

การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงกดแม่พิมพ์กับแรงบิดของมอเตอร์เซอร์โว
สำหรับเครื่องปั๊มกลไกแบบมอเตอร์เซอร์โว

A Study of Die Pressing Force and Servo Motor Torque
Relation of Servo Mechanical Press Machine

จารุพล พัดสา¹, ชนะ รัชศิริ^{2*}

¹ นิสิต สาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เขตบางเขน แขวงจตุจักร กทม. 10900

² อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตบางเขน แขวงจตุจักร กทม. 10900

*ติดต่อ: fengcnr@ku.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 02-797-0999 ต่อ 1603

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการสำหรับขึ้นรูปโลหะแผ่นมีหลายแบบ เช่น กระบวนการหล่อ กระบวนการทุบขึ้นรูป กระบวนการกัดแต่ง และกระบวนการปั๊มขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการปั๊มขึ้นรูปมีความสมบูรณ์ มีขนาดเดียวกัน มีความแข็งแรง ส่งผลให้มีอัตราการผลิตสูง ดังนั้นกระบวนการปั๊มขึ้นรูปจึงเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่นที่ซับซ้อน จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปั๊มกลไกแบบมอเตอร์เซอร์โวโดยสมการจลศาสตร์ ผลจากการจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปั๊มกลไกแบบมอเตอร์เซอร์โว ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปตัวอย่างขึ้นงานโลหะแบบถ้วย และแสดงความสัมพันธ์ของการกระจัด ความเร็ว ความเร่งของ Ram/Slide มุมหมุน ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุมของเพลาค้อนเหวี่ยง แรงกดแม่พิมพ์และแรงบิดเพลาค้อนเหวี่ยง ตามลำดับ แรงบิดเพลาค้อนเหวี่ยงสำหรับการขึ้นรูปตัวอย่างขึ้นงานโลหะแบบถ้วยจากมอเตอร์เซอร์โว คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปั๊มกลไกแบบมอเตอร์เซอร์โว

คำหลัก: เครื่องปั๊มกลไกแบบมอเตอร์เซอร์โว กลไกเครื่องเพรสแบบข้อเหวี่ยง จลศาสตร์ผกผัน แรงกดแม่พิมพ์

Abstract

Nowadays, the process for sheet metal forming has many types i.e. casting process, forging process, machining process and stamping/forming process. The products by stamping/forming process were complete, same size and strength as a result to high production rate. Therefore, stamping/forming process is suited for complex metal sheet forming. The objective of this research is deriving mathematical model of servo motor mechanical press machines by Dynamic equation. The results from mathematical model simulation of servo motor mechanical press machines was applied with example sheet metal cup and showed the relation of displacement, velocity, acceleration of

ram/slide, angular, angular velocity of crankshaft, slide press force and crank torque, respectively. The example sheet metal cup forming crank torque required from servo motor was calculated from proposed mathematical model of servo motor mechanical press machines.

Keywords: servo press machine, crank press mechanical, inverse kinematic, die pressing force

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการขึ้นรูปโลหะนั้นมีหลากหลายกระบวนการ เช่นกระบวนการหล่อ (Casting process) กระบวนการทุบขึ้นรูป (Forging process) กระบวนการกัดแต่ง (Machining process) กระบวนการปั๊มขึ้นรูป (Stamping/Forming process) และกระบวนการอื่นๆ อีกมากมาย แต่กระบวนการปั๊มขึ้นรูปโลหะ (Stamping/Forming process) มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่ากระบวนการขึ้นรูปแบบอื่นๆ คือ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ ไม่จำเป็นต้องตกแต่งชิ้นงานหลังจากการขึ้นรูป ขนาดของชิ้นงานเท่ากัน และมีความแข็งแรงส่งผลให้อัตราการผลิตสูง

กระบวนการปั๊มขึ้นรูปโลหะแผ่น (Stamping/Forming process) แบ่งออกได้เป็น 3 กรรมวิธีพื้นฐานหลักคือ กระบวนการการตัดเฉือน (Blanking process /Piercing process) กระบวนการพับขึ้นรูป (Bending process) และกระบวนการลากขึ้นรูปลึก (Deep drawing process) กระบวนการของการปั๊มขึ้นรูปโลหะแผ่นนั้นจะต้องเลือกใช้ชนิดเครื่องปั๊ม (Press machine) ในการปั๊มขึ้นรูปที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะชิ้นงานที่ต้องการ โดยเครื่องปั๊ม (Press machine) ที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นมีหลากหลายชนิด ซึ่งเครื่องปั๊มแต่ละชนิดก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน

เครื่องปั๊มโลหะแยกออกตามประเภทของการกลไก ในการส่งกำลังขับเคลื่อนเครื่องจักรได้ 3 แบบคือ เครื่องปั๊มแบบไฮดรอลิก (Hydraulic presses) เครื่องปั๊มแบบ

กลไก (Mechanical press) และเครื่องปั๊มแบบเซอร์โว (Servo presses) [1]

การขึ้นรูปลึก (Deep drawing) เป็นการนำโลหะแผ่นมาขึ้นรูปด้วย กล้อง หลุมหรือรวมกันหลายแบบ โดยการนำแผ่นงาน (Blank) มากดด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งการขึ้นรูปต้องใช้เทคนิคและความชำนาญของผู้ออกแบบแม่พิมพ์ และผู้ปฏิบัติงาน ระยะเผื่อ (Clearance) รัศมีมุมของ Punch และ Die รวมทั้งแรงกดแผ่นงานต้องพอเหมาะ จึงจะได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตามที่ต้องการ

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงานของกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นมีหลายปัจจัย เช่น เหล็กแผ่นหรือวัสดุตั้งต้น ความเร็วของกระบวนการขึ้นรูป ชนิดของเครื่องปั๊ม (Press machine) โดยเฉพาะเครื่องปั๊มที่เป็นแหล่งกำเนิดแรงในการขึ้นรูป ซึ่งต้องมีต้นกำลังจากแรงบิดของมอเตอร์ในเครื่องปั๊มและเปลี่ยนเป็นแรงกดแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น โดยแรงกดแม่พิมพ์นี้ต้องสัมพันธ์กับแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะแผ่น

แรงกดแม่พิมพ์ มีความสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะ เนื่องจากเป็นแรงที่กระทำกับแม่พิมพ์ เพื่อไปกดโลหะแผ่นให้ได้ชิ้นงานที่ตรงตามความต้องการ สำหรับเครื่องปั๊มที่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่นได้หลากหลายแบบนั้น จะต้องสามารถสร้างพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูป เช่น แรงบิดเพื่อให้เกิดแรงกดที่แม่พิมพ์ ความเร็วกำลังอื่นๆ ที่จำเป็นในการขึ้นรูปได้ครบถ้วน และครอบคลุมทุกรูปแบบของการขึ้นรูป โดยหนึ่งในหลายชนิดของเครื่องปั๊มที่สามารถสร้างพารามิเตอร์ที่ครอบคลุมทุกรูปแบบของกระบวนการการขึ้นรูปโลหะแผ่นคือ เครื่องปั๊มแบบเซอร์วอมอเตอร์ สำหรับแรงบิด

ของมอเตอร์เซอร์โว มีความสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูป โดยเป็นต้นกำลังของแรงจากเครื่องปั๊มเพื่อแปรเปลี่ยนไปเป็นแรงในการกดแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปโลหะแผ่น ซึ่งถ้าหากแรงกดแม่พิมพ์และแรงบิดมอเตอร์ไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้ชิ้นงานเสียหาย หรือได้ชิ้นงานที่ไม่มีคุณภาพและไม่ตรงตามที่ต้องการ

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) เป็นเทคนิควิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับใช้แก้ปัญหาทางวิศวกรรมภายใต้ชุดของสมการเชิงอนุพันธ์ พร้อมๆ กับสมการปริพันธ์ [2] และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อน ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของของแข็ง ทั้งทางด้านสถิตศาสตร์และทางด้านพลศาสตร์ รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์การไหลของของไหลได้

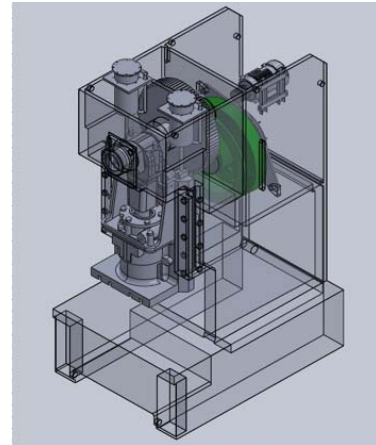
ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้จึงมีความสนใจในการศึกษาหาความสัมพันธ์ของแรงในการกดแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานกับแรงบิดจากกลไกของเครื่องปั๊มที่ใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นต้นกำลัง โดยใช้กระบวนการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และอธิบายการทำงานของกลไกเครื่องปั๊มแบบมอเตอร์เซอร์โว เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกขนาดเซอร์โวมอเตอร์ให้เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่น เพื่อลดชิ้นงานที่เสียหาย และให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพตรงตามที่ต้องการ รวมทั้งเหมาะสมกับการขึ้นรูปโลหะที่หลากหลายต่อไป

2. ทฤษฎีและสมการทางคิเนแมติกส์

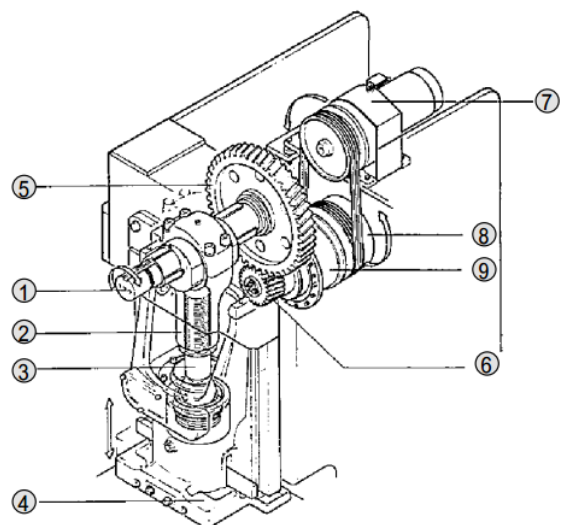
ของเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง (Crank Press)

เครื่องปั๊มโลหะที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการกระจัด (Displacement) ความเร็ว (Velocity) ความเร่ง (Acceleration) มุม (Angular) ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration) และแรงบิด (Torque) เป็นเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง (Crank Press Machine)

แสดงในรูปที่ 1 นิยมใช้ในเครื่องปั๊มสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานโลหะแผ่น มีความเร็วในการขึ้นรูปชิ้นงานสูง ซึ่งส่วนประกอบเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 2 และการทำงานของกลไกข้อเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 3

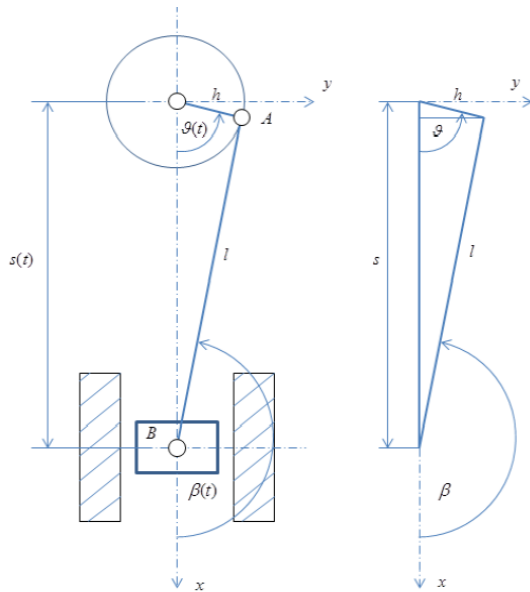


รูปที่ 1 เครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง



- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1. Crankshaft | 6. Drive Pinion |
| 2. Connecting Strap | 7. Main Motor |
| 3. Connecting Screw | 8. Flywheel |
| 4. Ram/Slide | 9. Wet Clutch-Brake |
| 5. Main Gear | |

รูปที่ 2 ส่วนประกอบเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง [3]



รูปที่ 3 การทำงานของกลไกแบบข้อเหวี่ยง [4]

การคำนวณ การกระจัด ความเร็ว ความเร่ง มุมหมุน ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุมและแรงบิดของเพลาค้อนเหวี่ยง โดยใช้สมการจาก Gotlih และคณะ [4]

ระยะการเคลื่อนที่ของ ram เครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยงที่เวลาใดๆ หาได้จากสมการที่ (1) โดย

$$s(t) = h + h \cdot \cos[2\pi ft] \quad (1)$$

โดยที่ $s(t)$ คือ ระยะการเคลื่อนที่ของ ram ที่เวลาใดๆ (m)

h คือ รัศมีของเพลาค้อนเหวี่ยง (m)

f คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่ของ ram (rpm)

t คือ เวลา (s)

ความเร็วของของ ram หาได้จากสมการที่ (2)

$$v = \left(\frac{s}{t} \right) \quad (2)$$

โดยที่ v คือ ความเร็วของ ram (m/s)

ความเร่งของของ ram หาได้จากสมการที่ (3)

$$a = \left(\frac{v}{t} \right) \quad (3)$$

โดยที่ a คือ ความเร่งของ ram (m/s^2)

มุม Crankshaft $\theta(t)$ ของเครื่องปั๊มที่เวลาใดๆ หาได้จากสมการที่ (4)

$$\theta(t) = \arccos \left[\frac{h^2 + (s(t) + l - h)^2 - l^2}{2h(s(t) + l - h)} \right] \quad (4)$$

โดยที่ $\theta(t)$ คือ มุมของ Crankshaft (Degree)

l คือ ความยาวของ Connecting rod (m)

ความเร็วเชิงมุม Crankshaft $\dot{\theta}(t)$ ของเครื่องปั๊มที่เวลาใดๆ หาได้จากสมการที่ (5)

$$\dot{\theta}(t) = - \frac{2\pi f \left(-2 + \frac{h(h + 2l \cos[2\pi ft] + h \cos[2\pi ft]^2)}{(l + h \cos[2\pi ft])^2} \right) \sin[2\pi ft]}{2 \sqrt{1 - \frac{(h + 2l \cos[2\pi ft] + h \cos[2\pi ft]^2)^2}{4(l + h \cos[2\pi ft])^2}}} \quad (5)$$

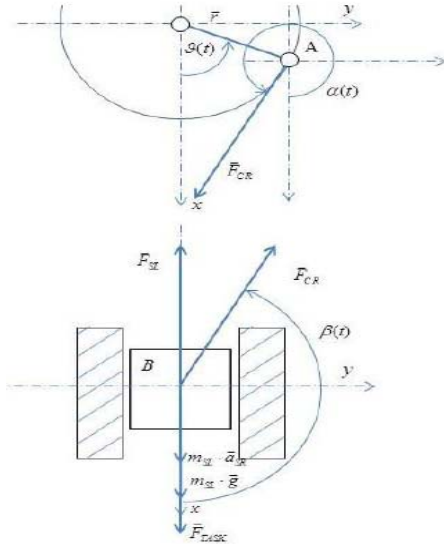
โดยที่ $\dot{\theta}(t)$ คือ ความเร็วเชิงมุมของ Crankshaft (Degree/s) ที่เวลาใดๆ

ความเร่งเชิงมุม Crankshaft $\ddot{\theta}(t)$ ของเครื่องปั๊มที่เวลาใดๆ หาได้จากสมการที่ (6)

$$\ddot{\theta}(t) = - \frac{h(2\pi f)^2 \sin^4(2\pi ft) (-2h^4 + h^3 l \cos(6\pi ft) + 2h^2(h^2 + 2l^2) \cos(4\pi ft) + h l(23h^2 - 8l^2) \cos(2\pi ft) + 28h^2 l^2 - 16l^4)}{\sqrt{2} (h \cos(2\pi ft) + l)^5 \left(\frac{\sin^2(2\pi ft) (h^2 \cos(4\pi ft) - h^2 + 8hl \cos(2\pi ft) + 8l^2)}{(h \cos(2\pi ft) + l)^2} \right)^{3/2}} \quad (6)$$

โดยที่ $\ddot{\theta}(t)$ คือ ความเร่งเชิงมุมของ Crankshaft (Degree/s²)

แรงที่เกิดขึ้นทั้งหมดในระบบ Slide-Crank
แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แรงในระบบ Slide-Crank ที่จุดต่อ A และ B

แรงบิดที่เกิดขึ้นบนเพลาค้อเหวี่ยง (Crankshaft)
เป็นแรงที่เกิดขึ้นบน Connecting Rod

แรงเฉื่อยจากชิ้นส่วนที่มีการหมุนโดยเซอร์โวมอเตอร์ หาได้จากสมการที่ (7)

$$\vec{M}_{SL} = \vec{r} \times \vec{F}_{CR} + \underline{J}_{rot} \ddot{\theta}(t) \quad (7)$$

โดยที่

$$\vec{r} = \begin{Bmatrix} h \cos \theta(t) \\ h \sin \theta(t) \\ 0 \end{Bmatrix}, \vec{F}_{CR} = \begin{Bmatrix} F_{CR} \cos \beta(t) \\ F_{CR} \sin \beta(t) \\ 0 \end{Bmatrix}, \ddot{\theta}(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix}$$

เมื่อ

$\vec{M}_{SL}$ คือ แรงบิดในการหมุนเพลาค้อเหวี่ยง (N.m)

$\vec{r}$ คือ รัศมีของเพลาค้อเหวี่ยง (m)

F_{CR} คือ แรงบน Connecting Rod (N)

$\underline{J}_{rot}$ คือ Mass inertia tensor ของเซอร์โวมอเตอร์ (Kg.m^2)

$\beta(t)$ คือ มุมของแรงตามการเคลื่อนที่ของ
Connecting Rod (Degree)

$\ddot{\theta}(t)$ คือ ความเร่งเชิงมุมของ Crankshaft
(Degree/s²)

โดยแรง F_{CR} หาได้จากสมการที่ (8)

$$F_{CR} = \frac{F_{SLx}}{\cos \beta(t)} \quad (8)$$

แรง $\vec{F}_{SL}$ บน Ram/Slider เป็นเวกเตอร์รวมจากน้ำหนักของ Ram/Slider แรงเฉื่อยของ Ram/Slider และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (9)

$$\vec{F}_{SL} = m_{SL} \vec{g} + m_{SL} \vec{a}_{SL} + \vec{F}_{TASK} = \begin{Bmatrix} F_{SLx} \\ F_{SLy} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

โดยที่ $\vec{F}_{SL}$ คือ ผลรวมของแรงจากมวลของ Ram/Slider
คูณแรงโน้มถ่วงของโลก แรงจากมวลของ Ram/Slider
คูณความเร่ง และแรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

m_{SL} คือ มวลของชุด Ram/Slider (Kg)

$\vec{g}$ คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81
m/s²)

$\vec{a}_{SL}$ คือ ความเร่งจากการเคลื่อนที่ของ
Ram/Slider (m/s²)

$\vec{F}_{TASK}$ คือ แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน (N)

จากสมการที่ (7) เมื่อทำการรวมเวกเตอร์ของ
แรงบิด $\vec{M}_{SL}$ ตามรูปที่ 4 จะได้ดังสมการที่ (10,11,12)

$$M_{SL} = (F_{CR} \cos \beta(t))(r \sin \theta(t)) + (F_{CR} \sin \beta(t))(r \cos \theta(t)) + \underline{J}_{rot} \ddot{\theta}(t) \quad (10)$$

$$M_{SL} = F_{CR} \cdot r \cdot (\sin \theta(t) \cos \beta(t) + \sin \beta(t) \cos \theta(t)) + \underline{J}_{rot} \ddot{\theta}(t) \quad (11)$$

$$M_{SL} = \left(\frac{m_{SL}g + m_{SL}a_{SL} + F_{TASK}}{\cos\beta(t)} \right) \cdot r \cdot (\sin\theta(t)\cos\beta(t) + \sin\beta(t)\cos\theta(t)) + J_{rot}\ddot{\theta}(t) \quad (12)$$

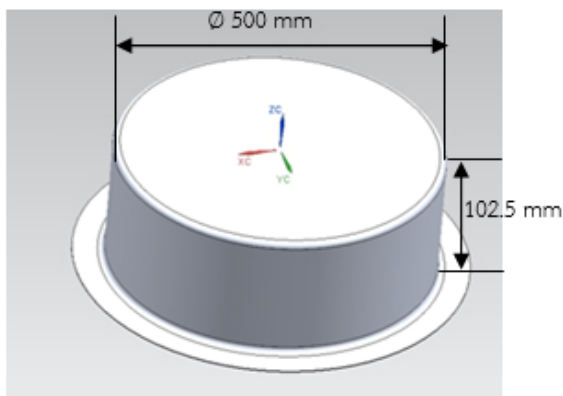
โดยที่

$$\beta(t) = \arcsin\left(\frac{h \sin \theta(t)}{l}\right)$$

3. วิธีการหาแรงในการขึ้นรูปและความสัมพันธ์ของ ระยะทาง ความเร็ว ความเร่ง มุม ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และแรงบิดของเครื่องปั๊มกลไก แบบข้อเหวี่ยง

3.1 การทำแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาแรง
ในการขึ้นรูปโลหะแผ่นแสดงดังรูปที่ 5

- วัสดุ : เหล็กแผ่น SPCC ซึ่งมีคุณสมบัติดัง JIS G3141
- ค่าความต้านทานแรงดึง : 270 N/mm^2
- เปอร์เซนต์การยืด : 39%
- ส่วนประกอบทางเคมี : C = 0.12%, Mn = 0.5%,
P = 0.04%, S = 0.045%
- ความหนา : 2.5 mm.
- รูปร่างและขนาดการขึ้นรูป : ขึ้นงานรูปถ้วย
เส้นผ่าศูนย์กลาง 505 mm, ความลึก 102.5 mm
- กระบวนการขึ้นรูป : การขึ้นรูปลึก



รูปที่ 5 แบบขึ้นงานจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การทำแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์นี้
เพื่อทดสอบหาแรงในการขึ้นรูปของชิ้นงานโลหะแผ่นจาก
การหมุนของ Crankshaft ที่มีมุม $\theta(t)$ ใดๆ ซึ่งจะได้แรง
 F_{TASK} ที่มีมุม $\theta(t)$ ใดๆ ในการคำนวณความสัมพันธ์ของ
เครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง เพื่อสามารถคำนวณหา
แรงบิดในการขึ้นรูป

3.2 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของของเครื่องปั๊มกลไก
แบบข้อเหวี่ยง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- เครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง ขนาด : 200 Ton

- รัศมีของ Crankshaft (h, r) : 0.25 m

- ความยาวของ Connecting Rod (l) : 1.480 m

- ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

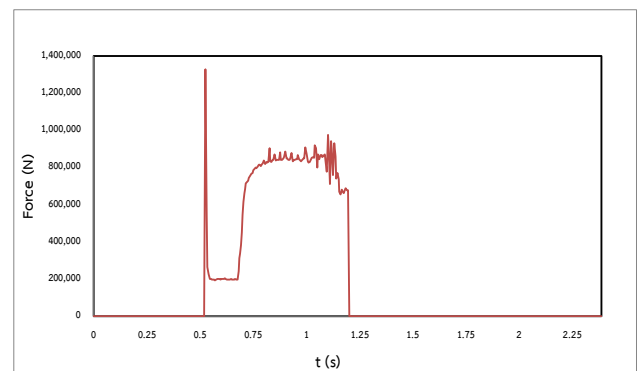
- Mass inertia tensor ของเซอร์โวมอเตอร์

$$(J_{rot} = 30,000 \text{ Kg.m}^2)$$

โดยการปรับเปลี่ยนค่ามุมของ Crankshaft ที่
เวลา (t) ใดๆ เพื่อหาหะการเคลื่อนที่ ความเร็ว
ความเร่ง มุม ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม แรงบิด
ของเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง

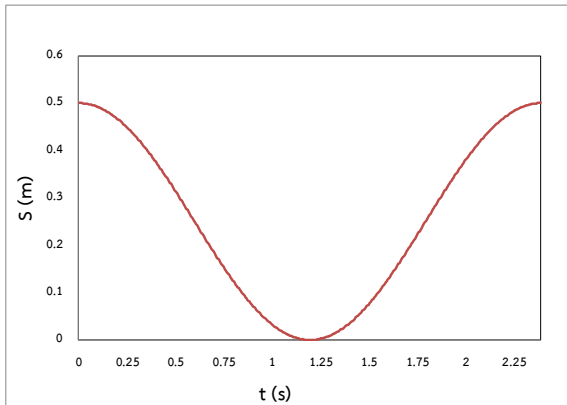
4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการทำแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหา
แรงในการขึ้นรูปโลหะแผ่นดังรูปที่ 6 แรงในการขึ้นรูป
โลหะแผ่น F_{TASK} ที่มีมุม $\theta(t)$ ใดๆ ของ Crankshaft
โดยแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิ
เมนต์เท่ากับ 1,330 KN

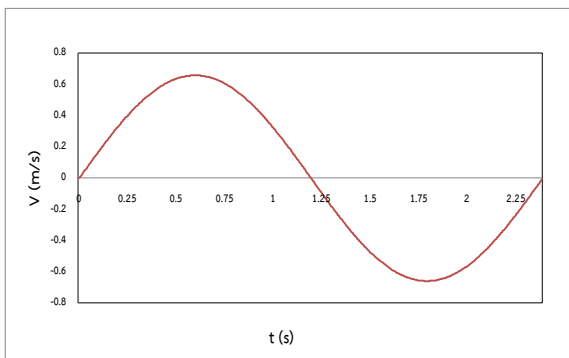


รูปที่ 6 แรง F_{TASK} ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

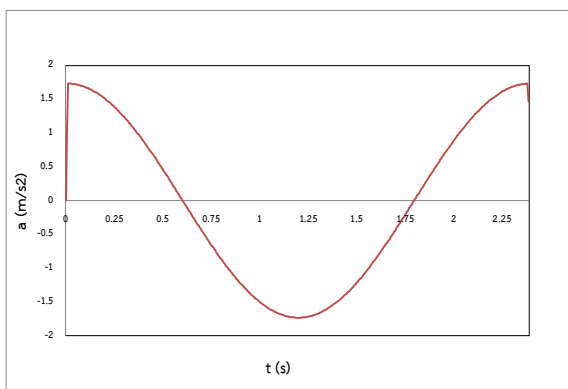
4.2 ผลการคำนวณหาความสัมพันธ์ของของเครื่องปั๊ม
กลไกแบบข้อเหวี่ยง โดยการปรับเปลี่ยนค่ามุมของ
Crankshaft ที่เวลา (t) ใดๆ แสดงดังรูปที่ 7, 8, 9, 10,
11, 12, 13 โดยแรงบิดที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ
56,000 KN.m (รูปที่ 13)



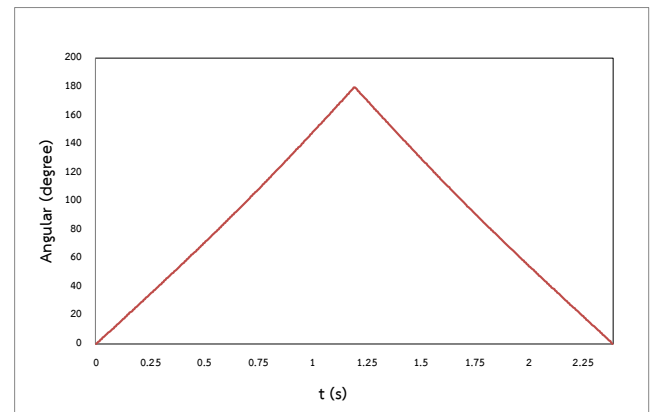
รูปที่ 7 แสดงการกระจัดของ Ram/Slide



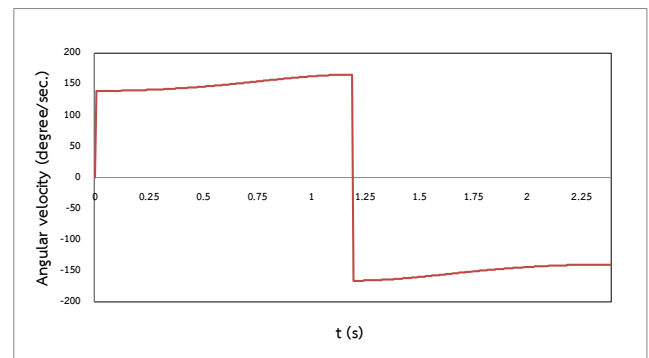
รูปที่ 8 แสดงความเร็วของ Ram



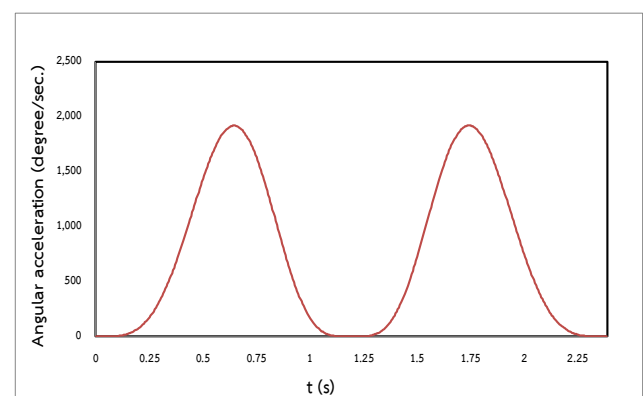
รูปที่ 9 แสดงความเร่งของ Ram



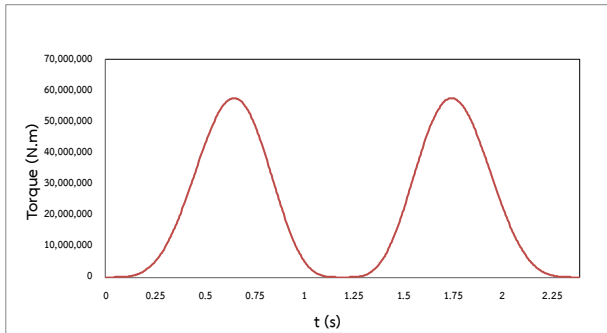
รูปที่ 10 แสดงมุมการหมุนของ Crankshaft



รูปที่ 11 แสดงความเร็วเชิงมุมของ Crankshaft



รูปที่ 12 แสดงความเร่งเชิงมุมของ Crankshaft



รูปที่ 13 แสดงแรงบิดของ Crankshaft

5. สรุป

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างแรงกดแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปขึ้นงานกับแรงบิดของมอเตอร์เซอร์โว โดยสมการความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่ ความเร็ว ความเร่งของ ram/slider มุม ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุมของเพลาค้อนเหวี่ยงในเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยง จากความสัมพันธ์ของแรงกดแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปและสมการต่างๆ สามารถคำนวณหาแรงบิดเซอร์โวมอเตอร์ของเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยงขนาด 200 Ton ที่แรงในการขึ้นรูปขึ้นงาน 1,330 KN ได้เท่ากับ 56,000 KN.m ซึ่งจะประโยชน์ในการเลือกเซอร์โวมอเตอร์เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องปั๊มกลไกแบบข้อเหวี่ยงได้แม่นยำมากยิ่งขึ้นต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ. ดร.ชนะ รักศิริ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการทำงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณการสนับสนุนงานวิจัยจากสาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Preechatham, D. (2015). *Sheet Metal*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.asiabizconnect.com/articles/presses_Comparison-APM1371.pdf?utm_source=ZohoCampaigns&utm_campaign=APM%20E-Newsletter%20Feb-015%20Issue%20No.3_2015-02-04&utm_medium=email, เข้าดูเมื่อวันที่ 20/07/2558.
- [2] Quek, S. and Liu, G.R. (2013). *The Finite Element Method*, 2nd Edition, ISBN: 9780080994413, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [3] อำนาจ แก้วสามัคคี (2551). *ความสำคัญของค่าตายไฮต์ ดายชัตไฮต์ และเพรลชัตไฮต์ในงานปั๊มตัดเฉือนขึ้นรูปวัสดุ*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/p50-58.pdf, เข้าดูเมื่อวันที่ 7/04/2559.
- [4] Gotlih, K., Pahole, I. and Karner, T. (2015). Co-simulation of a crank-slider servo mechanism, paper presented in the 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan.
- [5] Japanese industrial standard (G3141)