

## ปัจจัยผลกระทบสารเคลือบผิวที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ในกระบวนการตัดขึ้นรูปแบบไฮบริดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### IMPACT FACTORS OF COATINGS AFFECTING TOOL LIFE IN HYBRID BENDING PROCESS WITH FINITE ELEMENT METHOD

ไพรัตน์ พลบุตร<sup>1</sup>, สุเทพ เยี่ยมชัยภูมิ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Pairat Pholbut<sup>1</sup>, Suthep Yiemchaiyaphum<sup>2</sup>

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamungla of Technology Krungthep University

Email: Suthep.y@mail.rmutk.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยของสารเคลือบผิวที่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ในกระบวนการตัดขึ้นรูปแบบไฮบริดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้สมมติฐานที่ว่า นอกจากความแข็งของผิวแล้ว สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสารหล่อลื่นยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปัจจัยของสารเคลือบผิวที่ส่งผลกระทบของสารเคลือบผิว 3 ชนิดได้แก่ TiN, TiCN, และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ความหนาสารเคลือบผิว 7 ระดับ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร และช่องว่างแม่พิมพ์ 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 และ 2.7 มิลลิเมตร ตามลำดับ เปรียบเทียบระหว่างการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลอง ผลลัพธ์การจำลองพบว่า สารเคลือบผิวทั้ง 3 ชนิด สามารถช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและการหล่อลื่นได้ดี คือ TiCN, TiN และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เรียงตามลำดับ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าการกระจายตัวความเค้นประสิทธิผลของชิ้นงานที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งบริเวณรัศมีปากตายของแม่พิมพ์ เมื่อการกระจายตัวความเค้นประสิทธิผลลดลงแสดงให้เห็นว่าอายุการใช้งานแม่พิมพ์จะเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเทคนิคดังกล่าวยังสามารถแสดงค่าในรูปแบบสมการตามวิธีเชิงตัวเลข กล่าวคือ สารเคลือบทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะของกราฟสมการอายุการใช้งานที่คล้ายกันดังนี้คือชั้นความหนาสารเคลือบบางจะทำให้อายุการใช้งานต่ำ เมื่อชั้นความหนาสารเคลือบหนา 4 ไมโครเมตร อายุการใช้งานจะสูงที่สุดในทางตรงข้ามเมื่อชั้นความหนาสารเคลือบหนามากกว่า 4 ไมโครเมตร อายุการใช้งานกลับมีค่าลดลงตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันช่องว่างแม่พิมพ์ที่แคบจะทำให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์ต่ำกว่าช่องว่างแม่พิมพ์ที่กว้าง จากผลการจำลองและการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยมีความนัยสำคัญที่ 0.05 ที่ค่าความเชื่อมั่นเชิงสถิติ 95 เปอร์เซ็นต์ และมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต

**คำสำคัญ:** การตัดแบบไฮบริด การยึดขึ้นรูป อายุการใช้งานแม่พิมพ์ การจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

#### Abstract

The objective of this research is to study the impact factor coating surface of tool life in hybrid bending process using FE simulation base on assuming moreover of the surface hardness effect to the tool life, the friction coefficient and lubricant that effect to the tool life too. Therefore, this research is to study the effect of 3 type of coating surface are TiN, TiCN and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; with 7 levels of thickness at 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, and 7.0  $\mu\text{m}$  and clearance 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, and 2.7 mm respectively. Compare with the finite element simulation and experiment, the results from finite element found that the coating surface can reduce friction coefficient and lubrication are TiCN, TiN, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in order. It can discuss by the effective stress concentration on die radius, as the effective stress concentration decrease, tool life

was increase. Vice versa, the technique can also express in numerical method, all three coatings have similar characteristics of graphs of tool life equation is as follows: the thickness of coating layer is thin tool life was low, when the coating thickness is 4  $\mu\text{m}$ , the tool life was high. In the other hand, as the coating layer more than 4  $\mu\text{m}$ , tool life was decrease respectively. Meanwhile, a narrow clearance leads to lower tool life than a higher clearance. The results of finite element simulation and experiments were consistent. It was significant 0.05 at 95% confidence, and consistent with the past research.

**Keywords:** Hybrid bending, Stretch forming, Tool life, FEM Simulation

## บทนำ

ไฮบริดเบนดิง (Hybrid Bending) ในงานวิจัยนี้หมายถึงการดัดขึ้นรูปสองกระบวนการพร้อมกัน คือ กระบวนการเบนดิงและกระบวนการยืดขึ้นรูป ปัญหาของทั้งสองกระบวนการเมื่อนำชิ้นงานมาขึ้นรูปพร้อมกันที่ตำแหน่งเดียวกันและระยะห่างระหว่างกระบวนการทั้งสองแคบมากจะส่งผลให้รัศมีปากตายเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็วเป็นผลให้เกิดรอยตำหนิและรอยแผลเป็นบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงาน (Vafaesefat and Khanahmadlu, 2009) ในขณะเดียวกันยังเป็นเหตุให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์สั้นลงแบบผิดปกติ เมื่อแก้ปัญหาโดยการเพิ่มความแข็งของแม่พิมพ์มากขึ้นในทางกลับกันเป็นเหตุให้แม่พิมพ์เกิดการแตกหักและเกิดการแตกร้าวนเป็นผลให้อายุการใช้งานแม่พิมพ์สั้นลงเช่นเดียวกัน (A. Vafaesefat and M. Khanahmadlu, 2009; Gang Cheng, Shiao Zhang, Xiuqing Ma. and Yunjiang Li., 2015; Drăghici C. and Mihăilă F., 2015 )

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้แก้ปัญหาการแตกหักและการแตกร้าวนโดยใช้วัสดุที่มีความเหนียวมากกว่าวัสดุอื่นในกลุ่มเดียวกันในขณะเดียวกันยังลดอุณหภูมิที่ตกค้างให้มากที่สุด (Drăghici C. and Mihăilă F., 2015; Drăghici C., 2015 ) ทำโครงสร้างมาเทนไซร์ที่หยาบให้เป็นโครงสร้างมาเทนไซร์ละเอียดมากขึ้นพร้อมกันนั้นยังลดค่าความแข็งลงเพื่อให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นโดยกำหนดค่าความแข็งไม่เกิน 60 HRC (Drăghici C., 2015; Drăghici C., 2017 ; Anderson A., 1995 ) ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่พอเพียงต่อการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ด้วยเหตุดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาร่วมกันโดยวิธีการใช้หล่อลื่นด้วยสารหล่อลื่นชนิดแข็งอีกหนึ่งทางเลือก ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวตั้งอยู่บนสมมติฐาน โดยวิธีเคลือบสารลงบนพันธ-ตาย ด้วยชนิดสารเคลือบผิว TiN, TiCN และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นวัสดุสารเคลือบผิว (Antonio Augusto Gorni, Socorro SP., 2016; Bay, N., Olsson, D.D., Andreassen, J.L. 2008; Bay, N., Azushima, A., Groche, P., Ishibashi, I., Merklein, M., Morishita, M., Nakamura, T., Schmid, S., Yoshida, M. 2010; Bouzakis, K.-D., Michailidis, N., Bouzakis, E., Katirtzoglou, G., Makrimalakis, S., Gerardis, S., Pappa, M., Klocke, F., Schalaster, R., Gorgels, C. 2011 ; ASTM G133-95) อย่างไรก็ตามสารเคลือบดังกล่าวจะต้านทานการสึกหรอได้ดีจำเป็นต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการยึดเกาะบนพันธ-ตาย ในขณะที่มีการขึ้นรูปในทุกระยะทางของการเคลื่อนที่พันธ ดังนั้นจึงได้ศึกษาปัจจัยผลกระทบของสารเคลือบผิว TiN, TiCN และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์ในกระบวนการไฮบริดเบนดิง รวมถึงปัจจัยความหนาชั้นเคลือบผิวและปัจจัยช่องว่างระหว่างพันธ-ตาย เป็นต้น (Cao C., Zhang X., Wang H., 2012; Ivana Suchy; A.W.Hudgins, D.K. Matlock and J.G. Speer, 2009).

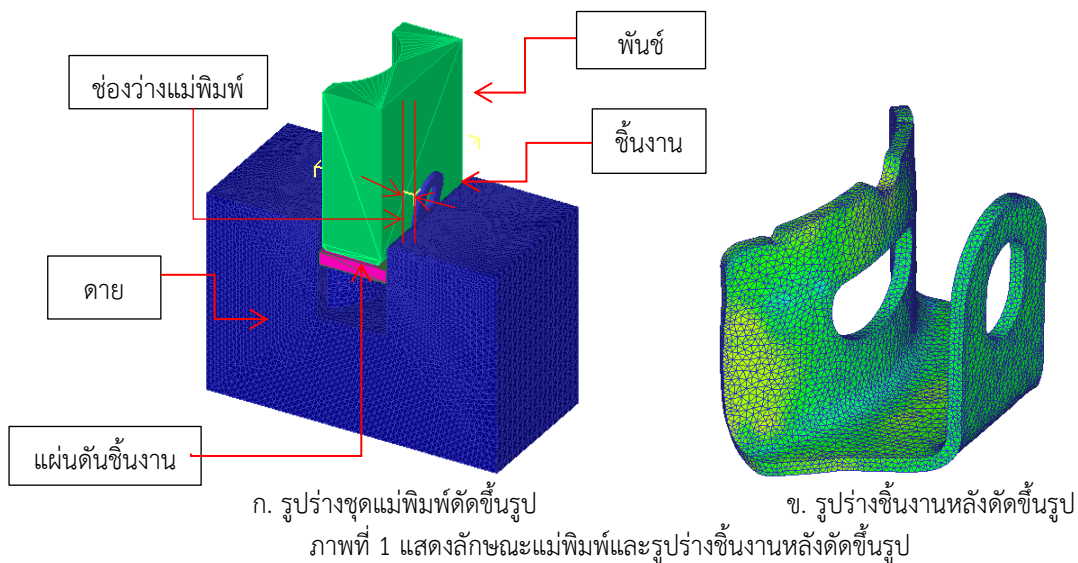
## ระเบียบการวิจัย

เงื่อนไขการทดลองและการจำลอง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการจำลองเพื่อเสนอแนวทางการวิเคราะห์แก้ปัญหาในแง่มุมการออกแบบแม่พิมพ์ ลดการลองผิดลองถูกในการออกแบบแม่พิมพ์และลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตามการจำลองจะได้คำตอบผลเฉลยแม่นยำจำเป็นต้องมีข้อมูลเบื้องต้นของสมบัติวัสดุ และข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานกับวัสดุสารเคลือบ วัสดุทำแม่พิมพ์และอื่นอีกมาก [17,18,19,20] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการจำลองอื่นๆ

ชนิดของสมบัติวัสดุ	ชิ้นงาน : ยึดหยุ่น-พลาสติก, พันธ์/ตาย:แข็งเกร็ง
วัสดุที่ใช้ในการวิจัย	SUS 420 (ความหนา 2.0 mm) ( $\sigma_u = 419MPa, \lambda = 43%$ )
โมดูลัสยึดหยุ่น (MPa)	206754 MPa
อัตราส่วนปัวซอง	0.30
สมการการไหล	$\bar{\sigma} = 633\bar{\epsilon}^{0.596} + 256$
ช่องว่างแม่พิมพ์ (Cl <sub>b</sub> )	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 และ 2.7 mm
รัศมีพันธ์-ตาย	รัศมีปลายพันธ์ (R <sub>p</sub> ) = 4.0 mm และรัศมีปากตาย (R <sub>d</sub> ) = 40.0 mm
สมการการแตกหัก	Normalized Cockcroft & Latham
ค่าการแตกหักวิกฤต (C)	TiN=0.09, TiCN=0.08, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.14
สัมประสิทธิ์ความเสียหาย (μ)	TiN=0.064, TiCN=0.048, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.097
ค่าความแข็งผิวเคลือบ (HV)	TiN=450, TiCN=480, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =245
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	TiN=5.42, TiCN=4.78, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =3.25
ปริมาตรโมล (cm <sup>3</sup> /mol)	TiN=11.44, TiCN=12.24, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =12.51
อัตราการสึกหรอ (10 <sup>-6</sup> mm <sup>2</sup> /N.m)	TiN=0.32, TiCN=0.25, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0.85



เงื่อนไขก่อนการประมวลผล

เงื่อนไขข้อมูลก่อนการประมวลผลที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้ กำหนดพฤติกรรมสมบัติวัสดุชิ้นงานเป็นแบบอีลาสติก-พลาสติก พันธ์-ตายเป็นแบบอีลาสติกบริเวณผิวด้านนอกเคลือบผิวด้วยสารเคลือบชนิดต่างๆตามเงื่อนไขการทดลองและการจำลองนี้กำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างคู่สัมผัสของวัสดุชิ้นงานกับตายเป็นแบบ Shear friction ดังสมการที่ 1 ส่วนสมการการสึกหรอใช้การสึกหรอแบบจุดขีดโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยแรงดันความเร็วและความแข็งของ ค่าความแข็งของวัสดุทำพิมพ์ (Die Material) แบบสมการ Polynomials ตามสมมติฐานของ Archad ดังสมการที่ 2 ในทำนองเดียวกันสมบัติด้านอื่นๆ ดังตารางที่ 1 ดังนี้

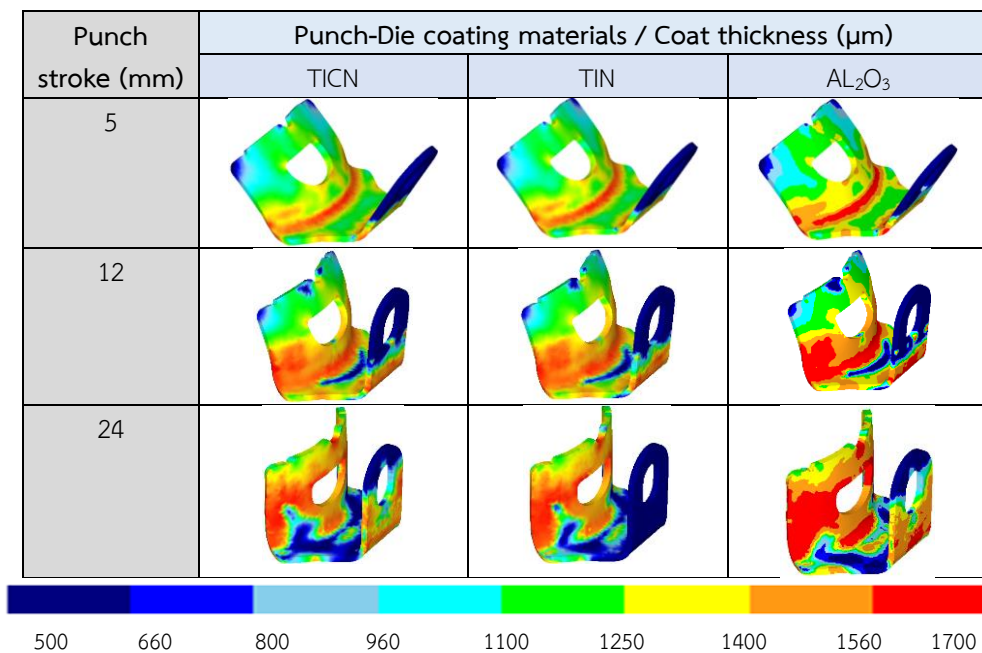
$$\tau_R = m \cdot k \text{ with } k = \frac{k_f}{\sqrt{3}} \tag{1}$$

$$w = \int_0^t 0.000002 \frac{P^a V^b}{H^c} dt \tag{2}$$

เมื่อ P = ความดันผิวสัมผัส V = ความเร็ว H = ความแข็งแม่พิมพ์; t = เวลา; a, b, c, K = สัมประสิทธิ์การทดสอบการสึกหรอ; (ค่าโดยทั่วไป a และ b = 1, c = 2)

เงื่อนไขหลังการประมวลผล

ในงานวิจัยนี้ได้ประมวลผลการจำลองโดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายตัวของความเค้นประสิทธิผลสำหรับสารเคลือบผิวทั้ง 3 ชนิด ดังภาพที่ 2 โดยกำหนดระยะเคลื่อนที่พันทันซ์ 3 ตำแหน่ง คือ ที่ระยะเคลื่อนที่พันทันซ์ 5, 12 และ 24 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากผลลัพธ์การจำลอง พบว่า ที่ระยะเคลื่อนที่พันทันซ์ 5 มิลลิเมตร ค่าการกระจายความเค้นประสิทธิผลที่เกิดจากการเคลือบผิวตรงบริเวณปากตาย มีค่ามากขึ้นตามลำดับโดยเรียงจาก ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ไทเทเนียมไนไตรด์และอลูมิเนียมออกไซด์ ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเคลื่อนที่พันทันซ์เป็น 12 มิลลิเมตร ค่าการกระจายความเค้นประสิทธิผลตรงบริเวณปากตาย จะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเรียงตามลำดับจากไทเทเนียมคาร์ไบด์จนถึงอลูมิเนียมออกไซด์ หลังจากนั้นที่ตำแหน่งสุดท้ายที่ระยะเคลื่อนที่พันทันซ์ 24 มิลลิเมตร ยิ่งทำให้ค่าการกระจายความเค้นประสิทธิผลมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมอีกโดยเรียงตามลำดับจากไทเทเนียมคาร์ไบด์ ไทเทเนียมไนไตรด์และอลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งสาเหตุดังกล่าวเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของสารเคลือบทั้ง 3 ชนิดมีค่าความแตกต่างกันและเป็นเหตุให้เกิดค่าความตึงขึ้นงานหรือเกิดสภาวะการดึงยึดของวัสดุชิ้นงานบริเวณปากตายแตกต่างกัน เป็นต้น

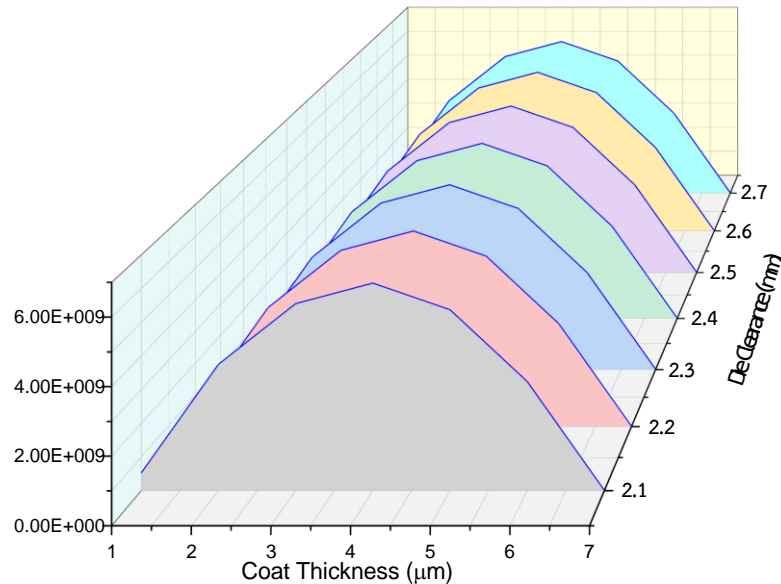


ภาพที่ 2 แสดงการกระจายตัวของความเค้นประสิทธิผล

**ผลการดำเนินงาน**

อิทธิพลความหนาชั้นเคลือบผิวของไทเทเนียมคาร์ไบด์ ไทเทเนียมไนไตรด์ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของ วัสดุทำพิมพ์ (Die Material) ในการจำลองอิทธิพลของความหนาชั้นเคลือบผิวของไทเทเนียมคาร์ไบด์ ไทเทเนียมไนไตรด์ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของ Die Material ผู้วิจัยกำหนดเงื่อนไขการเคลือบผิวพันทันซ์ตายมีลักษณะชั้นๆเป็น 3 ชั้นตามสมมติฐานที่วางไว้โดยชั้นในสุดเป็นสารเคลือบ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ชั้นตรงกลางเคลือบด้วยสารเคลือบ TiN และสารเคลือบชั้นนอกสุดเป็นสารเคลือบ TiCN เนื่องจากผลลัพธ์การจำลองมีความซับซ้อนมากผู้วิจัยจึงนำผลลัพธ์การจำลองของชั้นความหนาสารเคลือบจากภายในสู่ภายนอกดังนี้ คือ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1 µm และ TiN = 1 µm ส่วนนอกสุดเป็นชั้นความหนาทุกๆชั้นความหนาสารเคลือบ TiCN เพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่ปรากฏขึ้นส่วนชั้นความหนาสารเคลือบอื่นๆไม่ได้ถูกละเว้นแต่จะนำมาอธิบายในรูปแบบการออกแบบการทดลองเชิงสถิติต่อไปจากเงื่อนไขการจำลองของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชั้นความหนาสารเคลือบกับช่องว่างแม่พิมพ์ส่งผลต่ออายุการ

ใช้งานของแม่พิมพ์ พบว่า ที่ระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์ 2.1 มิลลิเมตร ชั้นความหนาสารเคลือบผิวจาก 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 5.28E8, 3.75E9, 5.55E9, 6.16E9, 5.37E9, 3.24E9 และ 8.85E-4 ขึ้น ตามลำดับ



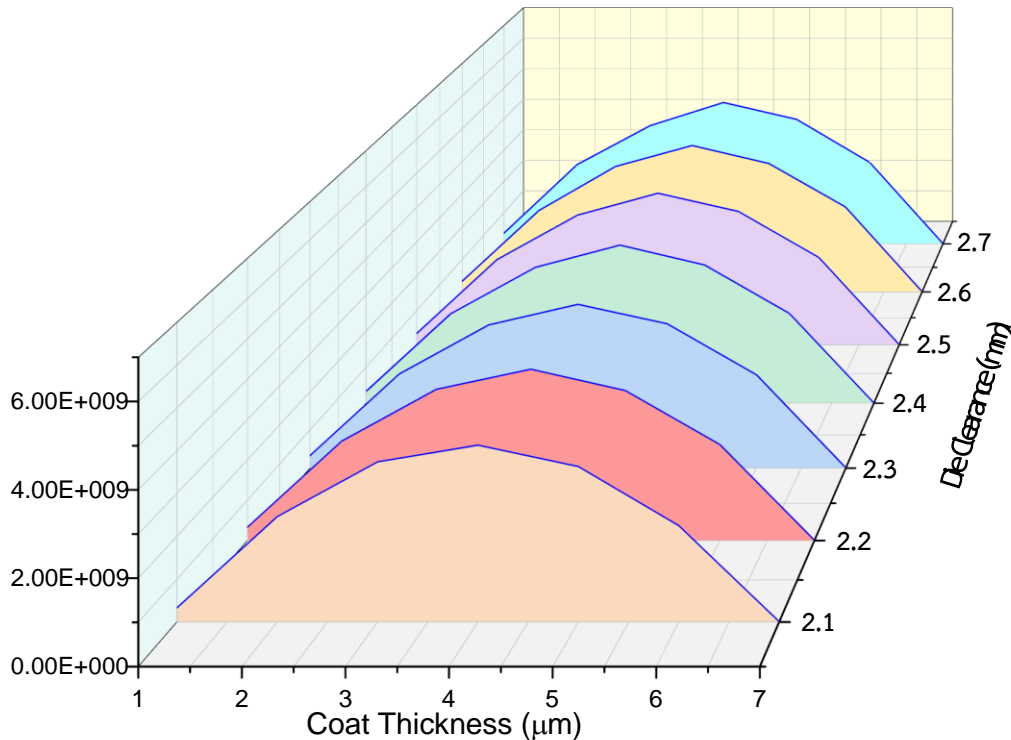
ภาพที่ 3 กราฟแสดงอายุการใช้งานสำหรับไทเทเนียมคาร์ไบด์

โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่ 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 6.16E9 ชิ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.2 มิลลิเมตร ชั้นความหนาสารเคลือบผิวจาก 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 5.281E8, 3.752E9, 5.553E9, 6.164E9, 5.373E9, 3.242E9 และ 8.77E-4 ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่ 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 6.164E9 ชิ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นอีกเป็น 2.3 มิลลิเมตร ชั้นความหนาสารเคลือบผิวจาก 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 5.282E8, 3.753E9, 5.554E9, 6.165E9, 5.374E9, 3.243E9, 8.69E-4 ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่ 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 6.165E9 ชิ้น ในทำนองเดียวกันที่ช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร โดยกำหนดเงื่อนไขระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์เรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามากเหมือนกับเงื่อนไขอื่น ๆ ข้างต้น เมื่อวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 5.283E8, 3.754E9, 5.555E9, 6.166E9, 5.375E9, 3.244E9 และ 8.64E-4 ขึ้น ตามลำดับ และที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร ได้อายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 6.166E9 ชิ้น จากนั้นเมื่อเพิ่มช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นอีกเป็น 2.5 มิลลิเมตร วัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 5.284E8, 3.755E9, 5.556E9, 6.167E9, 5.376E9, 3.245E9, 8.56E-4 ขึ้น ตามลำดับและที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่ 6.167E9 ชิ้น ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.6 มิลลิเมตร โดยกำหนดเงื่อนไขชั้นความหนาสารเคลือบผิวเหมือนกับช่องว่างแม่พิมพ์อื่นๆ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 5.285E8, 3.756E9, 5.557E9, 6.168E9, 5.377E9, 3.246E9 และ 8.48E-4 ขึ้น ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าอายุการใช้งานค่ามากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 6.168E9 ชิ้น และท้ายที่สุดที่ระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 2.7 มิลลิเมตร จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 5.286E8, 3.757E9, 5.558E9, 6.169E9, 5.378E9, 3.247E9 และ 8.37E-4 ขึ้น ตามลำดับ ได้ค่าอายุการใช้งานที่ดีที่สุดที่ 6.169E9 ชิ้น ซึ่งเหมือนกับชั้นความหนาสารเคลือบผิวอื่นๆตามเงื่อนไขระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์ดังกล่าวข้างต้น จากผลลัพธ์ของกราฟ รูปที่ 3 ยังทำให้ทราบว่าลักษณะของกราฟในทุกๆเส้นกราฟเป็นสมการพหุนามแบบพาลาโบลา ในรูปแบบระฆังคว่ำซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในช่วงชั้นความหนาสารเคลือบผิวไม่เกิน 4  $\mu\text{m}$  สารเคลือบผิวจะทำ

หน้าที่เป็นสารหล่อลื่นชนิดแข็งตามข้อสังเกตของสมมติฐาน อย่างไรก็ตามเมื่อขึ้นความหนาสารเคลือบผิวเกิน 4  $\mu\text{m}$  สารเคลือบผิวจะไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นชนิดแข็งได้เนื่องจากชั้นความหนาสารเคลือบเกิดสภาวะการฉีกตัวเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอกที่มากกระทำต่อชั้นความหนาสารเคลือบผิวเกินกว่าค่าความต้านแรงฉีกของสารเคลือบผิวสารเคลือบจะต้านทานได้ยิ่งชั้นความหนาสารเคลือบผิวมีค่ามากขึ้นยิ่งทำให้เกิดการฉีกตัวของสารเคลือบผิวได้มากยิ่งขึ้น โดยภาพรวมชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่เหมาะสมมากที่สุดมีค่า 4  $\mu\text{m}$  ในทำนองเดียวกันระยะห่างระหว่างพันธ-ตายมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ได้จำนวนชิ้นงานมากขึ้นตามลำดับ

อิทธิพลความหนาชั้นเคลือบผิวของไทเทเนียมไนไตรด์ ส่งผลต่ออายุการใช้งานของ วัสดุทำพิมพ์ (Die Material)

อย่างไรก็ตามสำหรับการจำลองอิทธิพลของความหนาชั้นเคลือบผิวของไทเทเนียมไนไตรด์ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของ วัสดุทำพิมพ์ (Die Material) ผู้วิจัยกำหนดเงื่อนไขการเคลือบผิวพันธ-ตายมีลักษณะชั้นๆเป็น 3 ชั้นเช่นเดียวกับไทเทเนียมคาร์ไบด์หรือตามสมมติฐานที่วางไว้ โดยกำหนดให้สารเคลือบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  อยู่ชั้นในสุด ชั้นตรงกลางเป็นสารเคลือบ TiCN และสารเคลือบนอกสุดเป็นสารเคลือบ TiN และกำหนดให้ชั้นความหนาสารเคลือบจากภายในสู่ภายนอกดังนี้ คือ  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1 \mu\text{m}$  และ  $\text{TiCN} = 1 \mu\text{m}$  ส่วนนอกสุดเป็นชั้นความหนาทุกๆชั้นความหนาสารเคลือบ TiN เพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่ปรากฏขึ้นอย่างไรก็ตามที่ชั้นความหนาสารเคลือบอื่นๆไม่ได้ถูกละเว้นแต่นำมาอธิบายในรูปแบบการออกแบบการทดลองเชิงสถิติเช่นเดียวกับอิทธิพลสารเคลือบไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ จากเงื่อนไขการจำลองอิทธิพลความหนาชั้นเคลือบผิวของไทเทเนียมไนไตรด์ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของ วัสดุทำพิมพ์ (Die Material) ที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตรตามลำดับ และระยะห่างระหว่างช่องว่างแม่พิมพ์ 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 และ 2.7 มิลลิเมตรตามลำดับ พบว่า ที่ระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์ 2.1 มิลลิเมตร และชั้นความหนาสารเคลือบผิวจาก 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ ให้ผลลัพธ์การจำลองสำหรับอายุการใช้งานแม่พิมพ์เรียงตามลำดับดังนี้ คือ  $3.28\text{E}8$ ,  $2.46\text{E}9$ ,  $3.74\text{E}9$ ,  $4.13\text{E}9$ ,  $3.63\text{E}9$ ,  $2.25\text{E}9$  และ  $8.71\text{E}6$  ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่ 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน  $4.13\text{E}9$  ขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.2 มิลลิเมตรและที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามาก ให้ผลลัพธ์การจำลองสำหรับอายุการใช้งานแม่พิมพ์เรียงตามลำดับดังนี้ คือ  $3.282\text{E}8$ ,  $2.467\text{E}9$ ,  $3.751\text{E}9$ ,  $4.25\text{E}9$ ,  $3.72\text{E}9$ ,  $2.38\text{E}9$  และ  $8.79\text{E}6$  ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่  $4.25\text{E}9$  ขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.3 มิลลิเมตร และที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามาก ให้ผลลัพธ์การจำลองสำหรับอายุการใช้งานแม่พิมพ์เรียงตามลำดับดังนี้ คือ  $3.287\text{E}8$ ,  $2.472\text{E}9$ ,  $3.758\text{E}9$ ,  $4.3\text{E}9$ ,  $3.79\text{E}9$ ,  $2.45\text{E}9$  และ  $8.84\text{E}6$  ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่  $4.3\text{E}9$  ขึ้น จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างระหว่างแม่พิมพ์เป็น 2.4 มิลลิเมตร และที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามาก ให้ผลลัพธ์การจำลองสำหรับอายุการใช้งานแม่พิมพ์เรียงตามลำดับดังนี้  $3.292\text{E}8$ ,  $2.478\text{E}9$ ,  $3.764\text{E}9$ ,  $4.38\text{E}9$ ,  $3.83\text{E}9$ ,  $2.49\text{E}9$  และ  $8.89\text{E}6$  ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่  $4.38\text{E}9$  ขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.5 มิลลิเมตร และที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามากให้ผลลัพธ์การจำลองสำหรับอายุการใช้งานแม่พิมพ์ เรียงตามลำดับดังนี้ คือ  $3.299\text{E}8$ ,  $2.486\text{E}9$ ,  $3.78\text{E}9$ ,  $4.42\text{E}9$ ,  $3.89\text{E}9$ ,  $2.55\text{E}9$  และ  $8.96\text{E}6$  ขึ้นตามลำดับ



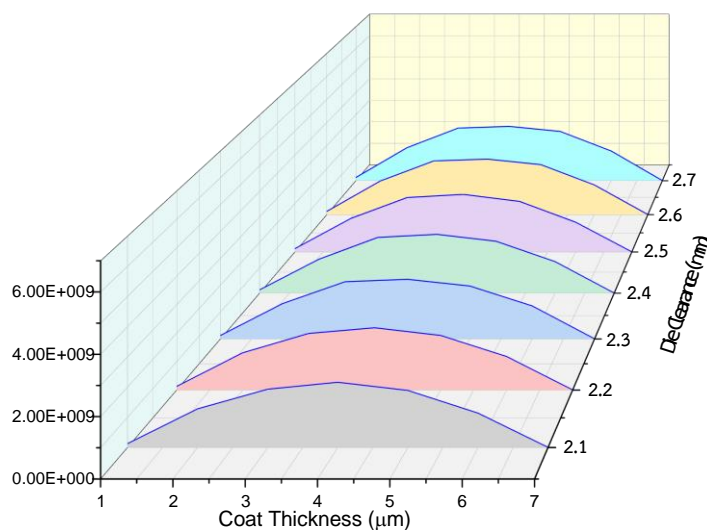
ภาพที่ 4 กราฟแสดงอายุการใช้งานสำหรับไทเทเนียมไนไตรด์

โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่  $4.42E9$  ขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.6 มิลลิเมตรและที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามาก ให้ผลลัพธ์การจำลองสำหรับอายุการใช้งานแม่พิมพ์เรียงตามลำดับดังนี้ คือ  $3.34E8$ ,  $2.492E9$ ,  $3.84E9$ ,  $4.48E9$ ,  $3.93E9$ ,  $2.6E9$  และ  $9.08E6$  ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่  $4.48E9$  ขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.7 มิลลิเมตร และที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามาก ให้ผลลัพธ์การจำลองสำหรับอายุการใช้งานแม่พิมพ์เรียงตามลำดับดังนี้ คือ  $3.41E8$ ,  $2.54E9$ ,  $3.79E9$ ,  $4.53E9$ ,  $3.99E9$ ,  $2.61E9$  และ  $9.11E6$  ขึ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่  $4.53E9$  ขึ้น จากผลลัพธ์ของกราฟรูปที่ 4 ยังทำให้ทราบว่าลักษณะของกราฟในทุกๆเส้นกราฟเป็นสมการพหุนามแบบพาลาโบลา ในรูปแบบระฆังคว่ำซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในช่วงชั้นความหนาสารเคลือบผิวไม่เกิน  $4 \mu\text{m}$  สารเคลือบผิวจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นชนิดแข็งตามข้อสั่งเกตของสมมติฐาน อย่างไรก็ตามเมื่อชั้นความหนาสารเคลือบผิวเกิน  $4 \mu\text{m}$  สารเคลือบผิวจะไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นชนิดแข็งได้เนื่องจากชั้นความหนาสารเคลือบเกิดสภาวะการฉีกตัวเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอกที่มากกระทำต่อชั้นความหนาสารเคลือบผิวเกินกว่าค่าความต้านแรงฉีกของสารเคลือบผิวสารเคลือบจะต้านทานได้ถึงชั้นความหนาสารเคลือบผิวมีค่ามากขึ้นยังทำให้เกิดการฉีกตัวของสารเคลือบผิวได้มากยิ่งขึ้น โดยภาพรวมชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่เหมาะสมมากที่สุดมีค่า  $4 \mu\text{m}$  ในทำนองเดียวกันระยะห่างระหว่างพันธ-ตายมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ได้จำนวนชิ้นงานมากขึ้นตามลำดับ

อิทธิพลความหนาชั้นเคลือบผิวของอะลูมิเนียมออกไซด์ส่งผลต่ออายุการใช้งานของ วัสดุทำพิมพ์ (Die Material)

ในทำนองเดียวกันสำหรับการจำลองอิทธิพลของความหนาชั้นเคลือบผิวของอะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานของ วัสดุทำพิมพ์ (Die Material) ผู้วิจัยกำหนดเงื่อนไขการเคลือบผิวพันธ-ตายมีลักษณะชั้นๆเป็น 3 ชั้นเช่นเดียวกับไทเทเนียมคาร์ไบด์หรือตามสมมติฐานที่วางไว้ โดยกำหนดให้สารเคลือบ TiCN อยู่ชั้นในสุด ชั้นตรงกลางเป็นสารเคลือบ TiN และสารเคลือบชั้นนอกสุดเป็นสารเคลือบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และกำหนดให้ชั้นความหนาสารเคลือบจากภายในสู่ภายนอกดังนี้ คือ  $\text{TiCN} = 1 \mu\text{m}$  และ  $\text{TiN} = 1 \mu\text{m}$  ส่วนนอกสุดเป็นชั้นความหนาทุกๆชั้นความหนาสารเคลือบ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เพื่อนำมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่ปรากฏขึ้นอย่างไรก็ตามที่ชั้นความหนาสารเคลือบอื่นๆไม่ได้ถูกละเว้นแต่จะนำมาอธิบายในรูปแบบการ

ออกแบบการทดลองเชิงสถิติเช่นเดียวกับอิทธิพลสารเคลือบไทเทเนียมคาร์โบไนต์ จากเงื่อนไขการจำลองของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างชั้นความหนาสารเคลือบกับช่องว่างแม่พิมพ์ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ พบว่า ที่ระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์ 2.1 มิลลิเมตร ชั้นความหนาสารเคลือบผิวจาก 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 1.28E8, 1.28E9, 1.93E9, 2.16E9, 1.89E9, 1.14E9 และ 6.71E6 ชิ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่ 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 2.16E9 ชิ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.2 มิลลิเมตร ชั้นความหนาสารเคลือบผิวจาก 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 1.3E8, 1.31E9, 1.99E9, 2.19E9, 1.92E9, 1.18E9 และ 6.77E6 ชิ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่ 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 2.19E9 ชิ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นอีกเป็น 2.3 มิลลิเมตร ชั้นความหนาสารเคลือบผิวจาก 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 1.305E8, 1.32E9, 2.13E9, 2.22E9, 1.97E9, 1.23E9 และ 6.79E6 ชิ้น ตามลำดับ โดยที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่ 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 2.22E9 ชิ้น ในทำนองเดียวกันที่ช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 2.4 มิลลิเมตร โดยกำหนดเงื่อนไขระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์เรียงจากค่าน้อยไปยังค่ามากเหมือนกับเงื่อนไขข้างต้น เมื่อวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 1.31E8, 1.33E9, 2.19E9, 2.31E9, 2.04E9, 1.24E9 และ 6.8E6 ชิ้น ตามลำดับ และที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร ได้อายุการใช้งานมากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 2.31E9 ชิ้น จากนั้นเมื่อเพิ่มช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นอีกเป็น 2.5 มิลลิเมตร วัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 1.38E8, 1.39E9, 2.25E9, 2.38E9, 2.09E9, 1.23E9 และ 6.87E6 ชิ้น ตามลำดับและที่ชั้นความหนาสารเคลือบผิว 4.0 ไมโครเมตร มีอายุการใช้งานมากที่สุดที่ 2.38E9 ชิ้น ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์มากขึ้นเป็น 2.6 มิลลิเมตร โดยกำหนดเงื่อนไขชั้นความหนาสารเคลือบเหมือนกับช่องว่างแม่พิมพ์อื่นๆ จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 1.43E8, 1.46E9, 2.33E9, 2.41E9, 2.17E9, 1.29E9 และ 6.71E6 ชิ้น ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าอายุการใช้งานค่ามากที่สุดที่จำนวนชิ้นงาน 2.41E9 ชิ้น และท้ายที่สุดที่ระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์เท่ากับ 2.7 มิลลิเมตร จากการวัดอายุการใช้งานด้วยวิธีการนับจำนวนชิ้นงานได้จำนวนชิ้นงานดังนี้ 1.47E8, 1.5E9, 2.39E9, 2.47E9, 2.24E9, 1.35E9 และ 6.79E6 ชิ้น ตามลำดับ ได้ค่าอายุการใช้งานที่ดีที่สุดที่ 2.47E9 ชิ้น ซึ่งเหมือนกับชั้นความหนาสารเคลือบผิวอื่นๆตามเงื่อนไขระยะห่างช่องว่างแม่พิมพ์ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จากผลลัพธ์ของกราฟ รูปที่ 5 ยังทำให้ทราบว่าลักษณะของกราฟในทุกๆเส้นกราฟเป็นสมการพอลิโนเมียลแบบพาลาโบลา ในรูปแบบระฆังคว่ำซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ในช่วงชั้นความหนาสารเคลือบผิวไม่เกิน 4  $\mu\text{m}$  สารเคลือบผิวจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นชนิดแข็งตามข้อสังเกตของสมมติฐาน อย่างไรก็ตามเมื่อชั้นความหนาสารเคลือบผิวเกิน 4  $\mu\text{m}$  สารเคลือบผิวจะไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น



ภาพที่ 5 กราฟแสดงอายุการใช้งานสำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์



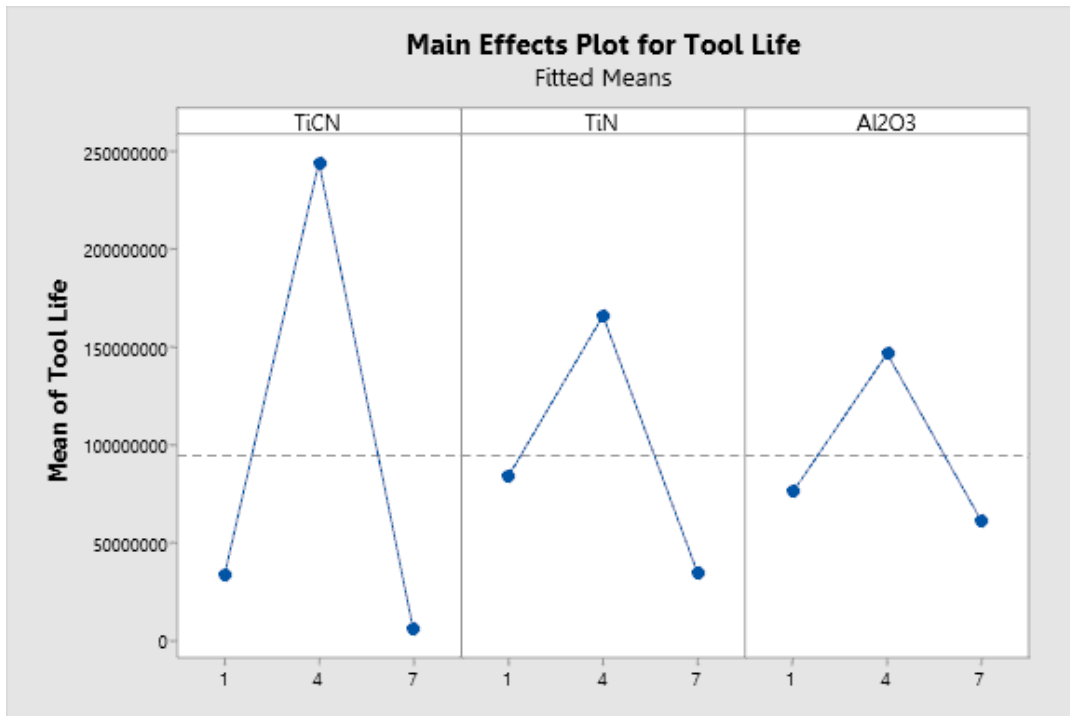
ชนิดแข็งได้เนื่องจากชั้นความหนาสารเคลือบเกิดสภาวะการเนียนตัวเนื่องจากแรงกระทำจากภายนอกที่มากระทำต่อชั้นความหนาสารเคลือบผิวเกินกว่าค่าความต้านแรงเนียนของสารเคลือบผิวสารเคลือบจะต้านทานได้ถึงชั้นความหนาสารเคลือบผิวมีค่ามากขึ้นยิ่งทำให้เกิดการเนียนตัวของสารเคลือบผิวได้มากยิ่งขึ้น โดยภาพรวมชั้นความหนาสารเคลือบผิวที่เหมาะสมมากที่สุดมีค่า  $4 \mu\text{m}$  ในทำนองเดียวกันระยะห่างระหว่างพันธ-ตายมีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้ได้จำนวนชิ้นงานมากขึ้นตามลำดับ ผลลัพธ์การหาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุการใช้งานจากการวิเคราะห์เชิงสถิติ

งานวิจัยนี้นำเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way Analysis of Variance) มาทำการทดสอบสมมติฐานของงานวิจัยในช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) 95% เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าการสึกหรอของแต่ละสารเคลือบผิว ดังตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนใน ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าค่าการสึกหรอเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ ประชากรทุกกลุ่มมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot Graph) ค่าความแปรปรวนของแต่ละกลุ่มประชากรเท่ากัน (Versus Fits Graph) และการสุ่มตัวอย่างแต่ละชุดจากแต่ละประชากรเป็นอิสระต่อกัน (Versus Order Graph) ดังแสดงในภาพที่ 6 ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวด้วยโปรแกรม Minitab พบว่าค่า P-Value ของสารเคลือบผิวแต่ละชนิดของสารเคลือบ มีค่าเท่ากับ 0.000 และมีค่าน้อยกว่าค่า  $\alpha$  ที่กำหนดคือ 0.05 สามารถสรุปได้ว่าขนาดความหนาของสารเคลือบผิวมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

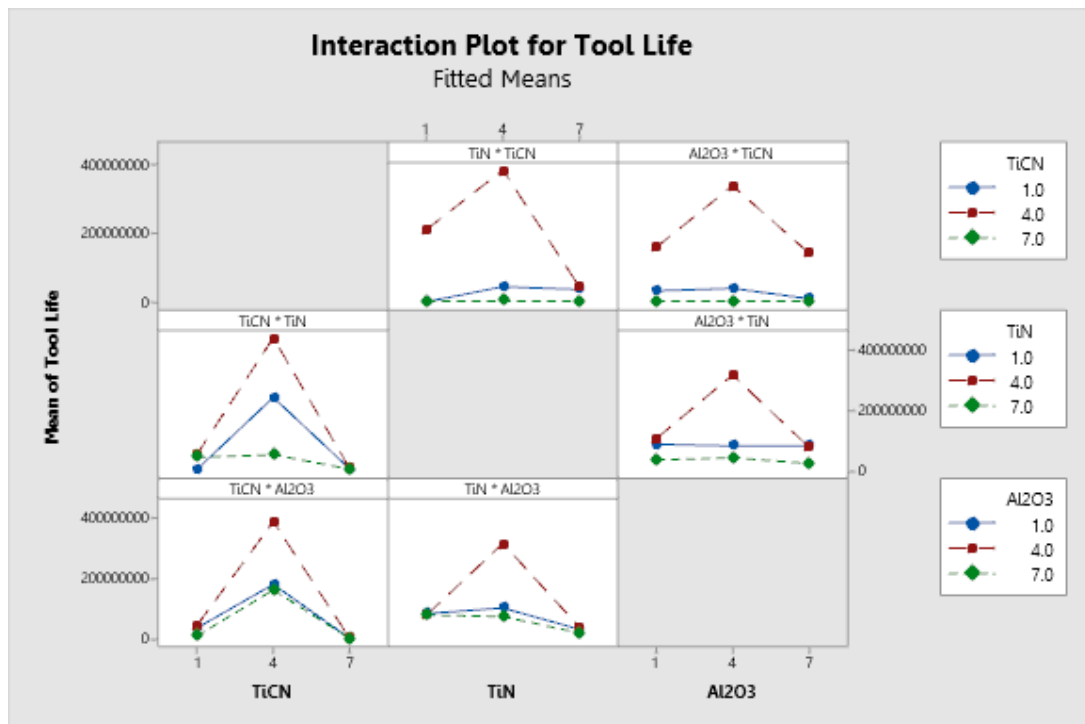
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	27	4.91615E+20	1.82080E+19	1171765.29	0.000
Blocks	1	4.60042E+13	4.60042E+13	2.96	0.097
Linear	6	3.52158E+20	5.86930E+19	3777160.86	0.000
TiCN	2	2.95575E+20	1.47788E+20	9510812.77	0.000
TiN	2	5.61468E+19	2.80734E+19	1806651.98	0.000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2	4.35644E+17	2.17822E+17	14017.83	0.000
2-Way Interactions	12	1.38427E+20	1.15356E+19	742367.28	0.000
TiCN*TiN	4	1.37041E+20	3.42602E+19	2204799.69	0.000
TiCN*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	8.61327E+17	2.15332E+17	13857.59	0.000
TiN*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4	5.24877E+17	1.31219E+17	8444.55	0.000
3-Way Interactions	8	1.03004E+18	1.28754E+17	8285.93	0.000
TiCN*TiN*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	1.03004E+18	1.28754E+17	8285.93	0.000
Error	26	4.04012E+14	1.55389E+13		
Total	53	4.91615E+20			

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักจะเห็นว่าปัจจัยทั้ง 3 มีค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ที่ต่างกัน โดยปัจจัยที่มีค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์สูงสุดอันดับหนึ่งคือไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiCN) อันดับสองคือไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) อันดับสามคืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออายุการใช้งาน

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบการทดสอบระหว่างไทเทเนียมคาร์ไบด์กับไทเทเนียมไนไตร์จะทำให้อายุการใช้งานดีที่สุดและเมื่อเปรียบเทียบการทดลองระหว่างอะลูมิเนียมออกไซด์กับไทเทเนียมไนไตร์จะทำให้อายุการใช้งานน้อยที่สุดดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟแสดงระดับความสัมพันธ์ของปัจจัยร่วม

### สรุปผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นความหนาสารเคลือบกับอายุการใช้งานของแม่พิมพ์สำหรับสารเคลือบไทเทเนียมคาร์โบไนต์ จากเงื่อนไขการจำลองของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ชั้นความหนาสารเคลือบกับอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ พบว่า ที่ชั้นความหนาสารเคลือบ 1.0 ไมโครเมตร ค่าอายุการใช้งานเท่ากับ  $5.28 \times 10^8$  ชั่วโมง จากนั้น ค่าความหนาชั้นเคลือบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 ไมโครเมตร ค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $3.75 \times 10^9$  ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวมากขึ้นอีกที่ความหนา 3.0 ไมโครเมตร ส่งผลให้อายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีค่าเท่ากับ  $5.55 \times 10^9$  ชั่วโมง ในทำนองเดียวกันที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเท่ากับ 4.0 ไมโครเมตร จะได้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์เท่ากับ  $6.16 \times 10^9$  ชั่วโมง จากนั้นเมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวขึ้นอีกเท่ากับ 5.0 ไมโครเมตร กลับทำให้ค่าอายุการใช้งานลดลงมีค่าเท่ากับ  $5.37 \times 10^9$  ชั่วโมง ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวมากขึ้นอีกที่ความหนา 6.0 ไมโครเมตร ส่งผลให้ค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ลดลงมีค่าเท่ากับ  $3.24 \times 10^9$  ชั่วโมง สุดท้าย ที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเท่ากับ 7.0 ไมโครเมตร เป็นผลให้ค่าอายุการใช้งานของการสึกมีค่าเท่ากับ  $10.71 \times 10^6$  ชั่วโมง จากผลการพล็อตกราฟทำให้ทราบว่ากราฟดังกล่าว เป็นกราฟพอลิโนเมียลแบบพาลาโบลา ในลักษณะระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปแบบคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ดังนี้

$$T_{L,C1.1} = -3.9111 \times 10^9 + 5.1158 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 6.5190 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (3)$$

$$T_{L,C1.2} = -3.9138 \times 10^9 + 5.1189 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 6.5230 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (4)$$

$$T_{L,C1.3} = -3.9144 \times 10^9 + 5.1198 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 6.5242 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (5)$$

$$T_{L,C1.4} = -3.9150 \times 10^9 + 5.1207 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 6.5253 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (6)$$

$$T_{L,C1.5} = -3.9156 \times 10^9 + 5.1216 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 6.5264 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (7)$$

$$T_{L,C1.6} = -3.9162 \times 10^9 + 5.1225 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 6.5275 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (8)$$

$$T_{L,C1.7} = -3.9168 \times 10^9 + 5.1234 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 6.5286 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (9)$$

เมื่อ  $T_{L,C}$  = อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ที่ช่องว่างต่างๆ (จำนวนชิ้น)

$T_{\text{coating}}$  = ชั้นความหนาสารเคลือบผิว (ไมโครเมตร)

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ชั้นความหนาสารเคลือบกับอายุการใช้งานของแม่พิมพ์สำหรับสารเคลือบไทเทเนียมไนไตรด์ จากเงื่อนไขการจำลองของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ชั้นความหนาสารเคลือบกับอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ พบว่า ที่ชั้นความหนาสารเคลือบ 1.0 ไมโครเมตร ค่าอายุการใช้งานเท่ากับ  $3.28 \times 10^8$  ชั่วโมง จากนั้น ค่าความหนาชั้นเคลือบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 ไมโครเมตร ค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $2.51 \times 10^9$  ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวมากขึ้นอีกที่ความหนา 3.0 ไมโครเมตร ส่งผลให้อายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีค่าเท่ากับ  $3.74 \times 10^9$  ชั่วโมง ในทำนองเดียวกันที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเท่ากับ 4.0 ไมโครเมตร จะได้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์เท่ากับ  $4.13 \times 10^9$  ชั่วโมง จากนั้นเมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวขึ้นอีกเท่ากับ 5.0 ไมโครเมตร กลับทำให้ค่าอายุการใช้งานลดลงมีค่าเท่ากับ  $3.63 \times 10^9$  ชั่วโมง ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวมากขึ้นอีกที่ความหนา 6.0 ไมโครเมตร ส่งผลให้ค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ลดลงมีค่าเท่ากับ  $2.19 \times 10^9$  ชั่วโมง สุดท้ายที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเท่ากับ 7.0 ไมโครเมตร เป็นผลให้ค่าอายุการใช้งานของการสึกมีค่าเท่ากับ  $8.7 \times 10^6$  ชั่วโมง จากผลการพล็อตกราฟทำให้ทราบว่ากราฟดังกล่าว เป็นกราฟพอลิโนเมียลแบบพาลาโบลา ในลักษณะระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปแบบคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 ดังนี้

$$T_{L,C2.1} = -2.7017 \times 10^9 + 3.4655 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 4.3984 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (10)$$

$$T_{L,C2.2} = -2.8085 \times 10^9 + 3.5516 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 4.4914 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (11)$$

$$T_{L,C2.3} = -2.8681 \times 10^9 + 3.5992 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 4.5424 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (12)$$

$$T_{L,C2.4} = -2.9229 \times 10^9 + 3.6462 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 4.5966 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (13)$$

$$T_{L,C2.5} = -2.9723 \times 10^9 + 3.6879 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 4.6423 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (14)$$

$$T_{L,C2.6} = -3.0229 \times 10^9 + 3.7394 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 4.7041 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (15)$$

$$T_{L,C2.7} = -3.0348 \times 10^9 + 3.7584 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 4.7273 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (16)$$

เมื่อ  $T_{L,C}$  = อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ที่ช่องว่างต่างๆ (จำนวนชิ้น)

$T_{\text{coating}}$  = ชั้นความหนาสารเคลือบผิว (ไมโครเมตร)

3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ชั้นความหนาสารเคลือบกับอายุการใช้งานของแม่พิมพ์สำหรับสารเคลือบ

อลูมิเนียมไนไตรด์ จากเงื่อนไขการจำลองของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ชั้นความหนาสารเคลือบกับอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ พบว่า ที่ชั้นความหนาสารเคลือบ 1.0 ไมโครเมตร ค่าอายุการใช้งานเท่ากับ  $1.28e+08$  ชั้น จากนั้น ค่าความหนาชั้นเคลือบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.0 ไมโครเมตร ค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $1.28e+09$  ชั้น เมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวมากขึ้นอีกที่ความหนา 3.0 ไมโครเมตร ส่งผลให้อายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีค่าเท่ากับ  $1.93e+09$  ชั้น ในทำนองเดียวกันที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเท่ากับ 4.0 ไมโครเมตร จะได้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์เท่ากับ  $2.16e+09$  ชั้น จากนั้นเมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวขึ้นอีกเท่ากับ 5.0 ไมโครเมตร กลับทำให้ค่าอายุการใช้งานลดลงมีค่าเท่ากับ  $1.89e+09$  ชั้น ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มความหนาชั้นเคลือบผิวมากขึ้นอีกที่ความหนา 6.0 ไมโครเมตร ส่งผลให้ค่าอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ลดลงมีค่าเท่ากับ  $1.14e+09$  ชั้น สุดท้าย ที่ความหนาชั้นเคลือบผิวเท่ากับ 7.0 ไมโครเมตร เป็นผลให้ค่าอายุการใช้งานของการสึกมีค่าเท่ากับ  $6.71e+06$  ชั้น จากผลการพล็อตกราฟทำให้ทราบว่ากราฟดังกล่าว เป็นกราฟพอลิโนเมียลแบบพาลาโบลา ในลักษณะระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปแบบคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 17,18,19,20,21,22,23 ดังนี้

$$T_{L,C1 2.1} = -1.45827 \times 10^9 + 1.82571 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 2.31267 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (17)$$

$$T_{L,C1 2.2} = -1.48828 \times 10^9 + 1.86131 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 2.35788 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (18)$$

$$T_{L,C1 2.3} = -1.53930 \times 10^9 + 1.92637 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 2.43971 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (19)$$

$$T_{L,C1 2.4} = -1.61294 \times 10^9 + 1.99786 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 2.52869 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (20)$$

$$T_{L,C1 2.5} = -1.63677 \times 10^9 + 2.04649 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 2.59710 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (21)$$

$$T_{L,C1 2.6} = -1.66755 \times 10^9 + 2.10006 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 2.66565 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (22)$$

$$T_{L,C1 2.7} = -1.71809 \times 10^9 + 2.15948 \times 10^9 T_{\text{coating}} - 2.73822 \times 10^8 T_{\text{coating}}^2 \quad (23)$$

เมื่อ  $T_{L,C1}$  = อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ที่ช่องว่างต่างๆ (จำนวนชั้น)

$T_{\text{coating}}$  = ชั้นความหนาสารเคลือบผิว (ไมโครเมตร)

## อภิปรายผล

ในการทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมมีหลายแง่มุมที่ยากต่อการควบคุมอย่างไรก็ตามมีเพียงวิธีการทดสอบเท่านั้นที่สามารถสังเกตประสิทธิภาพที่แท้จริงของแม่พิมพ์ได้ แรงบันดาลใจจากปัญหานี้จึงนำเสนองานวิจัยวิธีการต่างๆในการเอาชนะความท้าทายที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบภาคสนามในขอบเขตของการวิจัยได้ทำการศึกษากลไกการสึกหรอของแม่พิมพ์ตัดแบบไฮบริดและเปรียบเทียบความต้านทานการสึกหรอของสารเคลือบ PVD โดยใช้วิธีการทดสอบในภาคอุตสาหกรรมที่พัฒนาขึ้น ได้สรุปของการวิจัยดังนี้

1. กลไกการสึกหรอหลักของสารเคลือบผิวอาจแบ่งออกเป็นสามสารเคลือบโดยแต่ละประเภทของสารเคลือบให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลสารเคลือบที่มีบทบาทต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่แตกต่างกันด้วยจึงส่งผลให้การสึกหรอแม่พิมพ์และอายุการใช้งานแม่พิมพ์แตกต่างกันไป

2. ค่าความแข็งสารเคลือบยังส่งผลต่ออายุการใช้งานแม่พิมพ์และในเชิงทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ทำได้โดยใช้ไฟล์ข้อมูลจากเครื่องมือและทำการจำลองซ้ำ ๆ นอกจากนี้ยังต้องใช้เทคนิคการประเมินอายุการใช้งานที่เชื่อถือได้ซึ่งทำได้โดยการวัดค่าการสึกหรอโดยเฉลี่ยของของแต่ละสารเคลือบ จากนั้นคำนวณพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับค่าการสึกหรอตามสมการอาชาร์จเพื่อให้ได้ค่าประเมินอายุการใช้งานสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ศรีเจริญชัยเมททัลโปรดัก จำกัด ที่เอื้อเฟื้อ สถานที่ เครื่องมือ เครื่องจักร และวัสดุอุปกรณ์ ในการทดลองโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายและให้ข้อมูลเชิงเทคนิคต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ และขอขอบคุณ คุณกรกิจ จันทพุ่ม ที่คอยช่วยเหลือแนะนำเงื่อนไขการทำ PVD Coating รวมถึงแหล่งสถานที่รับทำงานด้านการทำ PVD Coating เป็นที่ยอมรับสำหรับวงการอุตสาหกรรมในประเทศไทย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Vafaeesefat , M. Khanahmadlu. (2009). Stretch Flange Forming Analysis of Stainless Steel The 8th Iranian Aerospace Society Conference Feb. 17-19/2009, Malek-e-Ashtar University of Technology), <https://www.researchgate.net/publication/328306477>
- [2] Gang Cheng, Shiao Zhang. Xiuqing Ma. Yunjiang Li. (2015). Numerical Simulation and Experimental Study on Parameter Optimization of Cold Flanging Process of Pipe Tee. International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2015); Page(s): 362 – 367
- [3] Drăghici C., Mihăilă F. (2015). Feasibility analysis of flanged holes with support of numerical simulation, Third International Conference on Advances in Mechanical and Automation Engineering - MAE 2015, 10-11 December, Int'l J. of Advancements in Mechanical and Aeronautical Engineering, vol. 3 issue 1, Page(s): 84 – 88.
- [4] Drăghici C., (2015). Statistical modelling of the spring back behavior for bending of V-shaped parts from common sheet metal, Int'l Conference on Structural, Mechanical and Material Engineering (ICSMME 2015), Advances in Engineering Research, vol. 19.
- [5] Drăghici C., (2017). Feasibility analysis of shrink flanging process with support of numerical simulation, UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, Vol. 79, Iss. 1, [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/rez846\\_703380.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez846_703380.pdf), ISSN 1454-2358, pp
- [6] Anderson A. (1995). ASM Metals Handbook Volume 18: Friction, Lubrication and Wear. ASM International, USA.
- [7] Antonio Augusto Gorni, Socorro SP. (2016). Steel Forming and Heat-Treating Handbook. In: Seok-Jae Lee, editors. The genetic basis of human cancer. Korea: McGraw-Hill; p. 64.
- [8] Bay, N., Olsson, D.D., Andreasen, J.L. (2008). Lubricant test methods for sheet metal forming. Tribology International, 41, 844-853.
- [9] Bay, N., Azushima, A., Groche, P., Ishibashi, I., Merklein, M., Morishita, M., Nakamura, T., Schmid, S., Yoshida, M. (2010). Environmentally benign tribo-systems for metal forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 59, 760-780.
- [10] Bouzakis, K.-D., Michailidis, N., Bouzakis, E., Katirtzoglou, G., Makrimalakis, S., Gerardis, S., Pappa, M., Klocke, F., Schalaster, R., Gorgels, C. (2011b). Cutting performance of coated tools with various adhesion strength quantified by inclined impact tests. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60, 105-108.
- [11] ASTM G133-95, "Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear", p.523-536.
- [12] Cao, C., Zhang, X., Wang, H. (2012). Analysis on residual stress in TiN coating with different thicknesses. Applied Mechanics and Materials. 217-219, 1306-1311.
- [13] Ivana Suchy. Handbook of die design, Second Edition, McGraw-Hill.
- [14] A.W.Hudgins, D.K. Matlock and J.G. Speer. (2009). "Shear Failures in Bending of Advanced High Strength Steels", Proceeding of International Deep Drawing Research Group Conference, June, P53.