

การออกแบบสร้างเครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแบบไฮดรอลิกส์ ขนาดเล็กที่มีแรงกดไม่เกิน 10 ตันแบบมีดายน์คูชั่น

Design and Building of 10 Tons Hydraulic Press Machine with Die Cushion

ศรายุทธ นิลเนตร^{1,a}, เขมจิต เสนา^{1,b}, สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

^aโทร. 085-0101808 ^bโทรสาร 043-202849 อีเมล ^asarayut.n@kkumail.com ^bskhema@kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแผ่นแบบไฮดรอลิกส์ขนาดเล็กที่มีแรงกดไม่เกิน 10 ตันแบบมีดายน์คูชั่นเพื่อใช้ในการวิจัยทางด้านการขึ้นรูปโลหะแผ่น(Sheet metal forming) สามารถปรับแรงกดที่ขนาดไม่เกิน 10 ตัน ปรับแรงจับยึดชิ้นงาน(Blank holder force) โดยใช้ดายน์คูชั่น อีกทั้งยังปรับความเร็วในการกดชิ้นงานได้ การออกแบบได้มีการคำนวณเพื่อตรวจสอบความแข็งแรง และความปลอดภัยในการใช้งานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และใช้ซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการออกแบบวงจรไฮดรอลิกส์ การคำนวณทั้งหมดได้จำลองภาระแรงกระทำที่เกิดขึ้นในขณะทำงาน คือภาระแรงที่กระทำต่อโครงสร้างและชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งผลการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วงสภาวะยืดหยุ่น จากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ได้ เครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะที่สามารถทดสอบการขึ้นรูปโลหะแผ่นในกระบวนการดัดขึ้นรูปที่สามารถปรับค่าตัวแปร ความเร็วในการกด แรงกด และแรงจับยึดชิ้นงาน

คำหลัก:เครื่องเพรสไฮดรอลิกส์, เครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแผ่น, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, ดายน์คูชั่น

Abstract

This article presents the design and the building a hydraulic press machine which have a diminutive size and the force is not exceed to 10 tons with Die cushion. This machine used for research in the sheet metal forming field. Blank holder and pressing speed can be adjusted by Die cushion. Its design and safety was calculated for the strength checking by Finite element method to simulated stress contour occurred in structure, the software was used to design the hydraulic system. All of calculation had simulated occurrence forces while working, load forces worked on its structure and components. The result of the simulation is less than the yield point. From this study, we got a hydraulic press machine that can be tested in a sheet metal forming and deep drawing process such as the speed of pressing, pressing force and Blank holder force.

Keywords: Hydraulic Press Machine, Sheet Metal Forming Machine, Finite Element Method, Die Cushion

1. บทนำ

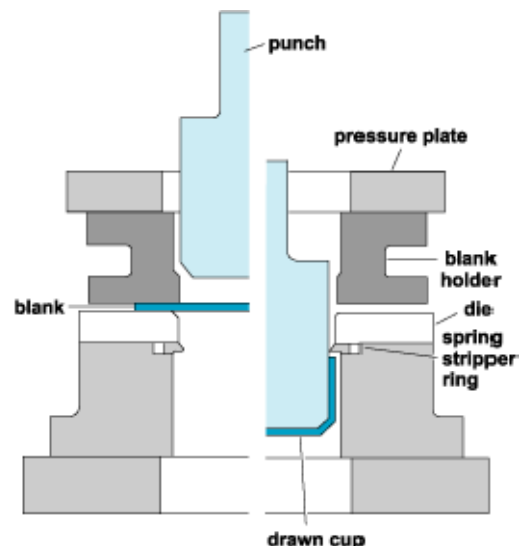
ในปัจจุบันการขึ้นรูปโลหะแผ่น (Sheet metal forming) มีความสำคัญอย่างมากในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางการแพทย์ ภาชนะเครื่องครัวและอื่นๆ เพราะชิ้นส่วนที่ทำจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะแผ่นจะมีน้ำหนักเบาและแข็งแรง ดังนั้นอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นที่จะต้องใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นซึ่งจะมีอยู่หลายกรรมวิธีด้วยกันและการดึงขึ้นรูป (Deep drawing) เป็นวิธีหนึ่งในการขึ้นรูปโลหะแผ่น ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก การดึงขึ้นรูปมักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับความเสียหายในกระบวนการผลิต เช่นเกิดการฉีกขาดของชิ้นงาน (Tearing) เกิดการย่นที่ขอบของชิ้นงาน (Wrinkling) เกิดการคอด (Necking) และการดีดกลับ (Spring-back) จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการแก้ปัญหาต่างๆ เช่น การหาค่าที่เหมาะสมของแรงในการจับยึดชิ้นงาน (Blank holder force) ในแต่ละกระบวนการ การหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เหมาะสมที่ใช้ในการดึงขึ้นรูป การศึกษาชนิดของสารหล่อลื่น และตำแหน่งที่ใช้สารหล่อลื่น และถ้าชิ้นงานไม่เป็นแบบสมมาตรจะมีการนำวิธี ดรอว์บีด (Draw bead) มาใช้และนอกจากนี้ยังมีการศึกษา แรงจับยึดชิ้นงานที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของขอบชิ้นงาน (Multi-point Blank holder forces) เพื่อควบคุมการไหลของวัสดุ เป็นแนวทางใหม่ที่มีการศึกษาและวิจัยเพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดกับกระบวนการผลิต ลดรอยย่นและการฉีกขาดของชิ้นงานขณะขึ้นรูป

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้พัฒนาเครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแบบไฮดรอลิกส์ขนาดเล็กที่มีแรงกดไม่เกิน 10 ตันแบบมีดายน้ําคูชั้น สามารถทดสอบเพื่อใช้งานวิจัยทางด้าน การขึ้นรูปโลหะแผ่น การดึงขึ้นรูปลึก ที่มีแรงจับยึดชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน เพื่อควบคุมการไหลของวัสดุ โดยมีแผ่นจับยึดชิ้นงาน (Blank holder) และดายน้ําคูชั้น ซึ่งเครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแบบไฮดรอลิกส์ขนาดเล็กทั่วไปจะไม่มีดายน้ําคูชั้นจึงไม่มีแผ่นจับยึดชิ้นงานทำให้ไม่สามารถทำการดึงขึ้นรูปลึกได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดึงขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

การดึงขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) เป็นการขึ้นรูปชิ้นงานโดยไม่เกิดตะเข็บจะเริ่มจากการเตรียมโลหะแผ่น (Blank) และแม่พิมพ์ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือ หัวกดชิ้นงาน (Punch) แม่พิมพ์ (Die) และตัวจับยึด (Blank Holder) ดังรูปที่ 1 หลังจากนั้นหัวกดชิ้นงานจะเคลื่อนที่ลงมาพาโลหะแผ่นไปสัมผัสกับแม่พิมพ์ทำให้โลหะแผ่นมีรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์แรงจากเครื่องเพรส จะถูกส่งผ่านพันธเพื่อโลหะไหลตัวเข้าไปในช่องตาย ขณะเดียวกันก็มีแรงกดอยู่บนแผ่นจับชิ้นงานเพื่อควบคุมการไหลตัวของโลหะแผ่น



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

2.2 แรงกดบนแผ่นจับชิ้นงาน

ขณะที่ทำการดึงขึ้นรูปจะเกิดความเค้นอัดในแนวเส้นรอบวงที่บริเวณปีกของถ้วย การใช้แผ่นจับชิ้นงานกดบนบริเวณนี้จะช่วยลดปัญหาการเกิดรอยย่นซึ่งขนาดของแรงกดที่ใช้ต้องมีความเหมาะสม ถ้าแรงกดน้อยเกินไป จะส่งผลให้เกิดรอยย่นบนปีก และเกิดความเสียหายกับชิ้นงาน ในทางตรงกันข้าม ถ้าใช้แรงกดบนแผ่นจับชิ้นงานมากเกินไป จะทำให้เกิดการฉีกขาดบริเวณผนังถ้วยบริเวณเหนือรีตัมมีพันธขึ้นมามากน้อย

ขนาดของแรงดันในการกดแผ่นจับขึ้นงานที่เหมาะสมคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$P_{BH} = 10^{-3} C \left[(\beta - 1)^3 + \frac{0.005 d_0}{T} \right] \sigma_u \quad (1)$$

เมื่อ

P_{BH} คือแรงดันในการกดแผ่นจับยึดขึ้นงาน (N/mm^2)

$\beta = \frac{d_0}{d_1}$ คืออัตราส่วนการดัดขึ้นรูป

d_0 คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่า (mm)

T คือความหนาของแผ่นโลหะ (mm)

σ_u คือค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ (Ultimate Tensile Strength) (N/mm^2)

C คือค่าคงที่ มีค่าระหว่าง 2-3

ดังนั้น แรงกดบนแผ่นจับขึ้นงานคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$F_{BH} = P_{BH} \times A_{BH} \quad (2)$$

เมื่อ

F_{BH} คือแรงกดบนแผ่นจับขึ้นงาน (N)

A_{BH} คือพื้นที่บริเวณปีกที่แผ่นจับขึ้นงานกดอยู่ (mm^2)

2.3 แรงสูงสุดในการดัดขึ้นรูป

Siebel และ Beisswanger ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าแรงสูงสุดในการขึ้นรูปดังสมการที่ 3

$$F_{max} = \pi d_m T \left[1.1 \frac{1.3 \sigma_u}{\eta_{def}} \left(\ln \frac{d_0}{d_1} - 0.25 \right) \right] \quad (3)$$

เมื่อ

F_{max} คือแรงสูงสุดในการดัดขึ้นรูป (N)

d_m คือเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ้วย (mm)

T คือความหนาของแผ่นโลหะ (mm)

σ_u คือค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ (N/mm^2)

d_0 คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะเปล่า (mm)

d_1 คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพินช์ (mm)

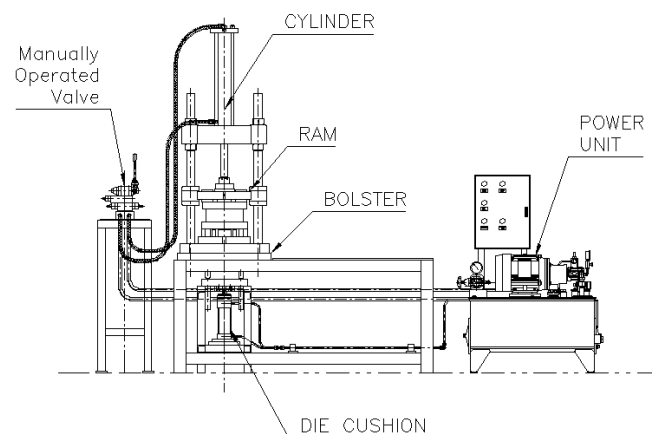
η_{def} คือค่าประสิทธิภาพในการดัดขึ้นรูป กำหนดให้มีค่า ระหว่าง 0.5 – 0.7

3. การออกแบบเครื่องเพรสแบบไฮดรอลิกส์

เครื่องเพรสจะมีส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องประกอบไปด้วยกระบอกสูบไฮดรอลิกส์ 2 ชุดคือ อยู่ใต้โบลเตอร์ของเครื่องเพรสมีอยู่ 1 ตัว ที่ทำหน้าที่เป็นดายน์คูชั่นกระบอกสามารถที่จะควบคุมความดันและอีกตัวอยู่ที่ด้านบนของเครื่องที่เป็นกระบอกหลักเพื่อที่จะส่งแรงไปยังแรม (RAM) สามารถปรับความดันและความเร็วในการกดได้

หลักการทำงานของเครื่องเพรสคือ พินช์จะยึดติดอยู่กับโบลเตอร์ทางด้านล่างของเครื่อง และดายน์คูชั่นจะยึดติดอยู่กับส่วนบนหรือแรมของเครื่อง แรมจะเคลื่อนที่ลงพาดายสวมเข้ากับพินช์เพื่อขึ้นรูปขึ้นงาน ส่วนแรงที่ใช้ในการจับยึดขึ้นงานจะถูกกำหนดโดยการตั้งแรงดันต้านผ่านแกนส่งแรงจากกระบอกไฮดรอลิกส์ด้านล่างหรือดายน์คูชั่น การทำงานของกระบอกไฮดรอลิกส์ สามารถควบคุมแรงดันให้คงที่และสามารถปรับตั้งได้เพื่อหาความเหมาะสมในการขึ้นรูปโลหะ

ส่วนประกอบหลักๆ ของเครื่องเพรสไฮดรอลิกส์ ดังรูปที่ 2

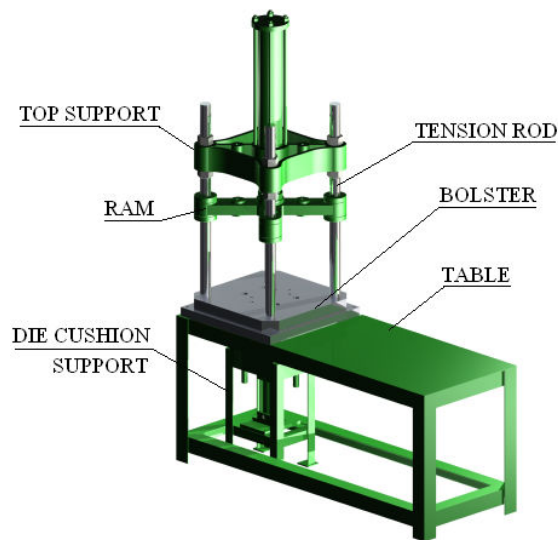


รูปที่ 2 เครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแบบไฮดรอลิกส์

ในการออกแบบเครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแบบไฮดรอลิกส์ขนาดเล็กที่มีแรงกดไม่เกิน 10 ตันแบบมีดายน้้คู้ชั้น ได้คำนึงถึงวิธีการที่จะสามารถปรับแรงกดที่ขนาดไม่เกิน 10 ตัน ปรับแรงจับยึดชิ้นงาน (Blank holder force) โดยใช้ดายน้้คู้ชั้น อีกทั้งยังปรับความเร็วในการกดชิ้นงานได้ เพื่อศึกษาถึงกระบวนการและนำไปสู่การหาขนาดของแรงกด ความดันในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก

3.1 การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์(CAD Model) ของโครงสร้างและชิ้นส่วนหลัก ที่จะนำมาวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบไปด้วย BOLSTER, RAM, TENSION ROD, DIE CUSHION SUPPORT, TOP SUPPORT และ TABLE โดยโครงสร้างและชิ้นส่วนหลักได้ออกแบบ ดังรูปที่ 3

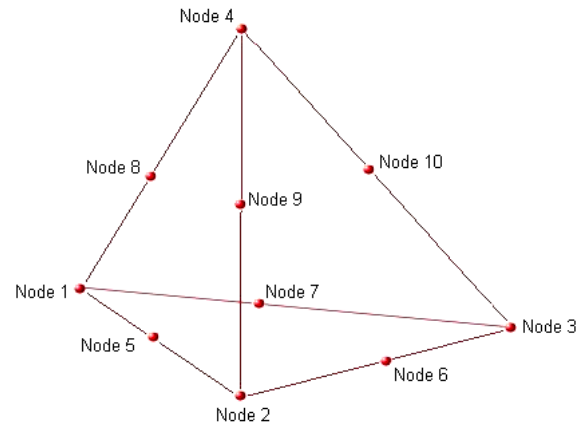


รูปที่ 3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโครงสร้างและชิ้นส่วนหลักๆ

3.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การออกแบบโครงสร้างเครื่องได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเค้นเนื่องจากแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างและชิ้นส่วนหลักๆ ขณะรับแรง แรงที่

ใช้ในการวิเคราะห์คือแรงจากการกดของกระบอกสูบไฮดรอลิกส์มีขนาด 10 ตัน และการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นส่วนเครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะได้เลือกใช้เอลิเมนต์ทรงจัตุรมุข 10 โหนด (10-Node Tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 เอลิเมนต์ทรงจัตุรมุข 10 โหนด

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

การวิเคราะห์ปัญหาทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง จำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับชิ้นส่วนต่างๆ โดยคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในทางกลศาสตร์ของแข็ง เป็นปัญหาในช่วงยืดหยุ่น(Elasticity Problem) และกำหนดให้เป็นแบบ Isotropic ส่วนคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นหลัก(U.T.S.) ค่าความเค้นคราก(Y.S.) ค่าคงที่ของการยืดหยุ่น(Young's modulus) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ได้แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

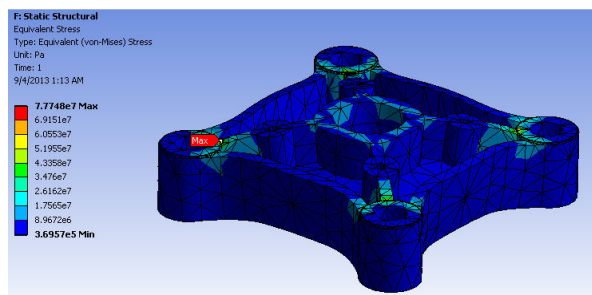
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งของวัสดุ JIS SS400

U.T.S. (N/mm ²)	Y.S. (N/mm ²)	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio
400	245	200	0.26

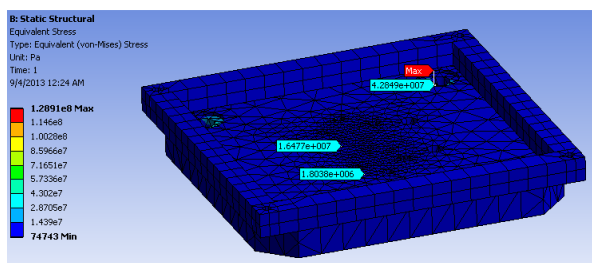
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์
ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งของวัสดุ JIS S50C

U.T.S. (N/mm ²)	Y.S. (N/mm ²)	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio
650	355	210	0.27

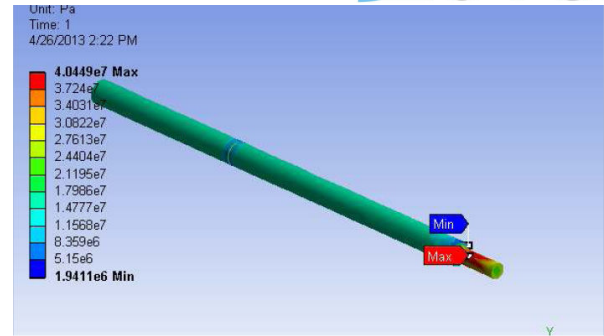
3.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อหาความเค้น
การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาความเค้นเนื่องจากภาระแรงที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วน โดยความเค้นที่ได้นั้นจะเป็น ความเค้นวอนมิสเสส (Von mises stress) ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วงสภาวะยืดหยุ่นและมีค่าความปลอดภัยมากกว่า 2 ดังแสดงในรูปที่ 5,6,7,8 ซึ่งเป็นชิ้นส่วนสำคัญในการรับแรง



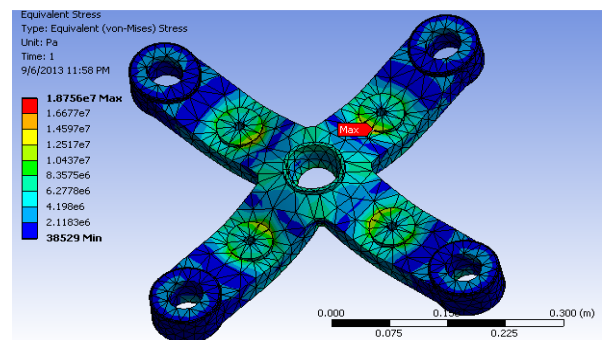
รูปที่ 5 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วน TOP SUPPORT ซึ่งมีจำนวนโนดที่ใช้ 8721 และจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ 4642



รูปที่ 6 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วน BOLSTER ซึ่งมีจำนวนโนดที่ใช้ 31594 และจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ 16460



รูปที่ 7 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วน TENSION ROD ซึ่งมีจำนวนโนดที่ใช้ 1777 และจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ 934



รูปที่ 8 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วน RAM ซึ่งมีจำนวนโนดที่ใช้ 12612 และจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ 6750

3.5 การออกแบบระบบไฮดรอลิกส์

ในการเลือกกระบอกไฮดรอลิกนั้นจะต้องรู้พื้นที่หน้าตัดที่น้ำมันไฮดรอลิกจะไหลเข้าไปในกระบอกเพื่อทำให้เกิดแรงกด 10 ตันตามที่ต้องการ สูตรการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบ ดังสมการที่ 4

$$A = \frac{F}{P} \quad (4)$$

เมื่อ

A คือพื้นที่หน้าตัด (m²)

F คือแรงกดของกระบอกสูบ (kN)

P คือความดันในกระบอกสูบ (Bar)

จากการคำนวณที่ความดัน 150 Bar จะได้ขนาดกระบอกสูบ Bore diameter ที่ 10 cm และขนาด Rod diameter ที่ 5.6 cm

การคำนวณหาขนาดของปั๊มไฮดรอลิกส์หาได้จากอัตราการไหล โดยจะสามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$Q = VA \quad (5)$$

เมื่อ

Q คืออัตราการไหล (LPM)

V คือความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์ (cm/sec)

A คือพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (cm²)

จากการคำนวณหาขนาดของปั๊มไฮดรอลิกส์ ที่ความเร็วของกระบอกไฮดรอลิกส์ที่ 3 cm/sec จะได้ขนาดของปั๊มไฮดรอลิกส์ 13 LPM

กำลังที่ใช้ในการขับปั๊ม (Drive Power) หรือขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับปั๊มนั้นสามารถหาได้จาก flow rate x pressure ที่ใช้งาน ดังสมการที่ 6

$$P_m = \frac{Q \times P}{600 \times 0.746} \quad (6)$$

เมื่อ

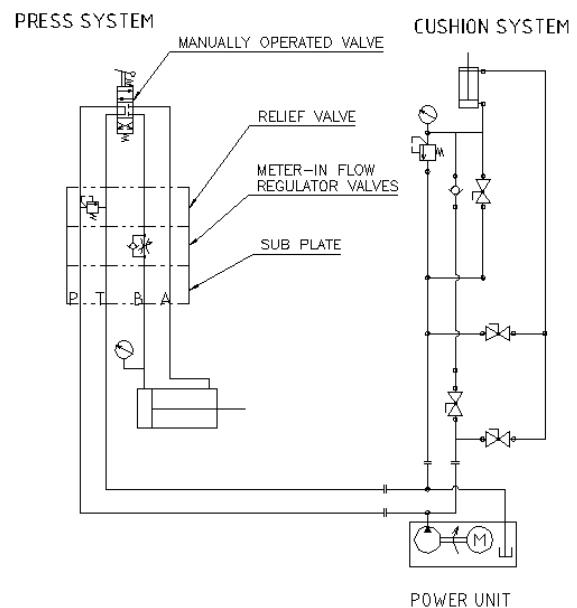
P_m คือกำลังของมอเตอร์ (Hp)

Q คืออัตราการไหล (LPM)

P คือความดันในกระบอกสูบ (Bar)

จากการคำนวณหา กำลังที่ใช้ในการขับปั๊ม (Drive Power) หรือขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 5 hp.

ในการออกแบบระบบไฮดรอลิกส์ ส่วนของระบบดายน์คูชั่นได้ออกแบบให้สามารถที่จะควบคุมการไหลของวัสดุในกระบวนการดึงขึ้นรูปลึก โดยสามารถปรับความดันในระบบดายน์คูชั่นได้ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรระบบไฮดรอลิกส์ที่สามารถปรับความดันในแต่ละส่วนได้

4. บทสรุปการศึกษา

โดยความเค้นที่ได้นั้นจะเป็นความเค้นวอนมิสเชส (Von mises stress) และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress) สูงสุด

ภาระแรงที่กระทำต่อโครงสร้างและชิ้นส่วนต่างๆ ซึ่งผลการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วงสภาวะยืดหยุ่นและมีค่าความปลอดภัยมากกว่า 2

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นจากความเค้นที่เกิดขึ้นผลการคำนวณดังกล่าวทำให้สามารถช่วยในการออกแบบตามหลักการทางวิศวกรรมจากผลการคำนวณทุกกรณีพบว่าความเค้นแบบวอนมิสเชส (Von Mises stress) และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress) สูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง แกนรับแรงดึง แต่ยังไม่ทำให้เกิดความเสียหายในการใช้งาน

จากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้ได้เครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแบบไฮดรอลิกส์ขนาดเล็กที่มีแรงกดไม่เกิน 10 ตันแบบมีดายน์คูชั่นเพื่อใช้ในการงานวิจัยทางด้านการขึ้นรูปโลหะแผ่นหรืองานอื่นๆที่เหมาะสมโดยใช้ต้นทุนต่ำ

5. ข้อเสนอแนะ

นอกจากการออกแบบและสร้างแล้วยังต้องมีการทดสอบจริงของเครื่องเพรสขึ้นรูปโลหะแบบไฮดรอลิกส์ต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างของเครื่องและแม่พิมพ์ เพื่อศึกษาในจุดต่างๆ เช่นการเปลี่ยนตายันคู่ชั้นเป็นแบบหลายจุด (Multi-point Blank holder forces) ศึกษาแรงแรงเสียดทาน ดรอว์บีต การติดตัวกลับ ได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ช่วยทางด้านเครื่องมือในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณโครงการพัฒนานักวิจัยใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น สำหรับทุนในการศึกษาครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Leonid B. Shulkin, Ronald A. Posterarob, Mustafa A. Ahmetoglu, Gary L. Kinzel, Taylan Altan. Blank holder force (BHF) control in viscous pressure forming (VPF) of sheet metal. Journal of Materials Processing Technology 98 (2000) 7-16.
- [2] Lin Wang, T.C. Lee. Controlled strain path forming process with space variant blank holder force using RSM method. Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) 447-455.
- [3] H. Ibrahim Demirci, Mustafa Yasar, Kemal Demiray, Mehmet Karal. The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material. Materials and Design 29 (2008) 526-532
- [4] Wang Wu-rong, Chen Guan-long, Lin Zhong-qin. The effect of binder layouts on the sheet

metal formability in the stamping with Variable Blank Holder Force. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 1378-1385

7.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม

(Proceedings)

- [1] วิเชียรเถื่อน เครือวัลย์, ศุภเอก ประมูลมาก (2553). การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานที่มีผลต่องานขึ้นรูปด้วย, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 8.

7.3 รายงาน

- [1] คมสันต์ วงศ์ภาพสินธุ์ (2553). การศึกษากระบวนการดึงขึ้นรูปลึกของแผ่นไททาเนียม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [2] นายไมตรี กมลรัตนพิสุทธิ์ (2550). การวิเคราะห์ปัญหาการฉีกขาดและรอยย่นในงานขึ้นรูปโลหะโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

7.4 หนังสือ

- [1] ปราโมทย์ เตชะอาไพ (2547). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์, กรุงเทพฯ.
- [2] วรวิทย์ อังภากรณ์ และชาญ ฤกษ์งาน (2522). การออกแบบเครื่องจักรกล 1, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [3] ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์ และปานเพชร ชินินทร (2543). ไฮดรอลิกอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [4] วารุณี เปรมานนท์, พงศ์พันธ์ แก้วดาตติย์. (2552). งานขึ้นรูปโลหะ, แม่พิมพ์โลหะแผ่น, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).