (2005). *Wear-materials, Mechanisms and particle*. UK: John Wiley&sons Ltd.
- Takadoun, J. (2007). *Materials and surface engineering in tribology*. USA: John Wiley & Sons Inc.
- Wahlström, J., Lyu, Y., Matjeka, V., Söderberg, A. (2017). A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions. *Wear*, 384–385, 124-130.