

การปรับตั้งตำแหน่งลูกกลิ้งในการม้วนขึ้นรูปวงกลมเพื่อแก้ไขการบิดกลับ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Setting of Roller Position for Springback Compensation by Finite Element Method

กัมปนาท ศิริเวทิน, ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์, ชานู ถนังงาน
ศูนย์วิจัยวิศวกรรมการคำนวณขั้นสูง (ศคส.) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10800
โทร 02-9132500-24 ต่อ 8531, โทรสาร (02) 5870026
E-mail: kumpanat.sirivedin@usa.net, shw@kmitnb.ac.th, chn@kmitnb.ac.th

Kumpanat Sirivedin, Sirisak Hanchoo Wong, Charn Thanadngarn
Research Centre for Advanced Computational Engineering (RACE)
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Bangkok 10800, Thailand
Tel: 662-9132500-24 Ext. 8531 Fax: 662-5870026

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการปรับตั้งตำแหน่งลูกกลิ้งของเครื่องม้วนขึ้นรูปวงกลมแบบลูกกลิ้งสามลูกเพื่อให้ได้รัศมีม้วนตามกำหนดโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองกรรมวิธีม้วนขึ้นรูปวงกลม และนำหลักการออปติไมเซชันวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีลากรางจ์มัลติพลีเออร์ เพื่อหาค่าตำแหน่งลูกกลิ้งที่ใช้แรงกดน้อยที่สุดที่ทำให้ได้รัศมีม้วนตามกำหนด ผลลัพธ์เชิงตัวเลขจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองโดยทดลองกับแผ่นเหล็กที่มีความหนาและรัศมีม้วนต่าง ๆ ดังนี้ ความหนา 25 mm รัศมีม้วนคือ 623 mm, ความหนา 19 mm รัศมีม้วนคือ 385 mm และความหนา 16 mm รัศมีม้วนคือ 431 mm เมื่อทดลองม้วนขึ้นรูปจริงโดยใช้ตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้งที่ได้จากการวิเคราะห์ พบว่าความหนา 25, 19 และ 16 mm ได้รัศมีม้วน 645, 395 และ 417 mm ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเป็น -3.53%, -2.59% และ +3.25% ตามลำดับ

model to simulate the roll forming process and then using optimization technique to analyze the FEA result. Due to the numerical results from FEA, the relations between rolling radii, forces and the setting positions of rollers are determined. The Lagrange multiplier technique is then applied to find the setting position of rollers for the required radius at the minimum force. In the experiment, the structural steel sheets (SS400) with different thicknesses of 25 mm, 19 mm and 16 mm are used to roll for the required radii of 623 mm, 385 mm and 431 mm respectively. As the experimental result at the thicknesses of 25, 19 and 16 mm, the rolling radii of 645, 395 and 417 mm, respectively, are obtained. These show -3.53%, -2.59% and +3.25% of errors.

Abstract

This paper present the setting of roller positions of three roll - forming machine by using finite element

1. บทนำ

กรรมวิธีการม้วนขึ้นรูปวงกลม เป็นกระบวนการผลิตที่ให้ผลิตภัณฑ์ประเภท ท่อ ถึงความดัน เปลือกหม้อเผาและท่อเหล็กเสาะเชื่อมเป็นต้น [1] ในปัจจุบันการม้วนขึ้นรูปวงกลมทำได้

โดยใช้เครื่องมือขึ้นรูปแบบลูกกลิ้ง 3 ลูก และใช้วิธีลองผิดลองถูกในการปรับตั้งตำแหน่งลูกกลิ้ง เพื่อขึ้นรูปให้ได้รัศมีตามที่ต้องการ ซึ่งวิธีลองผิดลองถูกจะต้องใช้เวลามาก นอกจากนั้นยังต้องเสียวัสดุในการทดลอง ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น การแก้ไขปัญหามีสามารถทำได้โดย ค้นหาตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้งที่ทำให้รัศมีขึ้นรูปใกล้เคียงค่าที่ต้องการ โดยสร้างกราฟหรือฟังก์ชันเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับตั้งตำแหน่งลูกกลิ้ง สำหรับแผ่นเหล็กที่มีความหนาแตกต่างกันโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองกรรมวิธีการขึ้นรูปวงกลม

M. Brunet, S. Mguil และ P. Pol [2] พัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการวิเคราะห์กรรมวิธีขึ้นรูปวงกลม โดยใช้แบบจำลองวัสดุเป็นแบบยืดหยุ่น-พลาสติก พบว่าสามารถทำนายค่ารัศมีได้ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริง Peter Michael Bugdoll [3] ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หาความเค้นและการเปลี่ยนรูปของแผ่นเหล็ก จากนั้นสร้างโปรแกรมควบคุมเชิงตัวเลขในการทดลองขึ้นรูปจริง พบว่าได้รัศมีที่ต้องการรวดเร็วขึ้น K. Osakada, G. Yang และ K. Mori [4] สร้างชุดทดลองเพื่อหาตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้งลูกบนที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการตัดที่รัศมีต่างๆ กันและเขียนโปรแกรมควบคุมโดยใช้หลักการ "Fuzzy reasoning" เพื่อกำหนดให้โปรแกรมควบคุมสามารถตัดสินใจปรับตั้งลูกกลิ้งให้เหมาะสมกับรัศมีที่ต้องการ Joerg Blum และ Wolfgang Massberg [5] วิจัยหาตัวประกอบชุดเซกการติดกลับของแผ่นเหล็ก St52-III โดยสร้างสมการจากความสัมพันธ์ของโครงสร้างเครื่องมือขึ้นรูปวงกลม, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง, ความหนาของแผ่นเหล็กที่จะขึ้นรูป และคุณสมบัติทางกลของแผ่นเหล็ก ผลการวิจัยพบว่าตัวประกอบชุดเซกการติดกลับมีค่าประมาณ 0.751 ใกล้เคียงกับการวิจัยของ Siebel [6]

บทความนี้แสดงวิธีค้นหาตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้งของเครื่องมือขึ้นรูปวงกลมแบบลูกกลิ้ง 3 ลูก โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองกรรมวิธีขึ้นรูปวงกลม เพื่อทำนายรัศมีที่ได้จากตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้งที่เปลี่ยนไปสำหรับแผ่นเหล็กโครงสร้าง SS400 ที่มีความหนา 25 mm, 19 mm และ 16 mm โดยวิเคราะห์ผลจากการติดกลับ (Springback) ด้วย และนำหลักการออปติไมเซชัน ด้วยวิธีการทางจัมัลทิฟิเคชัน วิเคราะห์หาตำแหน่งปรับตั้งที่ใช้แรง

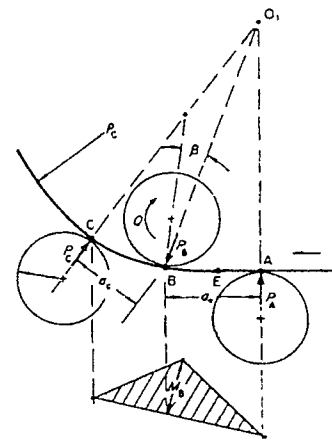
กดที่น้อยที่สุดที่ทำให้ได้รัศมีที่ต้องการจากนั้นเปรียบเทียบกับผลการทดลองขึ้นรูปจริง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำ

2. ทฤษฎี

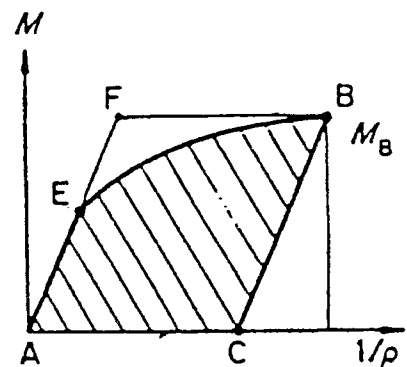
2.1 กลศาสตร์ของการขึ้นรูปวงกลม

แผ่นเหล็กสามารถดัดโค้งเป็นรูปทรงกระบอกได้โดยการดัดผ่านลูกกลิ้ง 3 ลูก ตามที่แสดงในรูปที่ 1 ถ้าลูกกลิ้งลูกกลางมีรัศมี R เป็นลูกกลิ้งขับ ส่วนลูกกลิ้งอีกสองลูกหมุนอิสระ เมื่ออยู่ในสถานะคงที่แรงที่กระทำคือ P_A, P_B และ P_C เมื่อทราบรัศมีความโค้ง ρ_C ที่ต้องการสามารถหาความโค้งจากโหลด $\frac{1}{\rho_B}$ และโมเมนต์ M_B ได้จากแผนภาพโมเมนต์

กับความโค้งโดยใช้วิธีสร้างรูปดังรูปที่ 2 ซึ่ง CB ขนานกับส่วนยืดหยุ่น AE จุดในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 สอดคล้องกัน แผ่นเหล็กโค้งแบบยืดหยุ่นในช่วง A กับ E และแบบพลาสติกในช่วง E กับ B และเมื่อคลายโหลดเกิดการติดกลับในช่วง B กับ C



รูปที่ 1 การดัดด้วยลูกกลิ้ง 3 ลูก



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง

จากรูปที่ 1 แรงทั้งสามตัดกันที่จุด O_1 ซึ่งหาโมเมนต์ได้จากสมการ

$$M_B = P_A a_A = P_C a_C \quad (1)$$

งานสุทธิ A_1 ที่ใช้ตัดแผ่นแถบยาว L แทนด้วยพื้นที่ AEBC ในรูปที่ 2 หาได้จากสมการ

$$A_1 = \lambda_p M_B \frac{L}{\rho_c} \quad (2)$$

โดยทอร์ก Q ที่กระทำกับลูกกลิ้งขับเคลื่อน

$$Q = \lambda_p M_B \frac{R}{\rho_c} \quad (3)$$

2.2 ทฤษฎีผิวสัมผัส

สมมุติฐานของทฤษฎีคือ พื้นผิวที่เกิดจากการสัมผัส (Contact) กันของผิวโค้งทรงกระบอก 2 อันในช่วงก่อนรับโหลดมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อรับโหลดจะมีพื้นผิวสัมผัสเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดเล็ก ซึ่งสามารถคำนวณหาความเค้นสัมผัส (Contact Stress) ในทิศทางต่างๆได้ตามสมการ

$$\sigma_{xx} = - \left[\frac{(\sqrt{1+(z/b)^2} - z/b)^2}{\sqrt{1+(z/b)^2}} \right] \frac{b}{\Delta} \quad (4)$$

$$\sigma_{yy} = -2\nu \left[\sqrt{1+\left(\frac{z}{b}\right)^2} - \frac{z}{b} \right] \frac{b}{\Delta} \quad (5)$$

$$\sigma_{zz} = - \left[\frac{1}{\sqrt{1+(z/b)^2}} \right] \frac{b}{\Delta} \quad (6)$$

เมื่อ b คือ ความกว้างของพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าสัมผัส
 z คือ ความลึกในทิศทางการกด

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ความเครียดของวัสดุแบ่งออก 2 ช่วงคือความเครียดช่วงยืดหยุ่น (Elastic Strain) และความเครียดในช่วงพลาสติก

(Plastic Strain) ดังนี้

$$d\varepsilon = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{pl} \quad (7)$$

ในช่วงยืดหยุ่นความเค้นมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} d\sigma &= [D] \{d\varepsilon^{el}\} \\ \{\sigma\} &= [D] \{\varepsilon^{el}\} \end{aligned} \quad (8)$$

เมื่อ

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\{\varepsilon^{el}\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ในช่วงพลาสติกเป็นไปตามกฎการไหลตัว (Flow Rule) ดังนี้

$$d\varepsilon^{pl} = d\lambda \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right) \quad (11)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \{d\} \quad (12)$$

เมื่อ

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (13)$$

และ

$$\{d\} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

จากสมการที่ (8) เมื่อพิจารณาเป็นแบบความเครียดในระนาบ

เมทริกซ์ $[D]$ คือ

$$[D] = \frac{E}{1+\nu} \begin{bmatrix} \frac{1-\nu}{1-2\nu} & \frac{\nu}{1-2\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-2\nu} & \frac{1-\nu}{1-2\nu} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3. วิธีการวิจัย

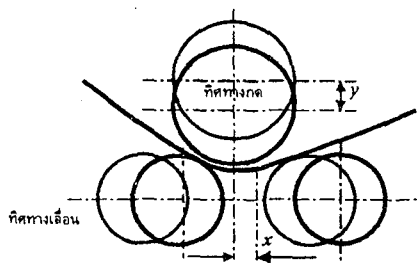
สร้างแบบจำลองทดสอบ Contact Element จากนั้นสร้างแบบจำลองกรรมวิธีม้วนขึ้นรูปวงกลม, กำหนดคุณสมบัติของแบบจำลองวัสดุแผ่นเหล็ก, แบ่งส่วนเอลิเมนต์และกำหนดเงื่อนไขขอบ, กำหนดวิธีการวิเคราะห์และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน โดยการวิเคราะห์ทำภายใต้สมมุติฐานดังนี้

1. ชนิดเอลิเมนต์เป็นแบบ 8 โหนด 2 องศาอิสระ
2. วิเคราะห์แบบความเครียดในระนาบ (Plane Strain)
3. พฤติกรรมของวัสดุเป็นแบบเชิงเส้นไอโซโทรปิก
4. เกณฑ์การครากเป็นไปตามเกณฑ์ของวอนมิสเสส
5. วัสดุมีเนื้อเอกพันธ์
6. ลูกกลิ้งกำหนดให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง
7. คุณสมบัติของวัสดุแผ่นเหล็กและลูกกลิ้งเป็นไปตามข้อมูลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1

ชื่อ	คุณสมบัติทางกล	คุณสมบัติทางรูปทรง
อัตราส่วน	ความเค้นคราก ส.ป.ส.ความเสียดทาน กว้าง ยาวหนา เส้นผ่านศูนย์กลางของ (ν) (Mpa) ความเสียดทาน (μ) (mm) (mm) (mm) กลาง (mm)	
แผ่นเหล็ก	0.3 244,247,293.7 0.15 100 3063 25,19,16	
ลูกกลิ้ง 0	∞ 0.15 - - -	780
ลูกบน		
ลูกกลิ้ง 0	∞ 0.15 - - -	500
ลูกล่าง		

3.1 แบบจำลองของการม้วนขึ้นรูปวงกลม

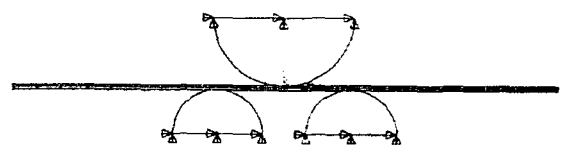


รูปที่ 3 การปรับตั้งแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 แสดงจำนวนของแบบจำลองและตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้ง

แบบจำลองที่	ระยะเยื้องศูนย์กลาง x (mm)	ระยะกดลึก y (mm)
1	0	50
2	0	60
3	0	70
4	0	80
5	0	90
6	15	50
7	15	60
8	15	70
9	15	80
10	15	90
11	30	50
12	30	60
13	30	70
14	30	80
15	30	90
16	45	50
17	45	60
18	45	70
19	45	80
20	45	90
21	60	50
22	60	60
23	60	70
24	60	80
25	60	90

ในรูปที่ 4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบของกรรมวิธีม้วนขึ้นรูปวงกลมในแบบจำลอง



รูปที่ 4 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบของกรรมวิธีม้วนขึ้นรูป

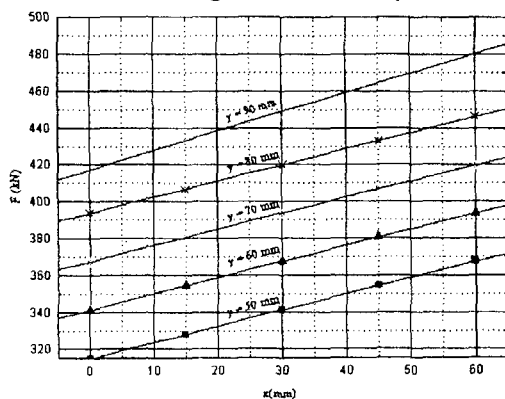
กำหนดวิธีการวิเคราะห์เป็นแบบสถิตย์ศาสตร์ (static) ข้อมูลที่ต้องการจากการวิเคราะห์คือ รัศมีจากการม้วนและแรงกดของลูกกลิ้งลูกบนที่กระทำลงบนแผ่นเหล็ก ซึ่งผลการวิเคราะห์เมื่อนำข้อมูลมาปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting)

จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและรัศมีมัดติดกับระยะ
ปรับตั้งลูกกลิ้งสำหรับแผ่นเหล็กที่ความหนาต่าง ๆ กันดังนี้
สำหรับความหนา 25 mm

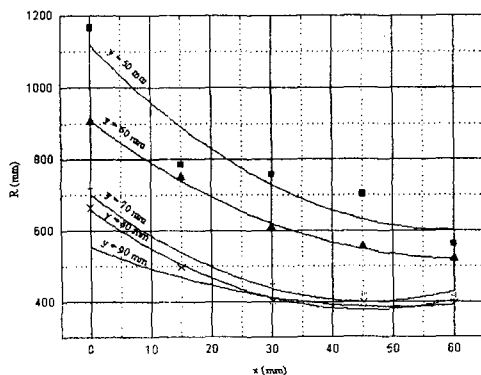
$$F(x, y) = 179.5153 + 0.9094x + 2.6768y \quad (16)$$

$$R = 2991.2661 - 50.6557y + 0.2633y^2 - 0.1225xy - 0.1365x^2 + 0.0089x^2y - 0.00007324x^2y^2 \quad (17)$$

สมการที่ (16) และ (17) นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์
ได้ตามรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของแรงกดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้ง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของรัศมีมัดติดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้ง

3.2 การทำออปติไมเซชัน (Optimization)

การทำออปติไมเซชันมีวัตถุประสงค์เพื่อ หาระยะปรับตั้ง
ลูกกลิ้งที่ใช้แรงกดน้อยที่สุด เพื่อให้มัดได้รัศมีตามขนาด
กำหนด โดยฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) คือ
สมการที่ (16)

$$F(x, y) = 179.5153 + 0.9094x + 2.6768y$$

ภายใต้ฟังก์ชันเงื่อนไข (Constraint Function)

$$\phi(x, y) = R - A_0(y) + A_1(y)x - A_2(y)x^2 = 0 \quad (18)$$

เมื่อ

$$A_0(y) = 2991.2661 - 50.6557y + 0.2633y^2$$

$$A_1(y) = 16.2225 + 0.1225y - 0.0024y^2$$

$$A_2(y) = -0.1365 + 0.0089y - 0.00007324y^2$$

โดยที่ x, y มีค่าดังนี้

$$0 \text{ mm} \leq x \leq 50 \text{ mm} \text{ และ } 50 \text{ mm} \leq y \leq 90 \text{ mm}$$

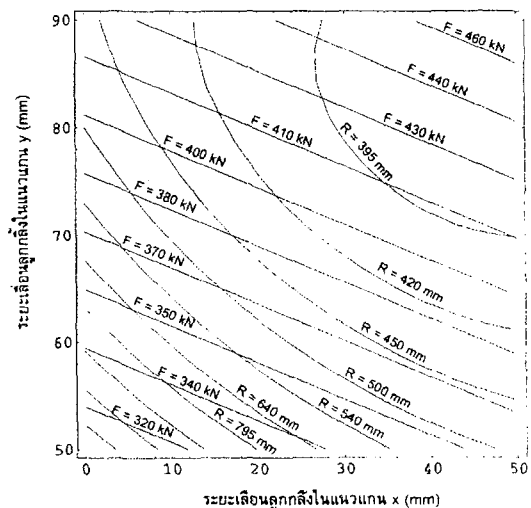
การทำออปติไมเซชันใช้วิธีลากรางจ์มัลติไพเออร์ (Lagrange
Multiplier) ซึ่งค่าออปติไม้ม (Optimum) ของแรงกดเกิดขึ้นที่
ค่า x, y ที่สอดคล้องกับสมการ

$$\nabla F - \lambda \nabla \phi = 0 \quad (19)$$

และ

$$\phi(x, y) = 0 \quad (20)$$

ผลจากการทำออปติไมเซชันแสดงให้เห็นภาพได้ด้วยกราฟ
ในรูปที่ 7



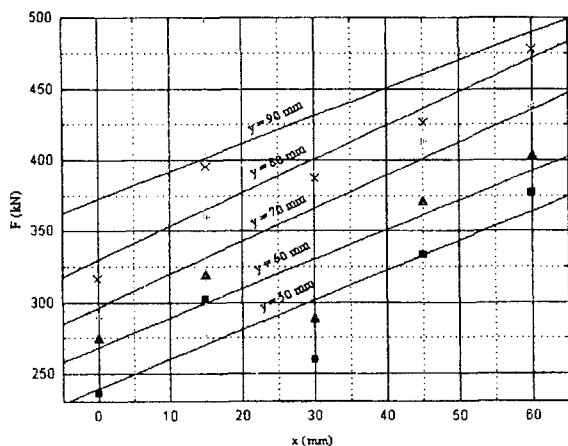
รูปที่ 7 กราฟแสดงระยะปรับตั้งลูกกลิ้งที่แรงกดต่ำสุดโดยวิธี
ลากรางจ์มัลติไพเออร์ ที่ความหนา 25 mm

สำหรับความหนา 19 mm จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด
และรัศมีมัดติดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้งตามสมการที่ (21)
และ สมการที่ (22)

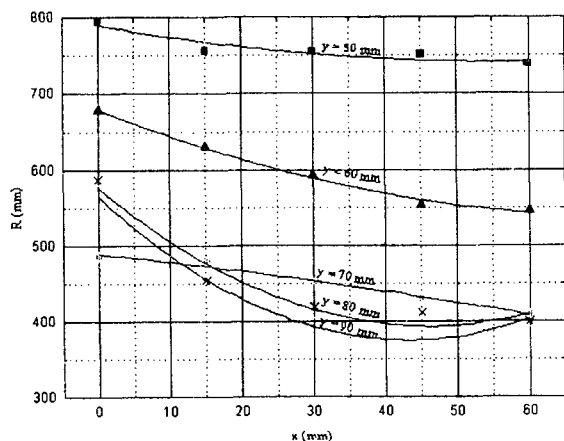
$$F(x, y) = 70.8987 + 2.1579x + 3.2895y \quad (21)$$

$$R = 1582.2563 - 20.7805y + 0.09648y^2 + 42.7982x - 1.3239xy + 0.008872xy^2 - 0.3953x^2 + 0.011914x^2 - 0.00007732x^2y^2 \quad (22)$$

สมการที่ (21) และ (22) นำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของแรงกดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้งที่ความหนา 19 mm



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของรัศมีม้วนดัดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้งที่ความหนา 19 mm

โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายคือสมการที่ (21)

$$F(x, y) = 70.8987 + 2.1579x + 3.2895y$$

ภายใต้ฟังก์ชันเงื่อนไข

$$\phi(x, y) = R - A_0(y) + A_1(y)x - A_2(y)x^2 = 0 \quad (23)$$

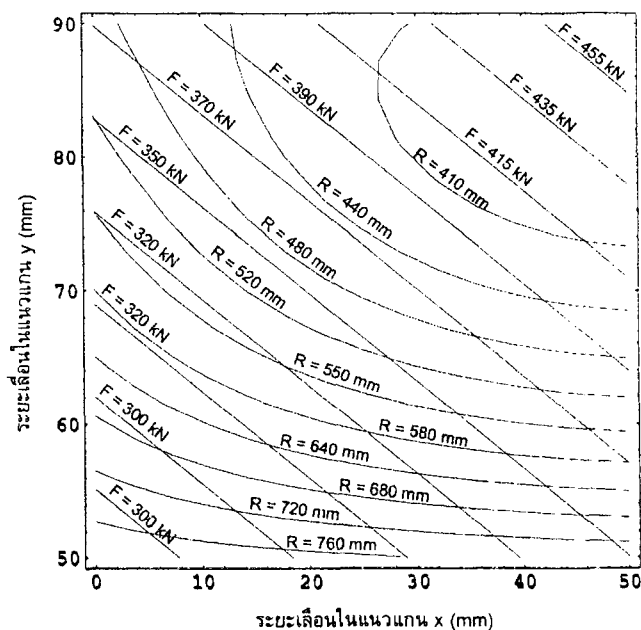
เมื่อ

$$\begin{aligned} A_0(y) &= 1582.2563 - 20.7805y + 0.09648y^2 \\ A_1(y) &= -42.7982 + 1.3239y - 0.008872y^2 \\ A_2(y) &= -0.3953 + 0.011914y - 0.00007732y^2 \end{aligned}$$

โดยที่ x, y มีค่าดังนี้

$$0 \text{ mm} \leq x \leq 50 \text{ mm} \text{ และ } 50 \text{ mm} \leq y \leq 90 \text{ mm}$$

ผลจากการทำออปติไมเซชันตามสมการที่ (19) และ (20) แสดงไว้ในรูปที่ 10



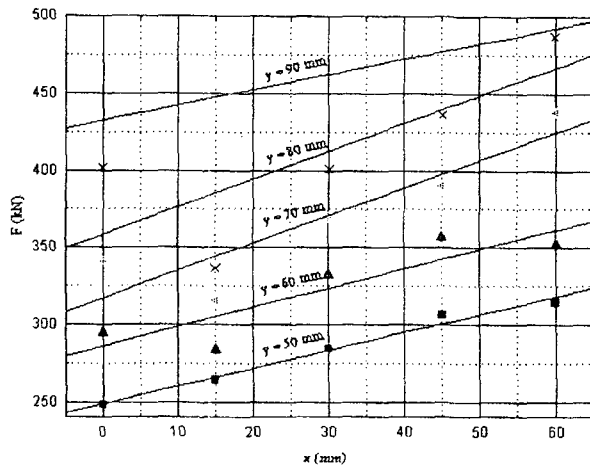
รูปที่ 10 กราฟแสดงระยะปรับตั้งลูกกลิ้งที่แรงกดต่ำสุดโดยวิธี ลากรางจิมัลทิไฟเออร์ ที่ความหนา 19 mm

สำหรับความหนา 16 mm จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและรัศมีม้วนดัดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้งตามสมการที่ (24) และ สมการที่ (25)

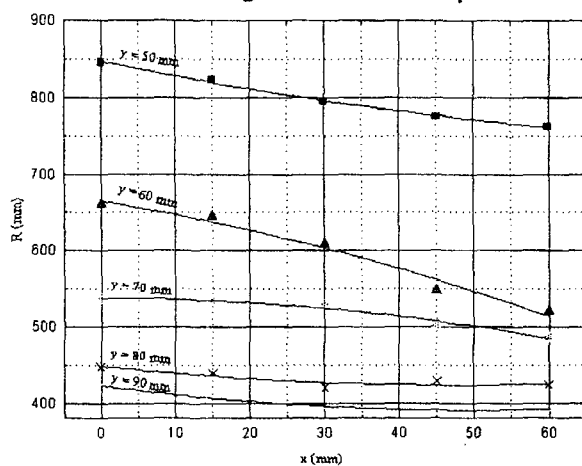
$$F(x, y) = 15.8929 + 1.4024x + 4.4670y \quad (24)$$

$$R = 2511.2424 - 45.8457y + 0.25138y^2 - 15.6237x + 0.41xy - 0.002794xy^2 + 0.2381x^2 - 0.00746x^2y + 0.00005578x^2y^2 \quad (25)$$

จากสมการที่ (24) และสมการที่ (25) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ตามรูปที่ 11 และรูปที่ 12



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของแรงกดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้งที่ความหนา 16 มม



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของรัศมีม้วนดัดกับระยะปรับตั้งลูกกลิ้งที่ความหนา 16 มม

ฟังก์ชันเป้าหมายคือสมการที่ (24)

$$F(x, y) = 15.8929 + 1.4024x + 4.4670y$$

ภายใต้ฟังก์ชันเงื่อนไข

$$\phi(x, y) = R - A_0(y) + A_1(y)x - A_2(y)x^2 = 0 \quad (26)$$

เมื่อ

$$A_0(y) = 2511.2424 - 45.8451y + 0.2513y^2$$

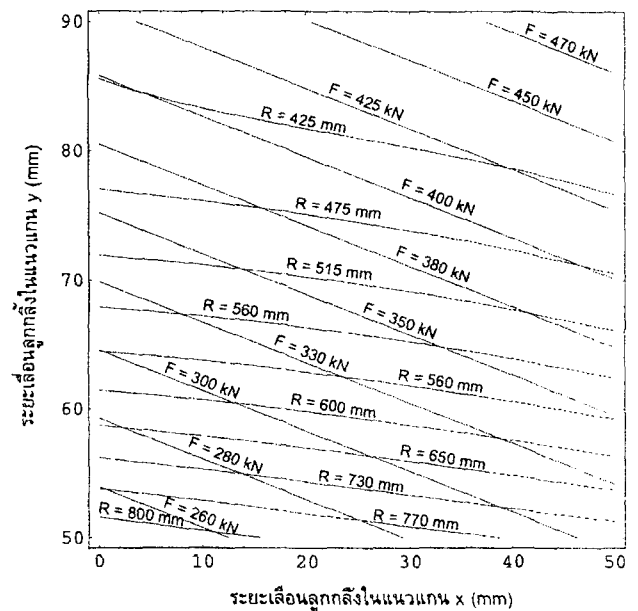
$$A_1(y) = 15.6237 - 0.4100y + 0.002794y^2$$

$$A_2(y) = 0.2381 - 0.00746y + 0.00005578y^2$$

โดยที่ x, y มีค่าดังนี้

$$0 \text{ mm} \leq x \leq 50 \text{ mm} \text{ และ } 50 \text{ mm} \leq y \leq 90 \text{ mm}$$

ผลจากการทำออปติไมเซชันตามสมการที่ (19) และ (20) แสดงไว้ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟแสดงระยะปรับตั้งลูกกลิ้งที่แรงกดต่ำสุดโดยวิธี ลากตารางมีลทิไฟเออร์ ที่ความหนา 16 มม

3.3 ผลการทดลองม้วนขึ้นรูปจริง

ผลการทดลองม้วนขึ้นรูปวงกลมแผ่นเหล็กโครงสร้าง SS400 โดยใช้ตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้งจากกราฟในรูปที่ 7, 10 และ 13 มีดังนี้

1. แผ่นเหล็กความหนา 25 มม รัศมีที่ต้องการคือ 623 มม ปรับตำแหน่งลูกกลิ้งในแนวราบที่ระยะ $x = 0 \text{ mm}$ และปรับตำแหน่งลูกกลิ้งในแนวตั้งที่ระยะ $y = 80 \text{ mm}$ ได้รัศมี 645 มม คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนได้ -3.53%
2. แผ่นเหล็กความหนา 19 มม รัศมีที่ต้องการคือ 385 มม ปรับตำแหน่งลูกกลิ้งในแนวราบที่ระยะ $x = 40 \text{ mm}$ และปรับตำแหน่งลูกกลิ้งในแนวตั้งที่ระยะ $y = 80 \text{ mm}$ ได้รัศมี 395 มม คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนได้ -2.59%
3. แผ่นเหล็กความหนา 16 มม รัศมีที่ต้องการคือ 431 มม ปรับตำแหน่งลูกกลิ้งในแนวราบที่ระยะ $x = 0 \text{ mm}$ และปรับตำแหน่งลูกกลิ้งในแนวตั้งที่ระยะ $y = 85 \text{ mm}$ ได้รัศมี 417 มม คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนได้ $+3.25\%$

4. สรุปผลการวิจัย

แบบจำลองกรรมวิธีม้วนขึ้นรูปวงกลมที่สร้างขึ้นและวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นเหล็กโครงสร้าง SS400 ที่ความหนา 25, 19 และ 16 mm เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์ของแต่ละความหนาไปทำออปติไมเซชัน โดยสร้างฟังก์ชันเป้าหมาย และฟังก์ชันเงื่อนไขด้วยวิธีลากรางจ์มีลทิไฟเออร์ จากนั้นแสดงผลด้วยกราฟ โดยพิจารณาตำแหน่งปรับตั้งลูกกลิ้งในแนวราบและในแนวดิ่งที่ทำให้ได้รัศมีการม้วนตามต้องการ เมื่อนำไปทดลองปรับตั้งเครื่องม้วนขึ้นรูปผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวมที่ 3.12% เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น พบว่าอาจเกิดจากสาเหตุหลายประการดังนี้

1. ชนิดของแบบจำลองวัสดุแผ่นเหล็กที่เลือกใช้ในการวิจัยใช้แบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ ดังนั้นเมื่อความเค้นถึงจุดครากแบบจำลองจะไม่ครอบคลุมผลจากการเกิด strain hardening
2. ความเสียหายที่กำหนดให้กับแบบจำลอง กำหนดให้คงที่เท่ากับทุกความหนาของวัสดุแผ่นเหล็ก ซึ่งในทางปฏิบัติเมื่อความหนาแผ่นเหล็กเปลี่ยนแปลง ความเสียหายขณะม้วนขึ้นรูปจะมีค่าไม่เท่ากัน
3. ความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่ารัศมี เนื่องจากเป็น การวัดเพื่อหาค่าเฉลี่ยของความโค้งจากโหนดจำนวนมากในแบบจำลอง ซึ่งแตกต่างจากการวัดค่ารัศมีจากแผ่นเหล็กที่ม้วนขึ้นรูปจริง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A_1	: งานสุทธิจากการม้วนขึ้นรูปวงกลม
A, B	: ค่าคงที่ขอบเขตการสัมผัสในทิศทาง x และ y
a, b	: แกนสัมผัสในทิศทาง x และ y
E	: โมดูลัสยืดหยุ่น
K	: สัมประสิทธิ์ความต้านแรงของวัสดุ
k	: อัตราส่วนระหว่างแกนของพื้นที่สัมผัส
k_C	: ความโค้งของแผ่นแถบ (Curvature)
k_L	: ความโค้งของแผ่นเหล็กขณะรับโหลด
k_U	: ความโค้งของแผ่นแถบเมื่อนำโหลดออก
l	: ความยาวแผ่นเหล็ก
M_B	: โมเมนต์ดัด
n	: เลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด

R	: รัศมีของลูกกลิ้ง
R_1, R_2	: รัศมีความโค้งของพื้นผิวทรงกระบอก
R_{exp}	: รัศมีแผ่นเหล็กจากการทดลองจริง
R_a	: รัศมีแผ่นเหล็กจากการวิเคราะห์
t	: ความหนาของแผ่นเหล็ก
$\bar{\epsilon}$	: ความเครียดประสิทธิผล (Effective Strain)
ϵ_T	: ความเครียดในแนวเส้นรอบวง
θ	: มุมการเปลี่ยนแปลงความชันของแผ่นเหล็ก
μ	: สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของลูกอมบี
v	: อัตราส่วนของปัวซอง
ρ_C	: ความโค้งแผ่นเหล็ก
$\bar{\sigma}$	: ความเค้นประสิทธิผล (Effective Stress)
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	: ความเค้นในทิศทาง x, y และ z

เอกสารอ้างอิง

- [1]. ชานู ถนัดงาน; ศิริศักดิ์ หาญชูวงศ์; และธวัชชัย ดวงจันทร์. "การปรับตั้งตำแหน่งลูกกลิ้งใน การม้วนขึ้นรูปวงกลมโดยวิธีออปติไมเซชัน". สัมมนาวิชาการวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย เล่มที่ 2, ครั้งที่ 12: 155-158.
- [2]. Brunet; S. Mguil; and P. Pol. "Modelling of a roll-forming process with a combined 2D and 3D FEM code". *Journal of Materials Processing Technology* Vol.80-81 (1998): 213-219.
- [3]. Peter-Michael Bugdoll. "Kalibrieren auf Dreiwälzenbiegenmaschinen". *Blech RohreProfile* Vol.43 (1996).
- [4]. K. Osakada; G. Yang; and K. Mori. "Determination of Optimum Forming Path in Three-Roll Bending by Combination of Fuzzy Reasoning and Finite Element Simulation". *Annals of the CIRP* Vol. 42 (1993).
- [5]. Joerg Blum, and Wolfgang Massberg. "Kompensieren der Rueckfederung beim Walzrunden von Grobblech". *Baender Bleche Rohre* Vol.10 (1998).
- [6]. Siebel E., and W. Panknin. "Biegefließskorven von Blechen". *Industrieanzeiger* Vol.78 (1956): 343-345.