

## การศึกษาและวิเคราะห์การสึกหรอและอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน โดยวิธีจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

### Finite element analysis of wear and tool life calculation of hot forging dies

รัชพล เอี่ยมถนอมชัย\* และ ศศิธร แบลนด์

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

\*ติดต่อ :E-mail: [ratcheam@gmail.com](mailto:ratcheam@gmail.com), [ssstp@kmutnb.ac.th](mailto:ssstp@kmutnb.ac.th) โทรศัพท์ : (662) 9132509 ต่อ 1539, โทรสาร: (662) 5870029

#### บทคัดย่อ

ในกระบวนการทุบขึ้นรูปร้อนปัญหาส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการสึกหรอมากกว่า 70% ของปัญหาทั้งหมด ทำให้การวิเคราะห์การเกิดการสึกหรอมีความสำคัญในการวางแผนการใช้งานที่เหมาะสม งานวิจัยนี้ทำการจำลองการทุบขึ้นรูปของชิ้นงานด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการทางคณิตศาสตร์ของ Archard เพื่อใช้ในการหาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ โดยแบบจำลองนี้ได้นำไปเปรียบเทียบกับกระบวนการชุบแข็งของแม่พิมพ์แบบชุบแข็งทั้งชิ้นที่ความแข็ง 52 HRC และกระบวนการไนตรายดิ่ง ที่ความแข็ง 69 HRC ซึ่งกระบวนการไนตรายดิ่งสามารถที่จะชุบแข็งแม่พิมพ์ให้มีความแข็งได้ดีกว่ากระบวนการชุบแข็งทั้งชิ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สูงขึ้น ผลการเปรียบเทียบพบว่าแม่พิมพ์ที่ผ่านกระบวนการไนตรายดิ่งมีอายุการใช้งานสูงกว่า 6% เมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ชุบแข็งทั้งชิ้น

**คำหลัก:** การสึกหรอ, ทุบขึ้นรูปร้อน, สมการ Archard, ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

#### Abstract

Wear was the predominant factor for tool failure mechanism for warm and hot forging dies with approximately 70%. The prediction of tool service life based on wear was used in optimize the process. This paper describes the estimation method of die service life based on wear in hot forging process. Finite element analyses are applied to hot forging processes. Archard's wear model has been applied to predict tool lives. The model has been employed to compared hardening method of die, which has hardness at 52 HRC and nitriding method which has hardness at 69 HRC. The FE results show that nitriding method can extend tool service life of die higher than hardening method about 6 %.

Keywords: Wear, Hot forging, Archard's wear equation, F.E.

#### 1. บทนำ

การทุบขึ้นรูปร้อนเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมรถยนต์และชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงสามารถที่จะทำการขึ้นรูปได้มาก และสามารถขึ้นรูปชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนที่การขึ้นรูปแบบเย็นไม่สามารถทำได้ นอกจากนั้นแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปใช้แรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปแบบเย็นหรือแบบอุ่น [1]

ประสิทธิภาพของกระบวนการทุบขึ้นรูปร้อนขึ้นอยู่กับแม่พิมพ์เป็นปัจจัยหลัก ซึ่งประสิทธิภาพของแม่พิมพ์มีผลต่อค่าใช้จ่ายในการผลิตชิ้นงานและคุณภาพของชิ้นงาน โดยค่าใช้จ่ายรวมสำหรับแม่พิมพ์อาจสูงถึง 50 % ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดในกระบวนการทั้งหมด [2] ดังนั้นการใช้งานแม่พิมพ์ที่เหมาะสมสามารถที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้อย่างชัดเจน โดยสาเหตุหลักๆของความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ทุบขึ้นรูปร้อน เกิดจากการสึกหรอ (Wear), การแตกหักทางกล (Mechanical

fracture), การแตกหักจากอุณหภูมิ (Thermal fracture), และการเปลี่ยนรูปถาวร (Plastic deformation) โดยกว่า 70% ของความเสียหายทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์เกิดมาจากการสึกหรอ [3,4]

ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ลดลงซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอของแม่พิมพ์ นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การสึกหรอขณะที่ขึ้นงานกับแม่พิมพ์สัมพันธ์กันคืออุณหภูมิของผิวที่สัมผัส, ความแข็งแรงของวัสดุแม่พิมพ์, ความเค้นสัมผัสบนแม่พิมพ์, ระยะทางในการเคลื่อนไถระหว่างแม่พิมพ์กับชิ้นงาน, และสภาวะของสารหล่อลื่น ฯลฯ [2] การสึกหรอนี้จะส่งผลต่อขนาดและผิวของชิ้นงานสำเร็จที่ผ่านกระบวนการทาบขึ้นรูปร้อน

บทความนี้ได้ทำการศึกษาศึกษาการสึกหรอโดยใช้แบบจำลองทางไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับสมการการสึกหรอของ Archard [5] ในการคำนวณหาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ โดยการเปรียบเทียบการชุบแข็งทั้งชิ้นของแม่พิมพ์กับกระบวนการไนไตรดิงผิวแม่พิมพ์เพื่อยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์



รูปที่ 1 (a) ชิ้นงานเพลากลม (b) ชิ้นงานที่ผ่านการทาบขึ้นรูปเตรียมชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ Blocker (c) ชิ้นงานที่ผ่านการทาบขึ้นรูปสำเร็จ (d) ชิ้นงานที่ผ่านการตัดครีบ

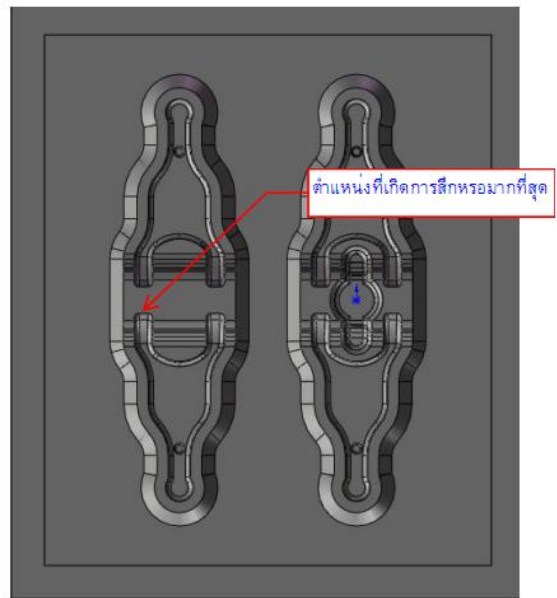
**2. สภาวะการขึ้นรูปจริงในโรงงาน**

บทความนี้ศึกษากระบวนการทาบขึ้นรูปร้อนชิ้นส่วนยานยนต์ (Bracket) แบบแม่พิมพ์ปิด ทำการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Crank press แม่พิมพ์ทำจากเหล็กมาตรฐาน JIS เกรด SKD61 วัสดุชิ้นงานทำจากเหล็กเกรดมาตรฐาน JIS เกรด SCM 440 เตรียมชิ้นงานจากเพลากลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร ยาว 170 มิลลิเมตร ดังแสดงรูป 1(a) ผ่านกระบวนการทาบขึ้นรูปครั้งแรกจนมีรูปร่างดังรูป 1(b) จากนั้นทาบขึ้นรูปสำเร็จดังรูป 1(c) โดย

มีการอุ่นแม่พิมพ์บนและแม่พิมพ์ล่างให้มีอุณหภูมิประมาณ 200°C และพ่นแกรไฟต์เพื่อเป็นสารหล่อลื่นชิ้นงานก่อนการทาบขึ้นรูปร้อนมีอุณหภูมิประมาณ 1200°C



รูปที่ 2 แสดงแม่พิมพ์ Blocker ที่ผ่านการใช้งานไปแล้ว 10,000 ครั้ง (a) แม่พิมพ์ด้านบน (b) แม่พิมพ์ด้านล่าง



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอมากที่สุดของแม่พิมพ์ด้านบน

การใช้งานของแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานประมาณ 10,000 ครั้ง ซึ่งแม่พิมพ์เกิดการสึกหรอจนชิ้นงานสำเร็จไม่ได้ขนาดที่สมบูรณ์ การสึกหรอเกิดขึ้นมากที่สุดบนแม่พิมพ์ Blocker ด้านบน ดังแสดงในรูป 3 จากการสึกหรอดังกล่าวจึงนำบริเวณที่เกิดการสึกหรอมากที่สุดบนแม่พิมพ์มาใช้ในการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ในบทความนี้

3. ขั้นตอนการหาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์

ในการคำนวณหาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ของ Archard [5] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$V = \frac{kPl}{H} \quad (1)$$

โดย V เป็นความลึกของการสึกหรอ (mm.), k เป็นสัมประสิทธิ์การสึกหรอ, P เป็นความเค้นสัมผัสบนแม่พิมพ์ (MPa), l เป็นระยะการเลื่อนไถล (mm.), H เป็นความแข็งของผิวแม่พิมพ์ (MPa)

เพื่อให้การคำนวณอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ทุกชิ้นรูปร่างมีความแม่นยำจำเป็นต้องพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งที่เปลี่ยนไปของผิวแม่พิมพ์ขณะใช้งาน จึงมีการพิจารณาค่าความแข็งของผิวแม่พิมพ์โดยเป็นฟังก์ชันของค่าความแข็งตามอุณหภูมิใช้งานและช่วงเวลาในการใช้งาน โดย Kang ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Archard [3,4] ดังแสดงในสมการที่ (2)

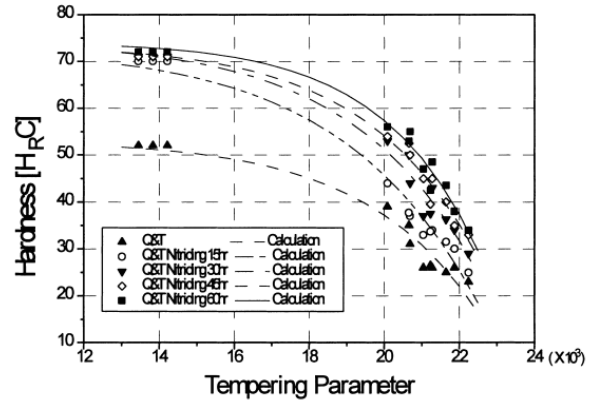
$$W = \sum_1^{n_{fin}} \frac{kPl}{H_0} \times \frac{H_0}{H(T, t)} \quad (2)$$

โดย W เป็นความลึกของการสึกหรอ, H<sub>0</sub> เป็นความแข็งเริ่มต้น (MPa), H (T, t) เป็นฟังก์ชันความแข็งที่ลดลงโดยพิจารณาจากอุณหภูมิและเวลาในการใช้งาน ค่าความแข็งของแม่พิมพ์พิจารณาจากฟังก์ชัน Tempering parameter แสดงในสมการ (3)

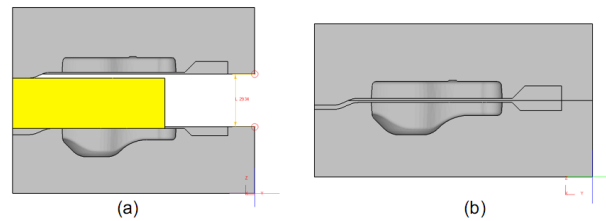
$$M = T(20 + \log t) \quad (3)$$

โดย M คือ tempering parameter, T คือ อุณหภูมิ tempering (K), t คือเวลา tempering (hr) ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับ tempering parameter [3,4] แสดงในรูป 4

ค่าความเค้นสัมผัส, ระยะทางการเลื่อนไถล และการกระจายตัวของอุณหภูมิบนแม่พิมพ์ สามารถหาได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของกระบวนการ โดยรายละเอียดของแบบจำลองแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งทำการจำลองเพียงแค่ 1 ใน 4 ของแม่พิมพ์ เนื่องจากแม่พิมพ์มีความสมมาตรกัน เพื่อลดเวลาในการประมวลผลของแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับ Tempering parameter [3,4]

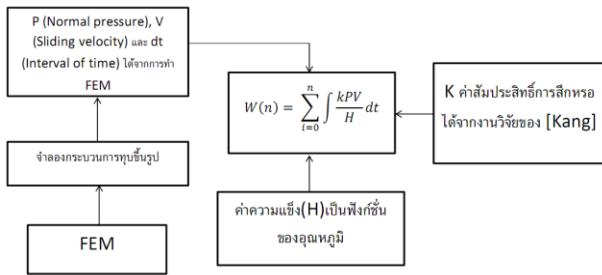


รูปที่ 5 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ แสดงตำแหน่งของแม่พิมพ์ a) แม่พิมพ์ก่อนเริ่มการทุบขึ้นรูปขึ้นงาน b) แม่พิมพ์หลังทำการขึ้นรูปแล้ว

ตารางที่ 1

สถานะในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์	
วัสดุชิ้นงาน	JIS SCM440
วัสดุแม่พิมพ์	JIS SKD61
สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	0.3
Heat transfer coefficient (N/s mm °C)	11
Convection coefficient (N/s mm °C)	0.02
อุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงาน/แม่พิมพ์ (°C)	1200/200
อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (°C)	25
สถานะการขึ้นรูปและเครื่องจักร	
ระยะการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์บนในแบบจำลอง (มม.)	29.34
เครื่องเพรส	Crank press
สมรรถนะ (ตัน)	400
รัศมีข้อเหวี่ยง (มม.)	140
Rod length (มม.)	1000
ความเร็วในการทุบขึ้นรูป (มม/วินาที)	600
Flow stress equation	$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T)$

ความเค้นประสิทธิผล ความเครียดรวม และ  
อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ตัวล่างในแบบจำลอง แสดง  
ในรูป 8-10



รูปที่ 6 ขั้นตอนการคำนวณหาการสึกหรอของแม่พิมพ์

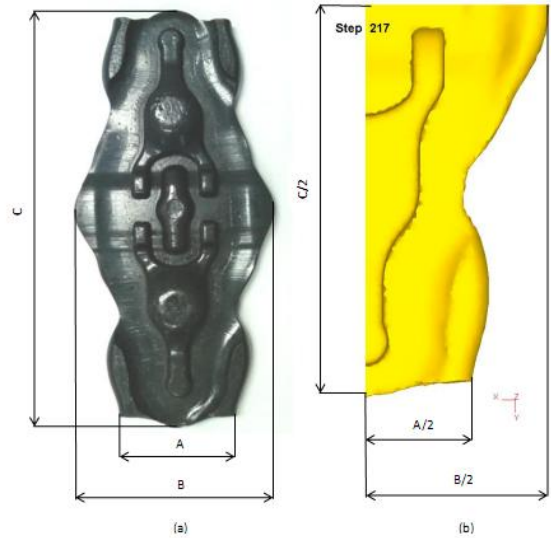
ในการจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลาและแต่ละช่วงเวลาเกิดความเค้นสัมผัส (P) และความเร็วในการเลื่อนไถล (V) ที่ไม่เท่ากันในแต่ละช่วง ดังนั้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ความเค้นสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไถลก็จะเปลี่ยนไปตามช่วงเวลา จึงต้องทำการคำนวณการสึกหรอเพิ่มเข้าไปทุกครั้ง เมื่อแบบจำลองนี้เสร็จสิ้นก็จะได้ระยะการสึกหรอในหนึ่งรอบการทำงาน และการสึกหรอในแต่ละรอบการทำงานก็ไม่เท่ากัน เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวแม่พิมพ์ทำให้ความแข็งของแม่พิมพ์ลดลงตามความสัมพันธ์ของค่าความแข็งดังแสดงในรูปที่ 4 และการรวมการสึกหรอที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการทำงานเข้าด้วยกันจนได้การสึกหรอที่รอบการใช้งาน 10,000 รอบ ในการคำนวณการสึกหรอมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 6

**4.การวิเคราะห์ผล**

**4.1 ผลการจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์**

เพื่อเป็นการตรวจสอบแบบจำลองจึงทำการจำลองกระบวนการทาบขึ้นรูปในสภาวะการจำลองตามตารางที่ 1 และทำการเปรียบเทียบผลการการจำลองกับชิ้นงานจริง รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบชิ้นงานกับผลที่ได้จากการจำลอง ผลการเปรียบเทียบขนาดชิ้นงานจริงกับแบบจำลองแสดงในตารางที่ 2

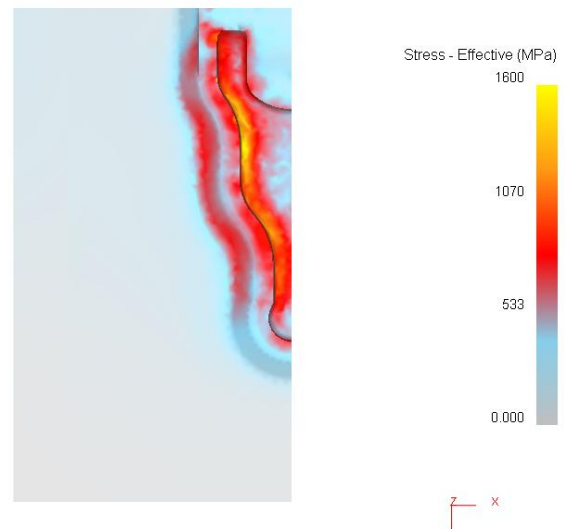
จากรูปที่ 7 และตารางที่ 2 พบว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 6.9% เป็นผลเนื่องมาจากเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ เช่น ความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส หรือขนาดแรงของเครื่องเพรสที่ใช้ในการกดแม่พิมพ์ อาจคลาดเคลื่อนจากการขึ้นรูปจริงเล็กน้อย ผลการจำลองที่ได้มีค่าความแม่นยำเพียงพอซึ่งจะนำไปใช้ในการศึกษาการสึกหรอของแม่พิมพ์ต่อไป



รูปที่ 7 (a) ขนาดวัดจากชิ้นงานจริง (b) ขนาดวัดจากแบบจำลอง

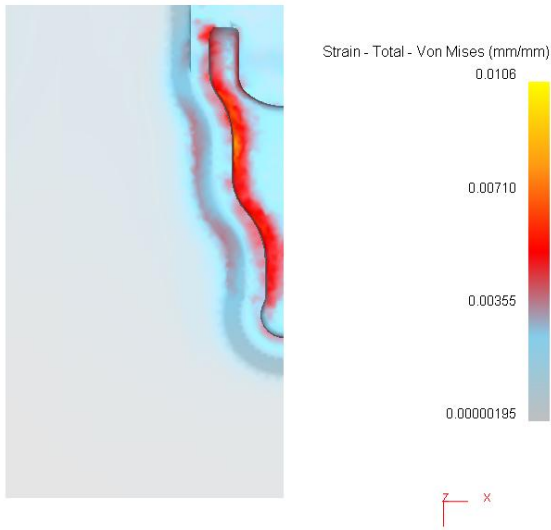
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบการวัดขนาดโดยประมาณของชิ้นงานจริงและแบบจำลอง

	ระยะ A	ระยะ B	ระยะ C
ขนาดชิ้นงานจริง (mm)	59	99	204
ขนาดแบบจำลอง (mm)	53.9	93.47	197.6
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	6.95%	5.59%	3.137%

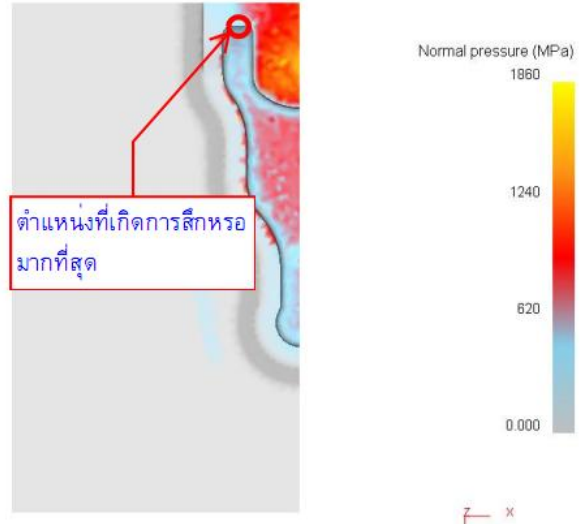




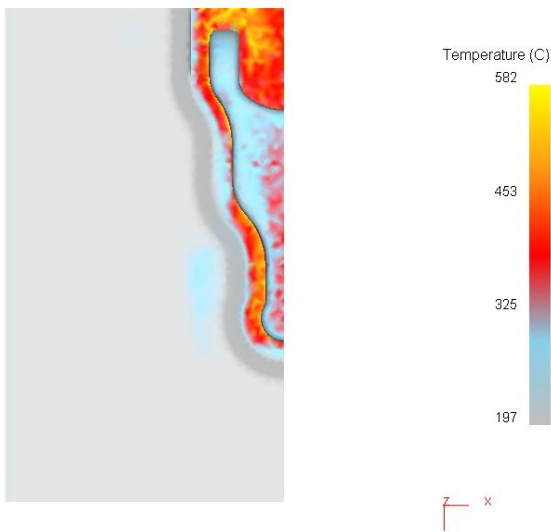
รูปที่ 8 แสดงความเค้นประสิทธิผลที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ตัวบน



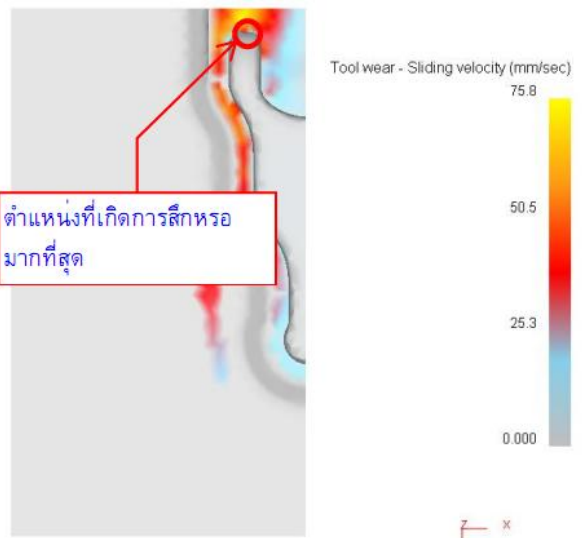
เนื่องจากแต่ละตำแหน่งของแม่พิมพ์มีค่าพิกัดที่ต่างกัน ที่ตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอมากที่สุดนี้มีค่าความเค้นสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไถลสูงสุดประมาณ 900 MPa และ 2000 mm/sec ตามลำดับ จึงนำตำแหน่งนี้มาใช้ในการศึกษาการสึกหรอของแม่พิมพ์ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 9 ความเครียดรวมที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ตัวบน



รูปที่ 11 แสดงความเค้นสัมผัสบนแม่พิมพ์บน

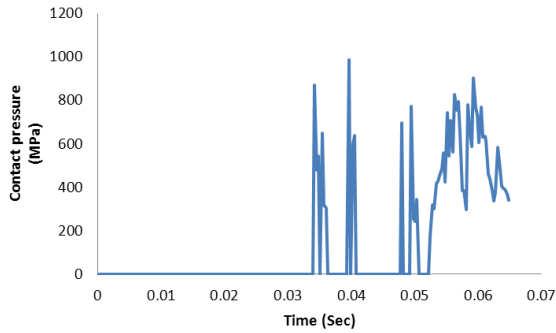


รูปที่ 10 การกระจายตัวของอุณหภูมิบนแม่พิมพ์ตัวบน

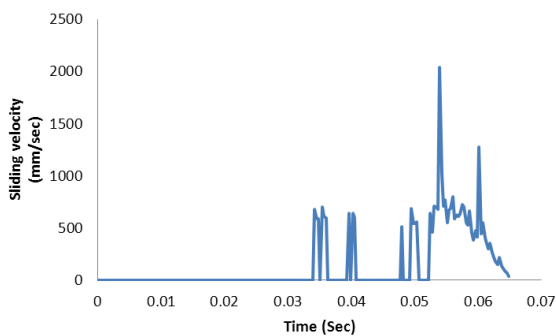
ความเค้นประสิทธิผลสูงสุดและความเครียดรวมเกิดขึ้น ที่บริเวณส่วนโค้งภายในช่องของแม่พิมพ์ซึ่งส่งผลให้แม่พิมพ์อาจเกิดการสึกหรอในรูปแบบอื่นรวมกับการสึกหรอแบบขูดขีด (abrasive wear) แต่ในบทความนี้ให้ความสำคัญกับการสึกหรอแบบขูดขีด ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อการสึกหรอคือความเค้นสัมผัสและความเร็วในการเลื่อนไถล การกระจายตัวของความเค้นสัมผัสแสดงในรูป 11 การสึกหรอของแม่พิมพ์ที่ได้จากการวัดจริงพบว่าแม่พิมพ์เกิดการสึกหรอขึ้นตำแหน่งเดียวกับแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งค่าการสึกหรอเกินค่าพิกัดความเผื่อของแม่พิมพ์

รูปที่ 12 แสดงความเร็วในการเลื่อนไถลบนแม่พิมพ์ตัวบน

โดยค่าที่ได้จากการจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตำแหน่งที่เกิดการสึกหรอนี้ ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณการสึกหรอคือ ความเค้นสัมผัสบนแม่พิมพ์ ความเร็วในการเลื่อนไถล แสดงค่าต่างๆในรูปที่ 13,14 ซึ่งค่าดังกล่าวเกิดขึ้นต่างกันไปในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งส่งผลให้การคำนวณต้องนำผลรวมของแต่ละช่วงเวลามารวมกันเพื่อให้ได้การสึกหรอรวมต่อ 1 รอบการทำงานดังหัวข้อ 3.



รูปที่ 13 แสดงความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นตลอดการทู่ขึ้นรูป



รูปที่ 14 แสดงความเร็วในการเลื่อนไถลที่เกิดขึ้นตลอดการทู่ขึ้นรูปชิ้นงาน

#### 4.2 อายุการใช้งานของแม่พิมพ์

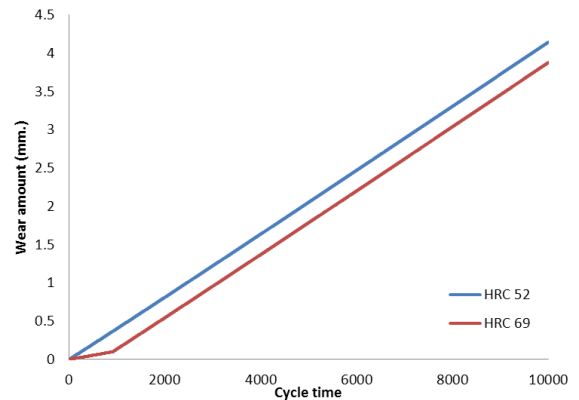
แม่พิมพ์ในกระบวนการทู่ขึ้นรูปร้อนส่วนมากได้ทำการชุบแข็งเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ โดยในบทความนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกระบวนการชุบแข็งแบบชุบทั้งชิ้นและกระบวนการไนตรายดิ่ง ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างชั้นผิวชิ้นงานแข็งสำหรับเหล็กกล้าเพื่อเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงในการล่าของแม่พิมพ์ โดยมีการพิจารณาการซึมลึกของไนตรายดิ่ง เนื่องจากค่าความแข็งของชั้นผิวไนตรายดิ่งจะค่อยๆลดลงจนถึงชั้นความแข็งของเนื้อวัสดุที่ผ่านการชุบแข็งทั้งชิ้น

ในการวิเคราะห์กระบวนการนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งของแม่พิมพ์โดยกำหนดให้ค่าความแข็งของกรรมวิธีการชุบแข็งทั้งชิ้น มีค่าความแข็งประมาณ 52 HRC (ค่าความแข็งของแม่พิมพ์ที่ใช้งานจริง) และกรรมวิธีไนตรายดิ่ง มีค่าความแข็งประมาณ 69 HRC ระยะการซึมลึก 0.1 มิลลิเมตร (ค่าความแข็งของแม่พิมพ์ที่ทำไนตรายดิ่ง ในการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าความแข็งกับ Tempering parameter จากงานวิจัยของ Kang และเป็นค่าที่โรงงานเคยใช้งาน) โดยผ่านการชุบแข็งทั้งชิ้นให้มีค่าความแข็ง 52 HRC ก่อนการทำไน

ตรายดิ่ง โดยตัวแปรในการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของกระบวนการชุบแข็งผิวแม่พิมพ์แสดงในตาราง 3

ตารางที่ 3

สภาวะการชุบแข็งของแม่พิมพ์			
	ค่าความแข็ง (HRC)	การซึมลึก (มม.)	สัมประสิทธิ์การสึกหรอ [3,4] (k)
ชุบแข็งทั้งชิ้น	52	$\infty$	$3.6 \times 10^{-4}$
ไนตรายดิ่ง	69	0.1	$0.7 \times 10^{-4}$



รูปที่ 15 แสดงค่าการสึกหรอของแม่พิมพ์โดยเปรียบเทียบกระบวนการชุบแข็งของแม่พิมพ์

อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้มาจากการคำนวณตามหัวข้อ 3. และใช้ค่าตัวแปรในตารางที่ 3 โดยทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการสึกหรอจริงที่วัดในแม่พิมพ์พบว่าแม่พิมพ์ที่ทำการชุบแข็งทั้งชิ้นมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยสมการการสึกหรอ ซึ่งแม่พิมพ์มีค่าพิกัดบริเวณสึกขायอยู่ที่ 3-4 มม. ก่อนใช้งานแม่พิมพ์มีค่าประมาณ 3 มม. แต่ในทางปฏิบัติหลังผ่านการใช้งานไป 10,000 รอบ พบว่าบริเวณดังกล่าวอยู่ที่ 7-8 มม. ซึ่งผลจากการวัดค่าการสึกหรอหลังใช้งานประมาณ 4.9 มม. และการคำนวณได้ค่า 4.144 มม. คิดค่าความคาดเคลื่อนเป็น 15% เมื่อเทียบกับการสึกหรอที่เกิดขึ้นจริงจึงทำการคำนวณเปรียบเทียบการสึกหรอของแม่พิมพ์ไนตรายดิ่งจะมีช่วงการสึกหรอแบ่งออกเป็น 2 ช่วง แสดงในรูป 15 คือช่วงชั้นผิวไนตราย (จากผิวแม่พิมพ์เริ่มต้นจนเกิดการสึกหรอไม่เกิน 0.1 มม.) และช่วงชั้นชุบแข็ง โดยแต่ละช่วงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอและค่าความแข็งของชั้นผิวแสดงในตารางที่ 3 จากผลการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ที่รอบการใช้งาน 10,000 ครั้ง พบว่าแม่พิมพ์ที่ผ่านการทำไนตรายดิ่งจะมีการสึกหรอประมาณ 3.88

มม. ซึ่งเกิดการสึกหรอน้อยกว่าการชุบแข็งทั้งชิ้นคิดเป็น 6% ซึ่งแสดงว่าแม่พิมพ์ที่ผ่านการไนตรายดิ่งมีอายุการใช้งานที่นานกว่าการชุบแข็งแบบทั้งชิ้น เนื่องจากกรรมวิธีไนตรายดิ่งมีความแข็งที่ผิวที่สูงกว่าและทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าการชุบแข็งทั้งชิ้น จึงสามารถเพิ่มความแข็งได้สูงกว่าการชุบแข็งทั้งชิ้น

### 5. สรุปผลการวิจัย

- การคำนวณหาอายุการใช้งานโดยการเปรียบเทียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ร่วมกับสมการสึกหรอของ Archard โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำงานให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับการสึกหรอจริงที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ การคำนวณหาอายุการใช้งานของแม่พิมพ์หลังผ่านการใช้งานไป 10,000 รอบเปรียบเทียบการชุบแข็งทั้งสองพบว่าแม่พิมพ์ที่ทำไนตรายดิ่งที่ความแข็ง 69 HRC เกิดการสึกหรอประมาณ 3.88 มิลลิเมตร แต่การชุบแข็งทั้งชิ้นที่ความแข็ง 52 HRC เกิดการสึกหรอถึง 4.1445 มิลลิเมตร แสดงว่าแม่พิมพ์ไนตรายดิ่งมีการสึกหรอน้อยกว่าการชุบแข็งทั้งชิ้นประมาณ 6% แม่พิมพ์ที่ดีควรมีค่าความแข็งสูง และควรรักษาความแข็งได้ขณะใช้งานอุณหภูมิสูง ซึ่งกระบวนการชุบแข็งทั้งชิ้นไม่สามารถที่จะทำให้มีค่าความแข็งที่สูงมากนัก เนื่องจากรับแรงกระแทกได้ไม่ดี อาจทำให้เกิดการแตกหักของแม่พิมพ์ได้ ซึ่งการทำไนตรายดิ่งสามารถที่จะรับแรงกระแทกได้ดีกว่า และสามารถเพิ่มค่าความแข็งที่ผิวได้สูงกว่า

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B.-A. Behrens, F. Schaefer, "Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis." Journal of materials Processing Technology 167 (2005) 309-315
- [2] KIM, D.H., LEE, H.C., KIM, B.M. and KIM, K.H., 2005, "Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes", Journal of Materials Processing Technology 166, pp372-38
- [3] Kang, J.H., Park, I.W., et al. (1999), A study on a die wear model considering thermal softening: (I) construction of the wear model, Journal of Materials Processing Technology 96, pp53-58
- [4] Kang, J.H., Park, I.W., et al. (1999), A study on a die wear model considering thermal softening:

(II), Application of the suggested wear model, Journal of Materials Processing Technology 94, pp183-188

[5] Archard, J.H., Contact and rubbing of flat surfaces, J. Appl. Phys. (1953) 981-988.

[6] B. Painter, R. Shivpuri, T. Altan, "Prediction of die wear during hot-extrusion of engine valves." Journal of Materials Processing Technology 59 (1996): 132-143

[7] Tulsyan, R. and Shivpuri, R., 1995, "Computer modeling of wear in extrusion and forging of automotive exhaust valves", Journal of Materials Engineering and Performance vol.4(2), April 1995, pp161-165

[8] Lee, R.S. and Jou, J.L., 2003, "Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die", Journal of Materials Processing Technology 14, pp43-48