

พฤติกรรมการสึกหรอของผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ Wear Behavior of Titanium Nitride Thin Film Coatings

ศุภกัญญา ชันชัยภูมิ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

234 ถนนเลย-เชียงคาน อำเภอเมือง จังหวัดเลย 42000

โทร : 042-835232 E-mail : supakanya.kh@lru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของผิวเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ภายใต้การทดสอบการสึกหรอในสภาวะแบบแห้งตามมาตรฐาน ASTM G133-05 ในลักษณะการเคลื่อนที่แบบไป-กลับและรูปแบบผิวสัมผัสระหว่างกันเป็นแบบ flat-on-flat โดยใช้แท่งกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ซึ่งติดกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ที่มีขนาดความหยาบ 1000 กริท ไว้ที่ปลายแท่งกด ใช้ความเร็วรอบในการทดสอบ 200 และ 300 รอบต่อนาที และใช้น้ำหนักกด 5 และ 10 นิวตัน ทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัยคือความเร็วรอบและน้ำหนักกดมีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนอง น้ำหนักที่หายไป และปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยมีผลกระทบต่อน้ำหนักที่หายไปอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ .05 ส่วนการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมคือความเร็วรอบ 282.07 รอบต่อนาที น้ำหนักกด 8.32 นิวตัน และน้ำหนักที่หายไป 0.0144 กรัม ในส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคพบว่าพฤติกรรมการสึกหรอของชิ้นงานผิวเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์มีลักษณะกลไกการสึกหรอแบบยึดติด

คำสำคัญ : ผิวเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ ความต้านทานการสึกหรอแบบเคลื่อนที่ไป-กลับ

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

Abstract

This project aims to study the wear behavior of the titanium nitride thin (TiN) film coatings under the circumstance of the dry condition wear test. This work applies the wear test following ASTM G133-05 in the reciprocating wear resistance and the layer is a flat-on-flat type using the pin with a 10 millimeters diameter to press. At the end of the pin is attached with the wear flat made of silicon carbide abrasive paper Grit 1000. The speeds in this project are 200 and 300 rpm and the loads are 5 and 10 N. This study uses a central composite

design and a response surface methodology to find the optimization. The result shows that the main effect from the two factors (the speed and the load) indicates the statistically significant effects on the weight loss and the interaction between these two factors effects on the weight loss by statistically significant at the .05 level. The response surface methodology with the desirability function gives the optimization at 282.07 rpm with 8.32 N and the weight loss is 0.0144 grams. The study of the microstructural analysis suggested that the wear behavior of a coating material has an adhesive wear mechanism.

Keywords : Titanium coating, Reciprocating wear resistance, Central composite design, Response surface methodology

1. บทนำ

วัสดุเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายเพื่อยืดอายุการใช้งานของชิ้นงาน [1] การเคลือบผิว TiN ด้วยเทคโนโลยีฟิล์มบางจะทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการสึกหรอที่ดี [2] สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปกป้องผิวของเครื่องมือและอุปกรณ์ อาทิ ตลับลูกปืน กรรไกรผ่าตัด กลไกล้อคประตูด [3] ลักษณะการสึกหรอจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ กลไกการสึกหรอของวัสดุ วิธีการทดสอบและรูปแบบผิวสัมผัสระหว่างกัน [4] พฤติกรรมการสึกหรอของผิวเคลือบ TiN ถูกนำมาทดสอบโดยเครื่องทดสอบแบบมาตรฐาน อาทิ Pin-on-disc, Pin-on-flat, Pin-on-drum และ Ball-on-flat [5]

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central composite design: CCD) เป็นเทคนิคในการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology: RSM) ที่ได้รับความนิยมในการทำให้ผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล [6] อีกทั้งยังสามารถแก้ปัญหาในรูปแบบสมการถดถอย (Regression analysis) ที่พบว่ามีส่วนโค้งในพื้นผิวผลตอบสนอง โดยทั่วไปแล้วการ

ออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางจะประกอบด้วย 2^k แฟคตอเรียล (Factorial) จำนวนจุดที่ต้องทำการทดลองคือ 2^k จุด พร้อมด้วยจุดกึ่งกลางของแต่ละปัจจัย 4-6 จุด และรวมกับจุดในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (Star) จำนวน $2k$ จุด โดยที่ k หมายถึงจำนวนของปัจจัย [7] โดยผลตอบสนองจากการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) สามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้แบบจำลองผลผลิตและการผลิตและสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีทางสถิติ [8]

วิธีพื้นผิวผลตอบสนองเป็นเทคนิคที่ใช้ความรู้ด้านคณิตศาสตร์และสถิติในการสร้างรูปแบบสมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองและการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง [6] การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [9-11]

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของผิวเคลือบฟิล์มบาง TiN ภายใต้การทดสอบการสึกหรอแบบเคลื่อนที่ไป-กลับ (Reciprocating

wear resistance) ในสภาวะแบบแห้ง (Dry condition) ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

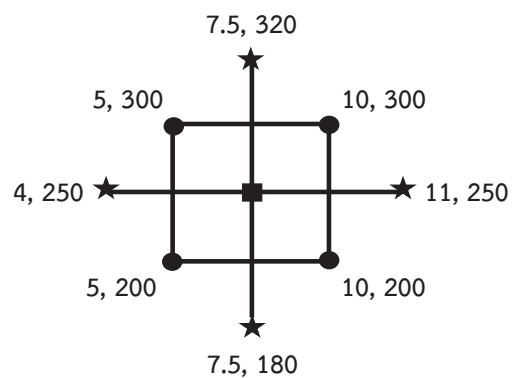
2. วิธีดำเนินการวิจัย

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 มีขนาดความกว้าง 1 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร และความหนา 0.3 เซนติเมตร องค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย เหล็ก (Fe) ร้อยละ 62.28 โครเมียม (Cr) ร้อยละ 21.99 นิกเกิล (Ni) ร้อยละ 6.91 และทองแดง (Cu) ร้อยละ 3.12 ทำการปรับปรุงคุณภาพผิวของชิ้นงานโดยการเคลือบผิวด้วย TiN มีความหนาของชั้นฟิล์ม 3 ไมครอน

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง มี 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ (Speed) ซึ่งมี 2 ระดับ คือ 200 และ 300 รอบต่อนาที และน้ำหนักกด (Load) ซึ่งมี 2 ระดับ คือ 5 และ 10 นิวตัน ผลตอบสนอง ได้แก่ น้ำหนักที่หายไป (Weight loss) ทั้งนี้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของข้อมูลด้วยกราฟแบบสองมิติ การวิเคราะห์พื้นผิว

ผลตอบสนองแบบสามมิติและการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design-Expert[®] V7 โดยปัจจัยและระดับของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 1 และรูปแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางแสดงดังรูปที่ 1

การทดสอบความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานผิวเคลือบ TiN ถูกทดสอบโดยเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเคลื่อนที่ไป-กลับในสภาวะแบบแห้ง รูปแบบผิวสัมผัสระหว่างกันเป็นแบบ Flat-on-flat ตามมาตรฐาน ASTM G133-05 แสดงดังรูปที่ 2

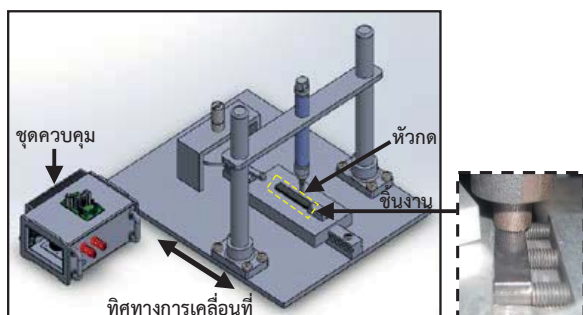


รูปที่ 1 รูปแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

Factor	Level				
	Star	Low	Center	High	Star
Coding	-1.414	-1	0	+1	+1.414
Speed	180	200	250	300	320
Load	4	5	7.5	10	11

ในงานวิจัยนี้แท่งกวดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ซึ่งติดกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ที่มีขนาดความหยาบ 1000 กริท (Grit#1000) ไว้ที่ปลายแท่งกวดโดยแท่งกวดจะถูกกดลงบนผิวชิ้นงานด้วยน้ำหนักกด เครื่องทดสอบมีความยาวช่วงระยะการเคลื่อนที่ (Stroke length) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร และในแต่ละการทดลองใช้ระยะเวลาในการทดสอบ 30 นาที หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอชิ้นงานถูกนำไปวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอเกี่ยวกับโครงสร้างวัสดุ ได้แก่ การวิเคราะห์รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM (Scanning electron microscope) และการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX (Energy dispersive X-ray spectrometer)



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการสึกหรอ

3. ผลการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของปัจจัยจำนวน 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ ซึ่งมี 2 ระดับ คือ 200 และ 300 รอบต่อนาที และน้ำหนักกด ซึ่งมี 2 ระดับ คือ 5 และ 10 นิวตัน ผลตอบสนอง

คือน้ำหนักที่หายไป โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

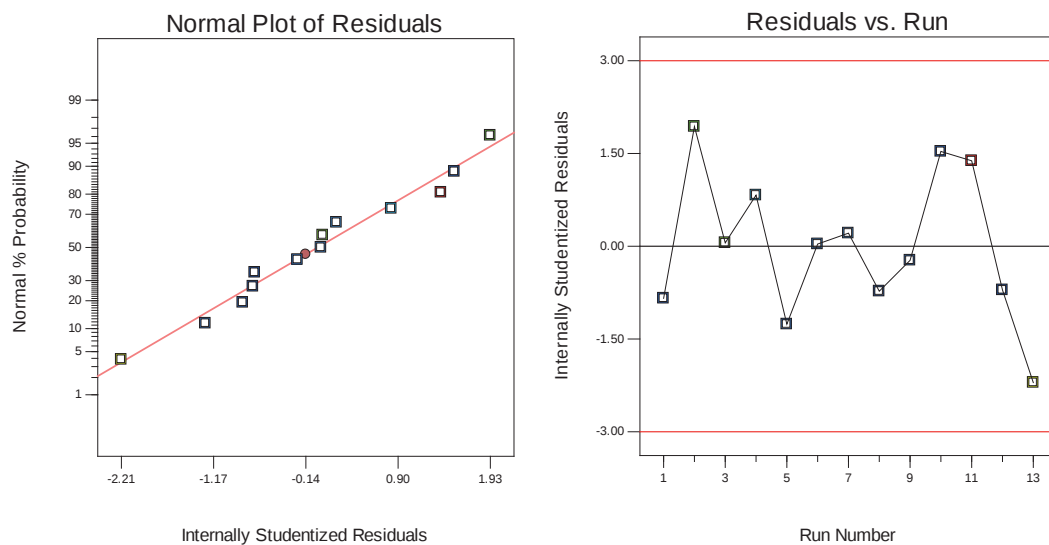
การทดสอบความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลองน้ำหนักที่หายไป แสดงดังรูปที่ 3 จากกราฟ Normal probability plot พบว่าข้อมูลมีการเรียงตัวในแนวเส้นตรง (Linear) หมายความว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) ในส่วนกราฟ Residuals versus run order พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ (Non-formal) หมายความว่าข้อมูลมีการสุ่มเก็บตามรูปแบบการทดลอง (Randomized) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมกับรูปแบบทางสถิติของแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลกระทบต่อการสึกหรออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ .05 สามารถวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าน้ำหนักที่หายไป จากตารางที่ 3 จะเห็นว่ารูปแบบทางสถิติของการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีความเหมาะสม (p -value < 0.05)

เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบ (A) และน้ำหนักกด (B) พบว่า ปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองน้ำหนักที่หายไป (p -value < 0.05) และเมื่อพิจารณาผลกระทบเนื่องจากปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย (AB) พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบและน้ำหนักกดมีผลกระทบต่อน้ำหนักที่หายไป (p -value < 0.05)

ตารางที่ 2 น้ำหนักที่หายไปของผิวเคลือบ TiN

No.	Run	Factor		Weight loss (g)
		Speed (rpm)	Load (N)	
1	7	50	4	0.0078
2	10	250	7.5	0.0080
3	9	250	7.5	0.0087
4	3	200	10	0.0151
5	13	250	7.5	0.0099
6	2	300	5	0.0087
7	4	300	10	0.0255
8	12	250	7.5	0.0090
9	1	200	5	0.0064
10	5	180	7.5	0.0078
11	8	250	11	0.0200
12	11	250	7.5	0.0092
13	6	320	7.5	0.0180



รูปที่ 3 การทดสอบความเพียงพอของรูปแบบทางสถิติของแผนการทดลองน้ำหนักที่หายไป

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าน้ำหนักที่หายไป

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	4.059×10^{-4}	5	8.118×10^{-5}	50.04	< 0.0001
A-speed	9.197×10^{-5}	1	9.197×10^{-5}	56.69	0.0001
B-load	2.285×10^{-4}	1	2.285×10^{-4}	140.84	< 0.0001
AB	1.640×10^{-5}	1	1.640×10^{-5}	10.11	0.0155
A ²	3.071×10^{-5}	1	3.071×10^{-5}	18.93	0.0033
B ²	4.707×10^{-5}	1	4.707×10^{-5}	29.02	0.0010
Residual	1.136×10^{-5}	7	1.622×10^{-6}		
Lack of Fit	9.424×10^{-6}	3	3.141×10^{-6}	6.50	0.0511
Pure Error	1.932×10^{-6}	4	4.830×10^{-7}		
Cor Total	4.173×10^{-4}	12			

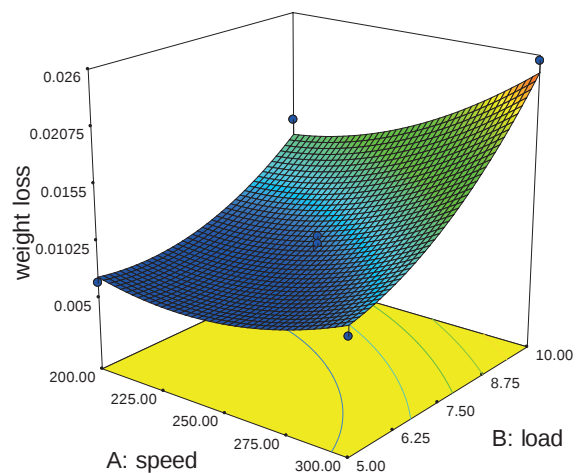
การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าน้ำหนักที่หายไป แสดงดังรูปที่ 4 เมื่อปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย คือความเร็วรอบและน้ำหนักกดมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้การสึกหรอสูงขึ้นตามไปด้วย [12-13] ในการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนองจะเป็นการดีที่ยังคงรูปแบบที่มีพจน์ทั้งหมดไว้ [6] ดังนั้นรูปแบบการถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุที่มี 2 ตัวแปร [7] แสดงดังสมการที่ (1)

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (1)$$

สมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง แสดงดังสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักที่หายไป} = & 8.960 \times 10^{-3} + 3.391 \times 10^{-3} A \\ & + 5.344 \times 10^{-3} B + 2.025 \times 10^{-3} AB \\ & + 2.101 \times 10^{-3} A^2 + 2.601 \times 10^{-3} B^2 \end{aligned} \quad (2)$$

การหาสถานะที่เหมาะสมโดยการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจ มีเป้าหมายคือต้องการให้ทั้งสองปัจจัย ได้แก่ ความเร็วรอบและน้ำหนักกดมีค่าสูงที่สุดที่ไม่ทำให้การสึกหรอเกินกว่าที่กำหนด ซึ่งจากการวิเคราะห์



รูปที่ 4 พื้นผิวผลตอบสนองของปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าน้ำหนักที่หายไป

พื้นผิวผลตอบสนองด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจให้ได้
สถานะที่เหมาะสมดังนี้ คือ ความเร็วรอบ 82.07 รอบ
ต่อนาที น้ำหนักกด 8.32 นิวตัน และน้ำหนักที่หายไป
0.0144 กรัม โดยมีความพึงพอใจโดยรวม 67.6%
แสดงดังในรูปที่ 5

Criteria

Solutions

Graphs

Solutions 1

Constraints

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
speed	maximize	200	300	1	1	3
load	maximize	5	10	1	1	3
weight loss	minimize	0.006	0.0255	1	1	3

Solutions

Number	speed	load	weight loss	Desirability	
1	<u>202.07</u>	<u>8.32</u>	<u>0.0144454</u>	<u>0.676</u>	<u>Selected</u>

1 Solutions found

Number of Starting Points: 30

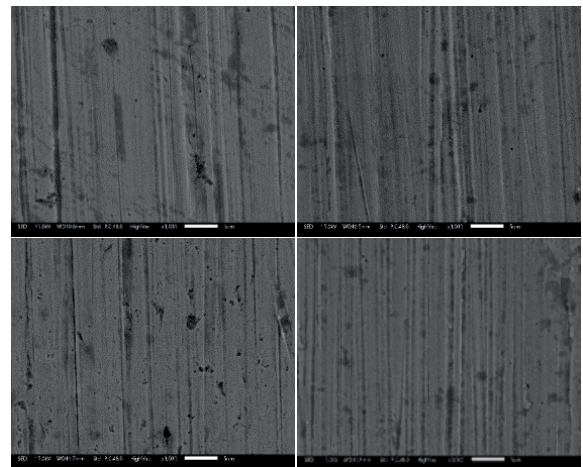
speed	load
293.060	6.181
253.530	7.419
212.020	6.035
212.860	9.021
300.010	8.090

รูปที่ 5 สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยโดยใช้โปรแกรม
สำเร็จรูป Design-Expert[®] V7

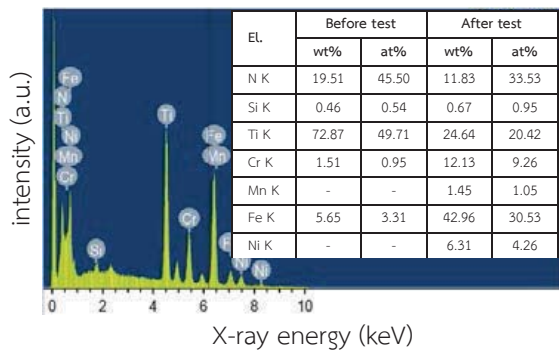
3.2 การวิเคราะห์ความต้านทานการสึกหรอ

รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM แสดงดัง
รูปที่ 6 หลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ
เคลื่อนที่ไป-กลับในสถานะแบบแห้งพบว่าผิวเคลือบ
TiN มีลักษณะเป็นร่องในแนวนานานกัน รอยสึกหรอ
เกิดขึ้นตามแนวการเคลื่อนที่ของแท่งกดและมีหลุม
เล็กๆ กระจายอยู่ตามแนวร่องซึ่งพื้นผิวความขรุขระ
และกลไกการสึกหรอของผิวเคลือบ TiN ขึ้นอยู่กับค่า
ความเสียดทานที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อน้ำหนักกด
และความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้การสึกหรอที่เกิด
จากการขัดถูเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [10]

เมื่อนำชิ้นงานผิวเคลือบ TiN มาวิเคราะห์หา
องค์ประกอบของผิวเคลือบทั้งก่อนและหลังการ
ทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ 7
พบว่าหลังการทดสอบนั้นบริเวณผิวชิ้นงานมี Ti และ
N ลดลง ส่วน Si และ Fe เพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนการ
ทดสอบ ในส่วน Si ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Si
เป็นองค์ประกอบหนึ่งของแท่งกดซึ่งติดกระดาช
ทราย SiC ไว้ที่ปลายแท่งกด เมื่อแท่งกดถูกกดลงบน
ผิวชิ้นงานและเกิดการขัดถู จึงมีบางส่วนของแท่งกด
ยึดติดกับผิวชิ้นงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหลังการ
ทดสอบความต้านทานการสึกหรอส่งผลให้ผิวเคลือบ
TiN ได้หลุดออกไปบางส่วนจนถึงชั้นที่เหล็กกล้าไร้
สนิม และมีองค์ประกอบของแท่งกดยึดติดอยู่กับ
ผิวชิ้นงานด้วย



รูปที่ 6 รูปถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของ
ชิ้นงานผิวเคลือบ TiN หลังการทดสอบความ
ต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDX ของชิ้นงานผิวเคลือบ TiN ก่อนและหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ

4. การอภิปรายและวิจารณ์

เมื่อแท่งกดถูกกดลงบนผิวชิ้นงานและเกิดการขัดถูในลักษณะการเคลื่อนที่แบบไป-กลับ ทำให้อนุภาคขนาดเล็กๆ ที่มีความแข็งน้อยกว่ายึดติดไปกับผิวชิ้นงานที่มีความแข็งมากกว่าและเมื่อมีการสัมผัสกันเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในบริเวณที่สัมผัสกันนั้นเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและทำให้ผิวบางส่วนหลุดออกมา เมื่อผิวของชิ้นงานหลุดออกไปจะเกิดการสัมผัสกับผิวใหม่ของชิ้นงานหากการสัมผัสกันยังคงดำเนินต่อไปส่งผลทำให้การสึกหรอเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ กลไกการสึกหรอนี้ จะขึ้นอยู่กับแรงยึดติดระหว่างผิวของชิ้นงานที่มีความแข็งมากกว่ากับแท่งกดซึ่งติดกระดาดทราย SiC ไว้ที่ปลายแท่งกดที่มีความแข็งน้อยกว่า [14] พฤติกรรมการสึกหรอดังกล่าวเป็นการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)

ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอ มุ่งเน้นให้มีความสอดคล้องกับการใช้งานจริง [15] เมื่อต้องการให้ความเร็วรอบและน้ำหนักกดมีค่าสูงสุด โดยที่อัตราการสึกหรอต่ำสุดและไม่เกินค่าที่กำหนดเพื่อให้ผลผลิตของสายการผลิตและการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรในการผลิตสูงที่สุด

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาวัสดุเคลือบ TiN เนื่องจากเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมเพื่อปกป้องผิวของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้มีความต้านทานการสึกหรอ ซึ่งสามารถยืดอายุการใช้งานและเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามวัสดุเคลือบอื่นๆ อีก ที่น่าสนใจในการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อที่จะพัฒนาคุณสมบัติของผิวเคลือบให้ดียิ่งขึ้น

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของผิวเคลือบฟิล์มบาง TiN ภายใต้ การทดสอบการสึกหรอแบบเคลื่อนที่ไป-กลับ ในสภาวะแบบแห้ง ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางเพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัย (ความเร็วรอบและน้ำหนักกด) ที่มีผลต่อน้ำหนักที่หายไปและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจเพื่อหาสภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด จากผลการทดลองสรุปได้ว่า

การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อค่าผลตอบสนองและปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัยมีผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ .05

การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสม คือความเร็วรอบ 282.07 รอบต่อนาที น้ำหนักกด 8.32 นิวตัน และน้ำหนักที่หายไป 0.0144 กรัม โดยมีความพึงพอใจโดยรวม 67.6%

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคพบว่าชิ้นงานผิวเคลือบ TiN มีกลไกการสึกหรอแบบยึดติดและมีพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้น ซ้ำไปซ้ำมาคือขั้นแรกคือเกิดการยึดติดของวัสดุที่อ่อนกว่า (แท่งกด

ซึ่งติดกระดาดทราย SiC ไว้ที่ปลายแท่งกด) กับผิวของวัสดุที่แข็งกว่า (ชิ้นงานผิวเคลือบ TiN) และชั้นที่สองคือผิวของวัสดุที่แข็งกว่าหลุดออกมา

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Cheng YH, Tay BK. Development of texture in TiN films deposited by filtered cathodic vacuum arc. *J Cryst Growth* 2003; 252: 257-64.
- [2] Costa MYP, Cioffi MOH, Voorwald HJC, et al. An Investigation on sliding wear behavior of PVD coatings. *Tribol Int* 2010; 43: 2196-202.
- [3] Vettivel SC, Jegan R, Vignesh J, et al. Surface characteristics and wear depth profile of the TiN, TiAlN and AlCrN coated stainless steel in dry sliding wear condition. *Surf Interf* 2017; 6: 1-10.
- [4] Rabinowicz E. Friction and wear of materials. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1995.
- [5] Kennedy DM, Hashmi MSJ. Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials. *J Mater Process Tech* 1998; 77: 246-53.
- [6] Myer RH, Montgomery DC. Response surface methodology: Process and product optimization using Designed Experiments. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2002.
- [7] ชาญณรงค์ สายแก้ว. สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. ขอนแก่น: หน่วยสารบรรณงานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2557.
- [8] Saikaew C, Wisitsoraat A, Sootticoon R. Optimization of carbon doped molybdenum oxide thin film coating process using designed experiments. *Surf Coat Tech* 2010; 204: 1493-502.
- [9] El-Tayeb NSM, Yap TC, Venkatesh VC, et al. Modeling of cryogenic frictional behavior of titanium alloys using response surface methodology approach. *Mater Des* 2009; 30: 4023-34.
- [10] Saravanan I, Perumal AE, Vettivel SC, et al. Optimizing wear behavior of TiN coated SS 316L against Ti alloy using Response Surface Methodology. *Mater Des* 2015; 67: 469-82.
- [11] Suresh S, Moorthi NSV, Vettivel SC, et al. Mechanical behavior and wear prediction of stir cast Al-TiB₂ composites using response surface methodology. *Mater Des* 2014; 59: 383-96.
- [12] Bonny K, De Baets P, Perez Y, et al. Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact. *Wear* 2010; 268: 1504-17.

- [13] Rajeev VR, Dwivedi DK, Jain SC. Effect of load and reciprocating velocity on the transition from mild to severe wear behavior of Al-Si-SiCp composites in reciprocating conditions. *Mater Des* 2010; 31: 4951-59.
- [14] Yu L, Bahadur S. An investigation of the transfer film characteristics and the tribological behaviors of polyphenylene sulfide composites in sliding against tool steel. *Wear* 1998; 214: 245-51.
- [15] Srisattayakul P, Saikaew C, Wisitsoraat A, et al. Reciprocating two-body abrasive wear behavior of DC magnetron sputtered Mo-based coatings on hard-chrome plated AISI 316 stainless steel. *Wear* 2017; 378-79: 96-105.