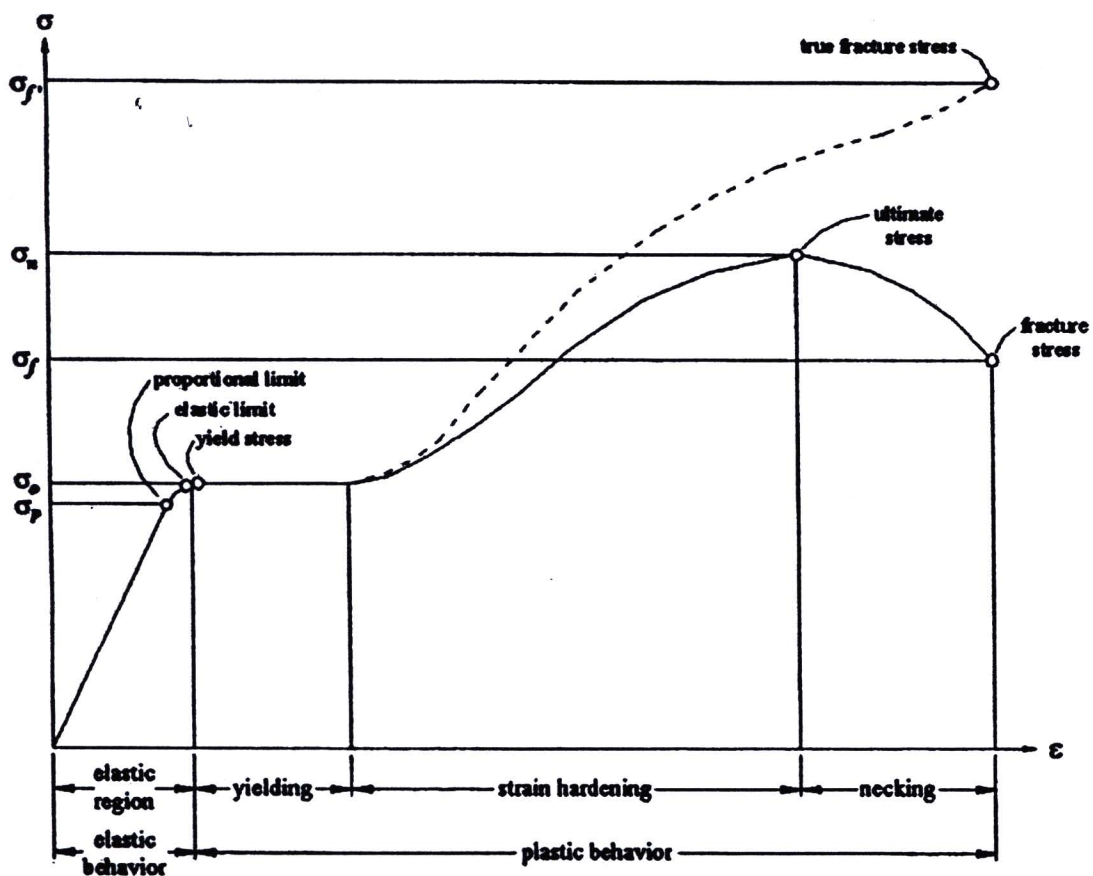


บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.1.1 ทฤษฎีการเปลี่ยนรูปในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Deformation)

ขณะที่วัสดุถูกแรงภายนอกกระทำ วัสดุจะเริ่มยืดขยายตัว ทำให้รูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ช่วงแรกของการเปลี่ยนรูป เรียกว่า การเปลี่ยนรูปในช่วงพลาสติก ซึ่งในขณะที่มีแรงกระทำจะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูป และถ้าลดแรงที่มากระทำจะทำให้วัสดุจะหดยกลับสภาพเดิมทันที (แรงที่มากระทำ ต้องไม่ทำให้ความเค้นมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความเค้นคราก σ_y ของวัสดุนั้น)



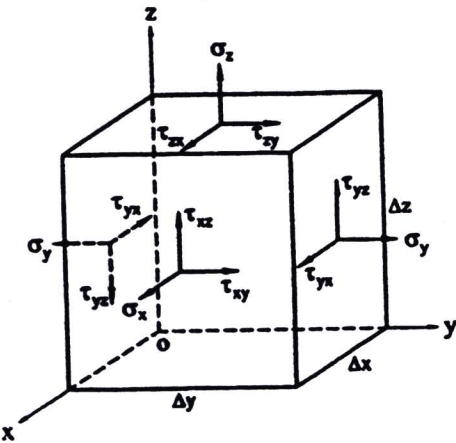
รูปที่ 2.1 พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของวัสดุ [5]

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นจะเป็นในลักษณะเชิงเส้น การเพิ่มขึ้นของแรงกระทำจะทำให้เพิ่มความเครียดเป็นสัดส่วน ซึ่งหลักการนี้จะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) ดังสมการที่ 2.1

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.1)$$

- เมื่อ σ คือ ความเค้น
- E คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Young's Modulus)
- ε คือ ค่าความเครียด

เมื่อพิจารณาวัสดุลูกบาศก์ที่มีขนาด dx, dy และ dz ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สภาวะของความเค้น 3 มิติ [1]

จะเห็นว่าส่วนประกอบของเวกเตอร์ความเค้นในทิศทาง x, y และ z หรือ σ_x, σ_y และ σ_z ถ้ากำหนดให้พื้นที่แต่ละด้านมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นแต่ละด้านจึงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้สภาวะสมดุลรอบแกน z ดังนั้น $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ และในทำนองเดียวกัน $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ และ $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ จากรูปที่ 2.2 เมื่อนำความเค้นที่เกิดขึ้นทั้งหมด 9 ค่ามาเขียนเป็นสมการที่อยู่ในรูปของเทนเซอร์ความเค้น (Stress Tensor) ได้ดังนี้

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

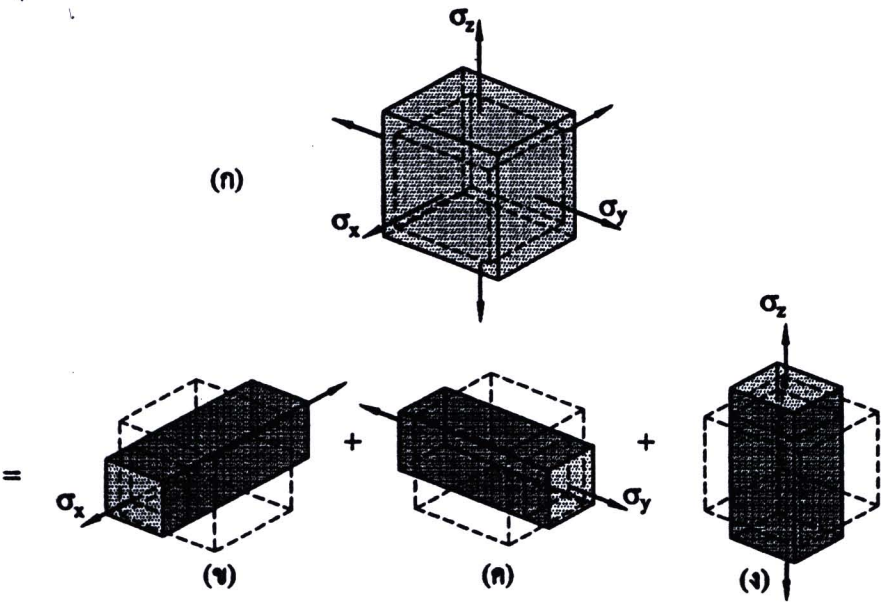
ความเค้นในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวเรียกว่าความเค้นหลัก (Principle Stress) เมื่อความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับศูนย์ และเรียกระนาบที่ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับศูนย์นี้ว่าระนาบหลัก ดังนั้นเทนเซอร์ความเค้นหลักสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

เมื่อ σ_x, σ_y และ σ_z คือความเค้นหลัก
เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากถูกแรงดึงกระทำตามแนวแกน ไม่เพียงแต่จะเกิดการยืดตัวใน
ทางด้านยาวเท่านั้น ยังเกิดการหดตัวทางด้านข้างด้วยอัตราส่วนความเครียดตามแนวแกน และด้านข้าง
จะมีอัตราส่วนที่ เรียกอัตราส่วนนี้ว่า อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's Ratio) ดังสมการที่ 2.4

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} \tag{2.4}$$

เมื่อรวมความเครียดในแต่ละทิศทางเข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด
ในปัญหา 3 มิติ ดังรูปที่ 2.3 คือ



รูปที่ 2.3 วัสดุที่ถูกความเค้นกระทำใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน [1]

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \tag{2.5a}$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \tag{2.5b}$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \tag{2.5c}$$

เมื่อพิจารณาความเค้นเฉือน

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \tag{2.6a}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \tag{2.6b}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \tag{2.6c}$$

เมื่อ γ คือ ความเครียดเฉือน
 τ คือ ความเค้นเฉือน
 G คือ โมดูลัสเฉือนของวัสดุ (Modulus of Rigidity) ซึ่ง $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

อย่างไรก็ตามสามารถหาความเค้นฉากของปัญหาสามมิติได้จากความเครียดฉาก ดังนี้

$$\sigma_x = \frac{E}{1+\nu^2} [\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \tag{2.7a}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1+\nu^2} [\epsilon_y + \nu(\epsilon_x + \epsilon_z)] \tag{2.7b}$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu^2} [\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)] \tag{2.7c}$$

2.1.2 ความเค้น – ความเครียดเฉลี่ยและเบี่ยงเบน

เมื่อวัสดุเกิดแรงกระทำจะทำให้เกิดความเค้นและความเครียดขึ้น ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุสามารถแยกออกเป็นความเครียดเฉลี่ย (Mean Stress) หรือความเค้นไฮโดรสแตติก (Hydrostatic Stress) และความเค้นเบี่ยงเบน (Deviatoric Stress) ความเค้นเฉลี่ยจะทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปได้ในสภาวะพลาสติกเท่านั้น ซึ่งความเค้นชนิดนี้จะมีขนาดเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งสามารถเขียน เป็นสมการ ที่2.8 ดังนี้

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{kk}}{3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{2.8}$$

หรือ σ'_{ij} จะเป็นความเค้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปภายในเนื้อวัสดุ เมื่อรวมความเค้นทั้งสองเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นสมการความเค้นรวมในรูปของเทนเซอร์ เป็นดังนี้

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m \tag{2.9}$$

ดังนั้นความเค้นเบี่ยงเบนคือ

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \tag{2.10}$$

เมื่อ δ_{ij} คือ โครเนกแคร์เดลต้า (Kronecker Delta)

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \tag{2.11}$$

ถ้า $i = j$ ทำให้ σ_{ij} มีค่าเท่ากับหนึ่ง และ $i \neq j$ ทำให้ σ_{ij} มีค่าเท่ากับศูนย์
ในสภาวะความเค้นสามมิติ วัสดุจะมีปริมาตรเท่ากับ $(1 + \epsilon_x)(1 + \epsilon_y)(1 + \epsilon_z)dxdydz$ และปริมาตรที่เปลี่ยนไปจากเดิมคือ

$$\delta V = (1 + \epsilon_x)(1 + \epsilon_y)(1 + \epsilon_z)dxdydz - dxdydz \tag{2.12}$$

ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงต่อปริมาตรเดิมเรียกว่าความเครียดเชิงปริมาตร (Volumetric Strain) หรือ Δ มีค่าเท่ากับ

$$\Delta = \frac{\delta V}{V} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z \tag{2.13}$$

ดังนั้นความเครียดเฉลี่ยคือ

$$\epsilon_m = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z}{3} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3} = \frac{\Delta}{3} \tag{2.14}$$

ส่วนความเครียดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปวัสดุหรือความเครียดเบี่ยงเบนคือ

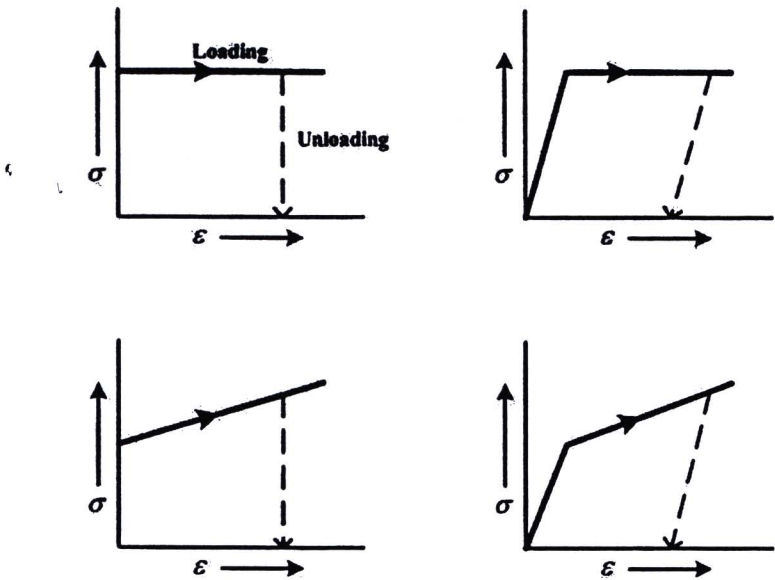
$$\epsilon'_{ij} = \epsilon_{ij} + \epsilon_m \tag{2.15}$$

$$\epsilon'_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{\Delta}{3} \delta_{ij} \tag{2.16}$$

- เมื่อ ϵ'_{ij} คือ ความเครียดเบี่ยงเบน
- ϵ_m คือ ความเครียดเฉลี่ย
- ϵ_{ij} คือ เทนเซอร์ความเครียด

2.1.3 ทฤษฎีในการเปลี่ยนรูปถาวรหรือในช่วงพลาสติก (Plastic Deformation)

ในการขึ้นรูปวัสดุโลหะแผ่นให้เป็นไปตามที่ต้องการนั้น จะต้องให้แรงกระทำเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร โดยที่ความเค้นที่เกิดขึ้นจะต้องมากกว่าความเค้นครากตัว ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่จะทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ผลจากการทดสอบการดึงจะพบพฤติกรรมของวัสดุแบ่งได้เป็นสองช่วงอย่างชัดเจนคือช่วงยืดหยุ่นและช่วงเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหรือช่วงพลาสติก พฤติกรรมเหล่านี้มีด้วยกันหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถแสดงด้วยแบบจำลอง (Model) ของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.4 แบบจำลองพฤติกรรมระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ [6]

การพิจารณาการเปลี่ยนรูปจะใช้เกณฑ์การคราก (Yield Criterion) เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดการเปลี่ยนรูปจากพลาสติกไปเป็นพลาสติก ทฤษฎีพื้นฐานที่นิยมใช้ในการทำนายการครากตัวของโลหะแผ่นคือ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ทฤษฎีฟอนมิเชส (Von Mises Theory) และทฤษฎีของฮิล (Hill Theory) ในส่วนของทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีฟอนมิเชสจะมีข้อสมมุติฐานว่าวัสดุมีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ส่วนของทฤษฎีของฮิลจะพิจารณาอิทธิพลของโลหะที่ผ่านการรีด (Anisotropy) ในการใช้เกณฑ์การครากสำหรับการวิเคราะห์ชิ้นงานนี้จะใช้ทฤษฎีการครากของฮิล ทฤษฎีนี้เหมาะสำหรับวัสดุโลหะแผ่นที่มีคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก

1. การคราก

เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจนกระทั่งความเค้นที่เกิดขึ้นจนผ่านจุดครากวัสดุจะอยู่ในช่วงพลาสติก ในขณะที่ครากสามารถใช้เกณฑ์การครากซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$f\{\sigma\} = \text{Constant} \quad (2.17)$$

ความเค้นคราก (σ_0) นั้นจะเป็นความเค้นในช่วงเริ่มต้นของช่วงพลาสติก ซึ่งในงานขึ้นรูปโลหะจะให้ความสำคัญค่อนข้างมาก เมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นมากกว่าความเค้นคราก วัสดุจะเริ่มการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ผลของแรงกระทำที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่างจะพิจารณาจากความเค้นเบี่ยงเบน ซึ่งสามารถอธิบายได้ในเทอมของ $f(J_2, J_3) = \text{Constant}$ ดังนี้

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.18)$$

$$J_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 + \frac{1}{27}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)[2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - 9(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (2.19)$$

เมื่อ J_2 และ J_3 คือลำดับที่สองและสามของความเค้นเบี่ยงเบน

2. ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดหรือทฤษฎีการครากของเทรสกา (Tresca Yield Theory) ซึ่งกล่าวไว้ว่า วัสดุจะเกิดการครากเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ด้วยวิธีความเค้นเฉือนบริสุทธิ์ (Pure Shear) ในที่นี้กำหนดให้ k มีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการดึง ซึ่ง $\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ดังนั้น ความเค้นเฉือนสูงสุดของวัสดุคือ

$$\tau_{\max} = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|}{2} = \frac{|\sigma_2 - \sigma_3|}{2} = \frac{|\sigma_3 - \sigma_1|}{2} = \frac{\sigma_0}{2} = k \quad (2.20)$$

ดังนั้น

$$k = \frac{\sigma_0}{2} \quad (2.21)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่จะทำให้วัสดุเริ่มครากเท่ากับครึ่งหนึ่งของความเค้นคราก วัสดุทดสอบ

3. ทฤษฎีของฟอนมิเซส

ทฤษฎีของฟอนมิเซสหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Energy Theory) ซึ่งฟอนมิเซสได้เสนอว่าการครากจะเกิดขึ้น เมื่อพลังงานแปรรูปภายในวัสดุภายใต้แรงกระทำมีค่าเท่ากับพลังงานแปรรูปจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุทดสอบ ซึ่งก็คือค่าความเค้นเบี่ยงเบนอันดับสอง J_2

ซึ่ง $J_2 = k^2$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \tag{2.22}$$

ในกรณีของชิ้นงานทดสอบที่ได้รับแรงดึง $\sigma_1 = \sigma_0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$

$$J_2 = \frac{1}{6}(\sigma_0^2 + \sigma_0^2) = k^2 \tag{2.23}$$

$$\sigma_0 = \sqrt{3}k \tag{2.24}$$

เมื่อ σ_0 คือ ความเค้นคราก
 k คือ ความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง

สำหรับวัสดุทดสอบที่ได้รับแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว $\tau = \sigma_1 = -\sigma_3, \sigma_2 = 0$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.22) จะได้สมการการครากคือ

$$\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + 4\sigma_1^2 = 6k \tag{2.25}$$

$$\sigma_1 = k \tag{2.26}$$

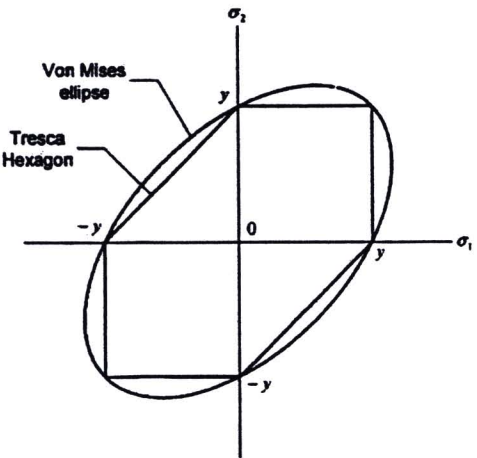
จากสมการที่ (2.24) และ (2.26) จึงสามารถหาค่า k ได้คือ

$$k = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} = \sigma_1 \tag{2.27}$$

จาก $J_2 = k^2$ สามารถจัดสมการที่ (2.22) และ (2.27) ได้ใหม่คือ

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{2.28}$$

จะเห็นได้ว่าการครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\sqrt{3}}$ เท่าของความเค้นครากที่ได้จากการทดสอบวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบทฤษฎีทั้งสองโดยพิจารณาจากรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงกรอบการแตกหักของวัสดุพบว่าทฤษฎีของฟอนมิเซสให้ผลการทำนายการครากใกล้เคียงมากกว่าทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับงานขึ้นรูปโลหะแผ่น



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบกรอบการแตกหัก [6]

4. ทฤษฎีของฮิล

ทฤษฎีการครากของฮิลจะพิจารณาคูณสมบัติแอนไอโซทรอปิกเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลอย่างหนึ่งของวัสดุโลหะแผ่นที่ผ่านกรรมวิธีการรีด สมมุติฐานของฮิลคือวัสดุเป็นเนื้อสม่ำเสมอและสมมาตรกัน ซึ่งฮิลได้สร้างสมการการครากไว้ดังนี้

$$F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \tag{2.29}$$

เมื่อ F, G, H, L, M และ N คือค่าคงตัวซึ่งเป็นคุณลักษณะของวัสดุในแต่ละทิศทาง เมื่อพิจารณาในเทอมของความเค้นหลักจะได้

$$F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = 1 \tag{2.30}$$

- ถ้ากำหนดให้ X คือ ความเค้นครากในทิศทาง x
- Y คือ ความเค้นครากในทิศทาง y
- Z คือ ความเค้นครากในทิศทาง z

เมื่อทดสอบแรงดึงในทิศทาง x ดังนั้น $\sigma_1 = X, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ เมื่อแทนลงในสมการที่ (2.30) จะได้

$$X^2 = \frac{1}{G + H} \tag{2.31}$$

ดังนั้นสภาวะการครากจะได้ดังนี้

$$X^2 = \frac{F}{G+H}(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \frac{G}{G+H}(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + \frac{H}{G+H}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 \quad (2.32)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อทดสอบการดึงในทิศทาง y และ z จะได้

$$Y^2 = \frac{1}{H+F} \quad (2.33)$$

$$Z^2 = \frac{1}{F+G} \quad (2.34)$$

Lubahn, J.D. และ Felgar, R.P.[5] ได้เสนอการคำนวณหาพฤติกรรมของวัสดุในแต่ละทิศทางการรีด โดยพิจารณาบนความเค้นระนาบ (Plane Stress) ซึ่ง σ_3 เกิดขึ้นน้อยมากจนสามารถตัดออกไปได้ ดังนั้นสมการที่ (2.30) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$F\sigma_2^2 + G\sigma_1^2 + H(\sigma_1^2 - 2\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2) = 1 \quad (2.35)$$

หรือ

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (2.36)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.31) และ (2.33) ลงใน (2.36) จะได้

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 - 2HXY\left(\frac{\sigma_1\sigma_2}{XY}\right) = 1 \quad (2.37)$$

เพื่อความสะดวกกำหนดให้ความเค้นครากในระนาบของโลหะแผ่นมีค่าเท่ากันนั่นคือ $X = Y$ ดังนั้น

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2HY^2\sigma_1\sigma_2 = Y^2 \quad (2.38)$$

และจากสมการที่ (2.18) จะได้

$$G = F = \frac{1}{2Z^2} \text{ และ } HY^2 = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{Y}{Z}\right)^2 \quad (2.39)$$

ในการหาความเค้นครากในทิศทางตามความหนาของแผ่นโลหะหรือค่า Z กระทำได้ยาก ดังนั้นจึงใช้สถานะเวดล้อมในการหาค่า R หรือ อัตราส่วนความเครียดพลาสติก (Plastic Strain Ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนความเครียดด้านกว้างต่อความเครียดด้านหนา ดังนี้ [7]

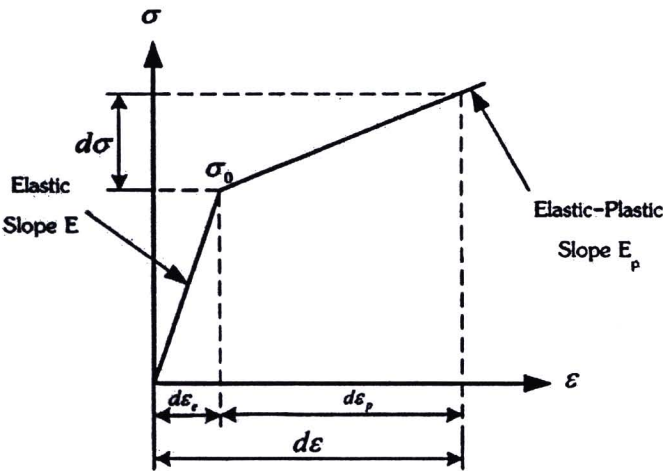


$$R = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t}\right)} \tag{2.40}$$

จาก $\left(\frac{Z}{Y}\right)^2 = \frac{1}{2}(1 + R)$ ดังนั้นกรอบการครากของฮิล สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \frac{2R}{1+R}\sigma_1\sigma_2 = Y^2 \tag{2.41}$$

2.1.4 ความเครียดแข็ง



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมความเครียดแข็งของวัสดุ [6]

เมื่อวัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรเช่นวัสดุโลหะผ่านการขึ้นรูป วัสดุจะเกิดความเครียดขึ้น ความเครียดในเนื้อวัสดุจะเกิดการสะสมทำให้จะต้องใช้แรงมากกว่าเดิมเพื่อให้วัสดุเปลี่ยนรูปร่าง สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบอิลาสติก-พลาสติก โดยในส่วนของอิลาสติกใช้สมการของฮุกและส่วนของพลาสติกใช้สมการของราส (Reuss) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\epsilon = \epsilon^E + \epsilon^P \tag{2.42}$$

หรือ

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \epsilon^P \tag{2.43}$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ห้องสมุดวิจัย

วันที่ 27 มิ.ย. 2555

เลขทะเบียน 247094

เลขเรียกหนังสือ

สำหรับการวิเคราะห์ประเด็นปัญหาการขึ้นรูปโลหะนี้จะนำไปตามกฎของโฮโลมอน (Hollowmon's Law) ดังสมการที่ (2.44)

$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{2.44}$$

- เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ความแข็งของวัสดุ (Strength Coefficient)
- n คือ เลขยกกำลังของความเครียดแข็ง (Strain Hardening Exponent)

2.1.5 ความเสียดทาน

สำหรับความเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการขึ้นรูปโลหะจะเป็นไปตามกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's Law) ซึ่งอธิบายอยู่ในรูปของ $F_f = \mu F_N$ เมื่อ F_f คือแรงเสียดทาน, μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และ F_N คือแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับชิ้นงานหรือเขียนได้อีกอย่างคือ

$$\tau_f = \mu \sigma_N \tag{2.45}$$

- เมื่อ τ_f คือ ความเค้นเสียดทาน
- σ_N คือ ความเค้นที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับชิ้นงาน

2.2 การลากขึ้นรูป (Drawing) [7]

การลากขึ้นรูป เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปโลหะแผ่นวิธีหนึ่ง โดยพันซ์กดแผ่นโลหะแบนให้ไหลเข้าไปในช่องเปิดของคาย เพื่อทำให้เกิดรูปทรงกลวงที่ไม่มีตะเข็บ เช่น ถ้วยกรวย กล่องหรือรูปทรงต่างๆที่คล้ายคลึงกับที่กล่าวมาแล้ว เป็นต้น แผ่นโลหะที่นำมาลากขึ้นรูปนั้นจะเกิดการคัดผ่านปลายของพันซ์และในเวลาเดียวกัน โลหะที่อยู่ทางด้านนอกของแผ่นขึ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางของแผ่นขึ้นงานเรื่อยๆ จนกระทั่งโลหะไหลไปตามรัศมีต่างๆของคาย และแผ่นขึ้นงานจะเปลี่ยนรูปทรงไปจนเหมือนกันกับรูปทรงช่องเปิดของคาย ในขณะที่โลหะที่อยู่ด้านนอกเคลื่อนที่เข้าหาศูนย์กลางแผ่นขึ้นงานจะมีความหนาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแผ่นขึ้นงานเคลื่อนที่ผ่านรัศมีของคาย แรงดึงที่เกิดขึ้นระหว่างปลายพันซ์กับรัศมีของคาย (Clearance) ด้วย กรรมวิธีการลากขึ้นรูปโลหะมีใช้ในการทำผลิตภัณฑ์อุปโภคและเครื่องจักรกลต่างๆ กรรมวิธีการลากขึ้นรูปแบ่งเป็น 2 วิธีคือ

- การลากขึ้นรูป (Drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปแผ่นวัสดุให้เกิดรูปทรง โดยใช้พันซ์ คาย และมีตัวกดแผ่นขึ้นงานกดแผ่นวัสดุไว้ในขณะทำการลากขึ้นรูป โดยความสูงของขึ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปจะไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของขึ้นงาน

- การลากขึ้นรูปลึก (Deep Drawing) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปแผ่นวัสดุให้เกิดรูปทรง โดยใช้แรงกดแผ่นขึ้นงานหรือขึ้นงานที่อยู่ภายใต้แรงกด (ด้วยตัวกดแผ่นขึ้นงาน) ให้ผ่านเข้าไปข้างในหรือผ่านออกไปจากคายโดยใช้พันซ์เพื่อทำให้เกิดรูปทรงกลวง โดยที่ความหนาของขึ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปลึกนี้จะเท่ากับความหนาเดิมของวัสดุ ความสูงของขึ้นงานที่ได้จากการลากขึ้นรูปลึก อย่างน้อยต้องมากกว่าครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขึ้นงาน

ตัวแปรของการลากขึ้นรูป (Variable of Drawing)

ตัวแปรของกรรมวิธีการลากขึ้นรูปด้วยจะต้องมีการวิเคราะห์ขึ้นมา ระบบที่ใช้วิเคราะห์ตัวแปรที่ใช้ในที่นี้จะทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปของโลหะที่เป็นไปตามชนิดของตัวแปรที่ใช้หลายๆแบบ ตัวแปรแต่ละอันจะถูกแสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้านความเหมาะสมของวัตถุดิบที่ใช้ คาย เครื่องปั๊มโลหะ การออกแบบแม่พิมพ์ และการควบคุมกระบวนการผลิต

1. ตัวแปรเกี่ยวกับการงอและทำให้ตรง (Bending and Straightening Variables)

ตัวแปรหลักที่ทำให้แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปมากขึ้นหรือลดลงเนื่องจากการงอและการทำให้ตรงคือ

- รัศมีของพันซ์ ได้ถูกสร้างขึ้นมาบนแท่งพันซ์ขนาดรัศมีของพันซ์ที่ใช้จะถูกคำนวณโดยวิศวกรทางด้านกระบวนการผลิต หรือวิศวกรออกแบบคาย รัศมีของพันซ์ที่ใช้ในการลากครั้งรูปใหม่

ครั้งสุดท้ายจะเป็นตัวกำหนดรัศมีของถ้วยที่ต้องการทำขึ้นมา ในขณะที่ทำการลากขึ้นรูปจะต้องมีการตกแต่งส่วนโค้งที่รัศมีของถ้วยบ่อยๆ รัศมีที่เล็กกว่าจะทำให้ต้องใช้แรงในการงอสูงกว่า

- **รัศมีของคาน** ได้ถูกสร้างขึ้นมานบนแท่งคาน มีลักษณะคล้ายกับรัศมีของพันทซ์ รัศมีของคานจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งการงอครั้งแรกของชิ้นงาน ถ้ารัศมีของคานเล็กไปอาจจะต้องใช้แรงในการงอสูงขึ้นเกือบเท่ากับแรงที่ใช้ทำให้ตรง

- **องศาของการขึ้นรูป** ตามปกติแล้วชิ้นงานจะถูกอัดขึ้นเป็นมุม 90 องศา แต่อาจจะทำให้เล็กลงหรือเพิ่มขึ้นได้ โดยทำมุมที่ผิวหน้าของคานกับแนวระดับ ซึ่งตามปกติแล้ววิธีการแบบนี้ไม่นิยมใช้ในการลากขึ้นรูปด้วย มุมของการงอซึ่งได้ทำให้รัศมีของคานน้อยกว่า 90 องศา จะทำให้แรงที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยลง ที่มุมนี้แผ่นชิ้นงานได้ถูกแผ่นชิ้นงานกดให้เป็นรูปร่างคล้ายจานก่อนที่จะแท่งพันทซ์จะลงมาสัมผัส

2. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเสียดทาน (Friction Variables)

มีตัวแปรหลายๆอย่างที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานนิ่งและความเสียดทานเคลื่อน ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะทำให้แรงที่ใช้ปกติหรือสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานเปลี่ยนไป ซึ่งได้แก่

- **สารหล่อลื่น** ได้ถูกนำไปใช้ที่แผ่นชิ้นงานหรือผิวหน้าก่อนที่จะลากขึ้นรูป สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติในตัวได้ดีจะช่วยลดความเสียดทาน สารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติด้านทานต่อความดันสูงได้ดีจะเพิ่มความเสียดทาน การเลือกใช้สารหล่อลื่นเป็นหน้าที่ของวิศวกรหรือหัวหน้าช่างด้านการผลิต

- **แรงของแผ่นยึดชิ้นงาน** เป็นแรงที่ใช้ปกติแต่จะเป็นสาเหตุให้ความเสียดทานเพิ่มขึ้นตามปกติแล้วตัวแปรนี้จะถูกควบคุมโดยผู้ตั้งคานหรือหัวหน้าช่างด้านการผลิต แต่จะระบุขนาดโดยผู้ออกแบบคาน

- **ความเรียบของผิวหน้าโลหะแผ่นที่นำมาใช้ขึ้นรูปทั้งสองด้าน** จะระบุขนาดโดยผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ ถ้ากำหนดความหยาบของผิวหน้าไว้เป็นค่าสูงจะทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้น คุณสมบัติของผิวหน้าที่ทำขึ้นโดยกระบวนการรีดขึ้นรูป เรียกว่าเทมเปอร์ (Temper) หรือ สกินพาส (Skin Pass) ความเรียบของผิวหน้าของพันทซ์ คาน และแผ่นยึดชิ้นงาน ซึ่งได้ถูกทำขึ้นมาระหว่างการสร้างแม่พิมพ์ตามปกติแล้วจะระบุขนาดเอาไว้ในการออกแบบคาน หลังจากทำการผลิตได้เริ่มแล้วตัวแปรนี้จะถูกควบคุมโดยแผนบำรุงรักษาคาน

3. ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอัด (Compression Variable)

ตัวแปรนี้มีผลกระทบการเพี้ยนถึงแรงที่ใช้ในการบีบอัดและเป็นการยากที่จะเข้าใจ การอัดนั้นต้องการใช้เพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโลหะแผ่น โดยทำให้โลหะไหลตัวไปบนรัศมีของคาน ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอัด คือ

- เปอร์เซ็นต์การลดตัว (Percent of Reduction) ของเส้นผ่านศูนย์กลางหรือเส้นรอบรูป ซึ่งคำนวณได้จากการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานและเส้นผ่านศูนย์กลางของพันธ์ จากสูตร

$$\% \text{Re} = \frac{D-d}{D} \times 100 \quad (2.46)$$

ขนาดจำลองของการลากขึ้นรูปนั้น จะอยู่ใกล้เคียงกับ 50%Re โดยผลของ %Re มีดังนี้ ถ้าทำการลากขึ้นรูปที่ %Re น้อย แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะน้อย แต่ถ้าทำการลากขึ้นรูปที่ %Re มาก แรงที่ใช้ในการลากขึ้นรูปจะมาก เพราะจะอธิบายถึงปริมาณของโลหะที่จะถูกอัด ถ้า %Re มาก ปริมาณของโลหะที่ถูกอัดก็มาก ทำให้ต้องใช้แรงในการลากขึ้นรูปมากตามไปด้วย

- ความลึกของการลากขึ้นรูปหรือความสูงของคาย จะชี้ให้เห็นถึงเปลี่ยนแปลงของขนาดการอัดที่ต้องการ ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของถ้วยหลังจากการขึ้นรูปไม่ถูกทำให้แปรเปลี่ยนขนาดอีกจะเห็นว่าถ้วยที่มีความลึกกว่าต้องการแผ่นชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นปริมาณการบีบตัวที่ใช้จึงสูงกว่าในการลากขึ้นรูปครั้งแรก (First Draw) และในการลากขึ้นรูปใหม่ (Redraw) ครั้งต่อไป ตัวแปรนี้จะเป็นความรับผิดชอบของผู้ออกแบบคาย แต่ถ้าเป็นการลากขึ้นรูปครั้งสุดท้ายและจะเป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์

- ความเหนียวของโลหะแผ่น หรือความสามารถในการรูปร่างโดยปราศจากการแตก แม้ว่าความเหนียว คือ การวัดคุณสมบัติได้แรงดึง แต่มันก็จะชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการอัดและการขึ้นรูปด้วย ความเหนียวได้ถูกวัดโดยการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ในรูปเปอร์เซ็นต์รวมการยืดหยุ่นตัว การยืดหยุ่นตัวในรูปแบบเดียวกันและอัตราส่วนของการดึงต่อความแข็งแรงถ้าตัวเนื่องจากความเหนียวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุ ดังนั้นผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์จะต้องระบุถึงรายละเอียดของวัสดุที่ใช้

- ความแข็งแรงล้าตัว เป็นจุดที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของโลหะได้เกิดขึ้น ความแข็งแรงล้าตัวต่ำเป็นสิ่งที่ต้องการของกรรมวิธีการลากขึ้นรูป เพราะจะทำให้การลากขึ้นรูปเริ่มต้นได้โดยไม่เกิดการฉีกขาดอย่างรุนแรงของโลหะที่บริเวณใกล้ดรัมมี่ของคาย ดังนั้นสามารถควบคุมได้โดยการตั้งมาตรฐานเฉพาะของวัสดุขึ้นมา ความแข็งแรงที่จะทำให้ล้าตัวโดยการอบคืนตัว (Anneal) แผ่นชิ้นงาน

- อัตราส่วนความหนาต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงาน (Thickness-to-Diameter Ratio) โดยจะส่งผลไปถึงแรงที่ใช้อัด อัตราส่วนของความหนาต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นชิ้นงานจะใช้เพื่อทำนายความรุนแรงของการเกิดรอยยับ ซึ่งสามารถที่จะหาได้ในรูปของเปอร์เซ็นต์ดังต่อไปนี้

ให้ t คือ ความหนาของแผ่นชิ้นงาน

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแผ่นชิ้นงาน

$$\text{จะได้ } \frac{t}{D} \times 100\%$$

เมื่อทำการคำนวณค่าที่ได้ออกมาสามารถทำนายได้ดังนี้

เมื่อ $\%t/D \leq 0.50$ รอยย่นจะเกิดรุนแรงมาก และ แรงอัดต้องถูกทำให้ลดลง แผ่นยึดชิ้นงานต้องถูกนำมาใช้ในการลากชิ้นรูป

เมื่อ $0.50 \leq \%t/D \leq 1.50$ รอยย่นจะเกิดขึ้นปานกลางและยอมให้ใช้แรงของแผ่นยึดชิ้นงานต่ำ

เมื่อ $1.50 \leq \%t/D \leq 2.50$ รอยย่นจะเกิดขึ้นน้อยมาก ถ้าแรงอัดได้ถูกทำให้ลดลงโดยการใช้น้ำที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้แผ่นยึดชิ้นงาน

เมื่อ $\%t/D \geq 2.50$ จะไม่มีรอยย่นปรากฏขึ้น แสดงว่าไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นยึดชิ้นงาน

‘ ถึงแม้จะมีแรงอัดสูงมากก็ตาม

- คุณสมบัติของแผ่นชิ้นงานระหว่างการลากชิ้นรูป คุณสมบัติที่สูงขึ้นทำให้โลหะอ่อนตัวลง เป็นการลดแรงที่ใช้ในการบีบหรืออัด แต่จะไปทำให้ความแข็งแรงของโลหะแผ่นลดลง อาจจะเป็นผลทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่าย การแก้ไขปัญหานี้ ก็คือให้ความร้อนเฉพาะบริเวณพื้นที่ของแผ่นชิ้นงานที่ถูกอัดเท่านั้น

4. ตัวแปรที่เกี่ยวกับการยึดชิ้นรูป (Stretch Forming Variables)

การยึดชิ้นรูปถือเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งของกรรมวิธีการลากชิ้นรูป การยึดชิ้นรูปจะรวมไปถึงการเกิดการดึงในทิศทางอื่นๆบนโลหะแผ่นด้วย โดยทำโลหะแผ่นให้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากการทดสอบแรงดึงในแกนเดียวกัน ตัวแปรที่ใช้ประเมินผลของการยึดชิ้นรูป คือ

- ค่าโอเซนคัพปิง (Olsen Cupping Value) เป็นค่าที่แสดงถึงระยะการกินลึกลงบนโลหะแผ่นแบนของลูกโลหะกลมจนกระทั่งโลหะนั้นเกิดการแตก ไม่มีการทดสอบการดึงลงหรือการลากลงของโลหะแผ่นลงไปในคาน มีแต่การทดสอบที่ได้จำลองการลากชิ้นรูปของโลหะเหนือปลายพื้นที่มีรูปร่างโค้งกลมที่ตำแหน่งเริ่มต้นของการลากชิ้นรูป โลหะใดที่มีค่า Olsen สูง แสดงให้เห็นว่าการยึดชิ้นรูปของโลหะนั้นมีโอกาสที่จะประสบผลสำเร็จ

- เลขยกกำลังความเครียดแข็ง (Strain Hardening Exponent : n) เป็นเส้นลากเอียง (Slope) ของขอบเขตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรของเส้นโค้งบนกราฟความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain curve) ถ้าค่า n มีค่าสูงจะทำให้โลหะแข็งตัวอย่างรวดเร็วมากระหว่างกระบวนการเปลี่ยนรูป หรืออาจจะเรียกว่า การยึดหยุ่นในรูปแบบเดียวกัน

5. ตัวแปรที่ปะปนกัน (Miscellaneous Variables)

มีตัวแปรหลายอันที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปแต่ไม่สามารถจัดประเภทเอาไว้ในหัวข้อที่กล่าวมาได้ ตัวแปรเหล่านั้น ได้แก่

- ช่องว่างระหว่างพันธและคาย เป็นช่องว่างที่ยอมให้โลหะผ่านลงไปในคาย ตามปกติแล้ว ถ้าโลหะที่มีความหนาถูกนำมาลากขึ้นรูปขนาดช่องว่างก็ถูกทำให้ใหญ่ขึ้น ถ้าขนาดของช่องว่างเท่ากับ ความหนาของแผ่นชิ้นงานหรือน้อยกว่าจะเกิดการขัดถูหรือขัดเป็นมันเงาของโลหะเกิดขึ้นใกล้เคียง ส่วนบนของปากถ้วยซึ่งจะทำให้ความหนาของผนังถ้วยที่ได้รับออกมามีขนาดเท่ากันตลอดและความสูงของถ้วยก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้ตรงกับความต้องการของการออกแบบผลิตภัณฑ์ แต่การทำเช่นนั้นอาจมีผลต่อโครงสร้างของคายที่ทำขึ้นมาได้
- ความเร็วของการลากขึ้นรูป (Drawing Speed) หรือความเร็วที่พันธสัมผัสแผ่นชิ้นงาน ความเร็วที่ตุนปลายของการลากขึ้นรูปจะเป็นศูนย์เนื่องจากข้อต่อได้เคลื่อนที่สู่ระยะค่าเฉลี่ยของ ความเร็วในการลากขึ้นรูปจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วสัมผัสแผ่นชิ้นงาน ตัวแปรนี้จะควบคุมได้ที่เครื่องปั๊มโลหะ
- อัตราส่วนของความเครียด (Strain Ratio, γ) หรือความต้านทานของโลหะแผ่นต่อความ บาง ถ้าโลหะมีอัตราส่วนของความเครียดสูง เมื่อนำไปลากขึ้นรูปจะไม่มีโอกาสฉีกขาดอีกเลย โลหะจะถูกอัดอย่างรวดเร็ว ในทิศทางความกว้างมากกว่าความบาง ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นที่ต้องการของการ ลากขึ้นรูป การควบคุมตัวแปรนี้กระทำได้โดยการบวกรีดขึ้นรูป

2.3 ค่าความต้านทานของโลหะแผ่นต่อความยาว (Plastic Strain Ratio, r)

เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของโลหะแผ่นในการขึ้นรูปให้บาง เป็นตัวแปรที่ใช้วัดคุณสมบัติความไม่เท่ากันในทิศทางต่างๆ (Anisotropy) ของโลหะแผ่น ถ้าวัสดุมีค่า r สูง แสดงว่าสามารถนำไปขึ้นรูปได้ดี เมื่อนำไปลากขึ้นรูปแทบจะไม่มีโอกาสฉีกขาดเลย สามารถหาได้จากอัตราส่วนของความเครียดของความกว้างจริง (True width strain) กับความเครียดของความหนาจริง (True thickness strain)

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{l_0 w_0}{lw}\right)}$$

(2.47)

เมื่อ	r	คือ Plastic Strain Ratio
	ϵ_w	คือ ความเครียดของความกว้างจริง
	ϵ_t	คือ ความเครียดของความหนาจริง
	w	คือ ความกว้างสุดท้าย
	w_0	คือ ความกว้างเริ่มต้น
	t	คือ ความหนาสุดท้าย
	t_0	คือ ความหนาเริ่มต้น
	l	คือ ความยาวสุดท้าย
	l_0	คือ ความยาวเริ่มต้น

จากเงื่อนไขต่อไปนี้ ถ้า ค่า r ไม่เท่ากับ 1.00 จะแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปถาวรที่เบี่ยงเบนไปจากการเปลี่ยนรูปถาวรในปริมาณที่เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ซึ่งเป็นผลพวงมาจากทิศทางการจัดเรียงตัวของระบบผลึกและการจัดเรียงตัวของเกรนในเนื้อโลหะ การกระจายตัวและการเรียงตัวของสิ่งแปลกปลอมและสารมลทินต่างๆ ซึ่งทำให้ความสามารถในการทนต่อแรงดึงในแนวขวางทิศการรีดมีค่าต่ำลง ค่า r จะแปรผันตามมุมการรีดซึ่งสามารถกำหนดค่า r เฉลี่ยได้จากสมการ

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

(2.47)

เมื่อ	r_m	คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานของโลหะแผ่นต่อความยาว
	r_0	คือ ค่าต้านทานของโลหะแผ่นต่อความยาวที่มุม 0 องศา
	r_{45}	คือ ค่าต้านทานของโลหะแผ่นต่อความยาวที่มุม 45 องศา
	r_{90}	คือ ค่าต้านทานของโลหะแผ่นต่อความยาวที่มุม 90 องศา

ตัวเลขที่ขึ้นบอกของค่า r คือ ค่าที่กระทำกับทิศทางการรีด

โดยปกติความผันแปรของค่า r นั้นจะอิงอยู่กับระนาบของแผ่นโลหะ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของวัสดุที่นิยามด้วยตัวแปรที่มีชื่อว่า แพลนนาแอนไอโซโทรปี (Planar anisotropy, Δr) ดังแสดงในสมการ

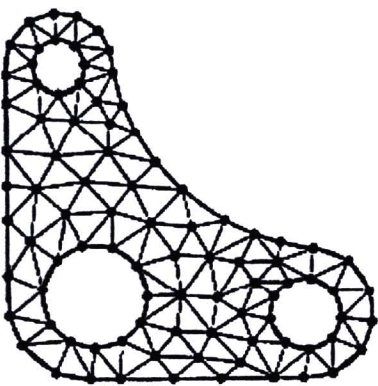
$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - r_{45}}{2} = 2(r_m - r_{45}) \tag{2.48}$$

เมื่อ Δr คือ ค่าความแตกต่างของค่าความต้านทานของโลหะแผ่นต่อความยาว แพลนนาแอนไอโซโทรปีนี้มีบทบาทสำคัญในการทำนายการปูดหรือเอียง (Earing) ในขณะที่ทำการลากขึ้นรูป กล่าวคือ หากค่าแพลนนาแอนไอโซโทรปีมีค่ามากกว่าศูนย์ ก็จะทำนายได้ว่า เอียงที่เกิดขึ้นบริเวณขอบของชิ้นงานจะปรากฏที่มุม 0 และ 90 องศา เมื่อเทียบกับทิศทางการรีด และหากค่าแพลนนาแอนไอโซโทรปีมีค่าเป็นลบก็จะทำให้เกิดเอียงที่มุม 45 องศา การออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดเอียงนั้นทำได้โดยจะต้องทำให้ค่าแพลนนาแอนไอโซโทรปีมีค่าใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด

2.4 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [20]

2.4.1 ความเข้าใจพื้นฐาน

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง โดยปกติแล้วปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกัน รวมทั้งเงื่อนไข ขอบเขต และเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมกัน ค่าการคำนวณซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าต่าง ๆ นับอนันต์ค่า แทนที่จะทำการคำนวณค่าต่างๆ จำนวนมากดังกล่าว ซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการก็คือ ทำการเปลี่ยนค่าตัวแปรจำนวนนับอนันต์ค่านี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (Finite) ซึ่งมีขนาดต่างๆ กันดังตัวอย่างชิ้นงานดังรูปที่ 2.4



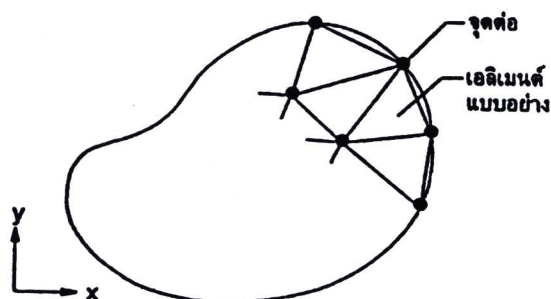
รูปที่ 2.7 การจำลองแผ่นโลหะด้วยเอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์ [20]

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์แล้วทำการสร้างสมการที่เกี่ยวข้องสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ จากนั้นจึงนำสมการแต่ละเอลิเมนต์ประกอบเป็นสมการชุดใหญ่ คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อเกิดเป็นรูปร่างลักษณะปัญหาทั้งหมด จากนั้นจึงทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดลงในสมการชุดใหญ่นี้ แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหา ความเที่ยงตรงของผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับ ขนาด จำนวนและรูปร่างของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นๆ

2.4.2 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

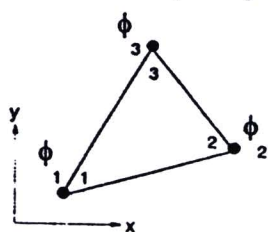
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหาชนิดต่างๆ กัน เช่น ปัญหาการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นในของแข็ง ปัญหาการถ่ายเทความร้อนในของแข็งหรือของเหลว หรือปัญหาการไหลของของเหลว เป็นต้น



รูปที่ 2.8 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดต่างกัน [20]

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ (element interpolation functions) ยกตัวอย่างเช่น เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมในสองมิติ (เอลิเมนต์แบบอย่างดังรูปที่ 2.8) เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในรูป 2.9 โดยที่จุดต่อเหล่านี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (nodal unknowns) ซึ่งคือ Φ_1 , Φ_2 และ Φ_3 ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจ



รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อโดยมีตัวไม่รู้ค่าอยู่ที่ตำแหน่งของจุดต่อ [20]

แทนขนาดของการเสียรูปหากเราแก้ปัญหาการเสียรูปในของแข็ง หรืออาจจะแทนค่าของอุณหภูมิหากเราแก้ปัญหการถ่ายเทความร้อนของของเหลวหากเราแก้ปัญหของการไหลเป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อ ได้ดังนี้

$$\Phi(x,y) = N_1(x,y) \Phi_1 + N_2(x,y) \Phi_2 + N_3(x,y) \Phi_3 \quad (2.49)$$

โดย $N_i(x,y)$, $i = 1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

สมการ (9.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\Phi(x,y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{Bmatrix}$$

$$= [N]_{(1 \times 3)} \{ \Phi \}_{(3 \times 1)} \tag{2.50}$$

โดย $[N]$ แทนเมตริกซ์แถวอน (row matrix) ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\Phi\}$ แทนเวกเตอร์เมตริกซ์แถวตั้ง (column matrix) ที่ประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (element equations) ดังตัวอย่างเช่นสมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมในรูป 2.8 จะอยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \tag{2.51}$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{ \Phi \}_e = \{ F \}_e \tag{2.52}$$

โดยครรขนี้ล่าง e แสดงถึงเมตริกซ์ต่าง ๆ นั้นเป็นเมตริกซ์ระดับเอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนที่ 3 นี้ อาจถือได้ว่าเป็นหัวใจของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสมการของเอลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ ในหัวข้อต่อไป เราจะพบว่า สมการของเอลิเมนต์นี้สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการประยุกต์ระเบียบวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ซึ่งถูกจัดได้ว่าระเบียบวิธีทั่วไปที่นิยมใช้ในการประยุกต์กับปัญหาต่างๆในปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการที่ประดิษฐ์ขึ้นได้จากทุกๆ เอลิเมนต์มาประกอบรวมกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการ (system of equations) ขนาดใหญ่ขึ้นดังนี้

$$\sum (\text{element equations}) \iff [K]_{\text{sys}} \{ \Phi \}_{\text{sys}} = \{ F \}_{\text{sys}} \tag{2.53}$$

โดยตัวห้อย sys บ่งบอกถึงเมตริกซ์ต่างๆเป็นเมตริกซ์ของระบบสมการรวม

ขั้นตอนที่ 5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ลงในระบบสมการ (2.53) จากนั้นจึงแก้สมการนี้เพื่อหา $\{ \Phi \}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อน

ตัวเนื่องจากการเสีรูปในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าของอุณหภูมิสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าความเร็วของของเหลวสำหรับปัญหาของการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณค่าที่ต่อเนื่องอื่นๆหลังจากคำนวณค่าที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 ออกมาได้ แล้ว ยกตัวอย่างเช่น หลังจากรู้ค่าการเคลื่อนตัวของ การเสีรูปในของแข็งก็สามารถคำนวณค่า ความเครียดและความเค้นได้ หรือเมื่อรู้ค่าของอุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณ การถ่ายเทความร้อนได้ หรือเมื่อรู้ค่าความเร็วของการไหลก็สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณอัตราการ ไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

2.4.3 การหาค่าความเครียดและความเค้น

เมื่อคำนวณหาค่าการกระจัดของแต่ละจุดต่อออกมาได้แล้ว ก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆได้เช่น หาค่า ความเค้น ความเครียด เป็นต้น จากนั้นใช้สมการพื้นฐานทางกลศาสตร์ของแข็งช่วยในการหาคำตอบ โดยประมาณต่อไป

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนในระเบียบการทั่วไปของไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่า ระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีหัวใจที่สำคัญคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ (ขั้นตอนที่ 3) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนดมาให้ นั่น ส่วนขั้นตอน อื่นๆเป็นการผสมผสานความรู้ต่างชนิดกันนับตั้งแต่ความรู้ของการประมาณค่าในช่วงซึ่งเราจะ นำมาใช้เพื่อสร้างฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ความรู้ของการอินทิเกรตเชิงตัวเลขซึ่ง จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณเมตริกซ์ต่างๆของ เอลิเมนต์บางชนิด รวมไปถึงการแก้ระบบสมการ รวมเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ที่จุดต่อไป

จากการดำเนินงาน พบว่า วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักใหญ่ๆ คือ

ก. ขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-Processing)

เป็นขั้นตอนการสร้างลักษณะรูปร่างของปัญหาหรือจากโมเดลที่ต้องการวิเคราะห์ การกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ คุณสมบัติของวัสดุ เงื่อนไขขอบเขตตามแต่กรณีการใช้งาน

ข. ขั้นตอนการแก้ปัญหา (Solution)

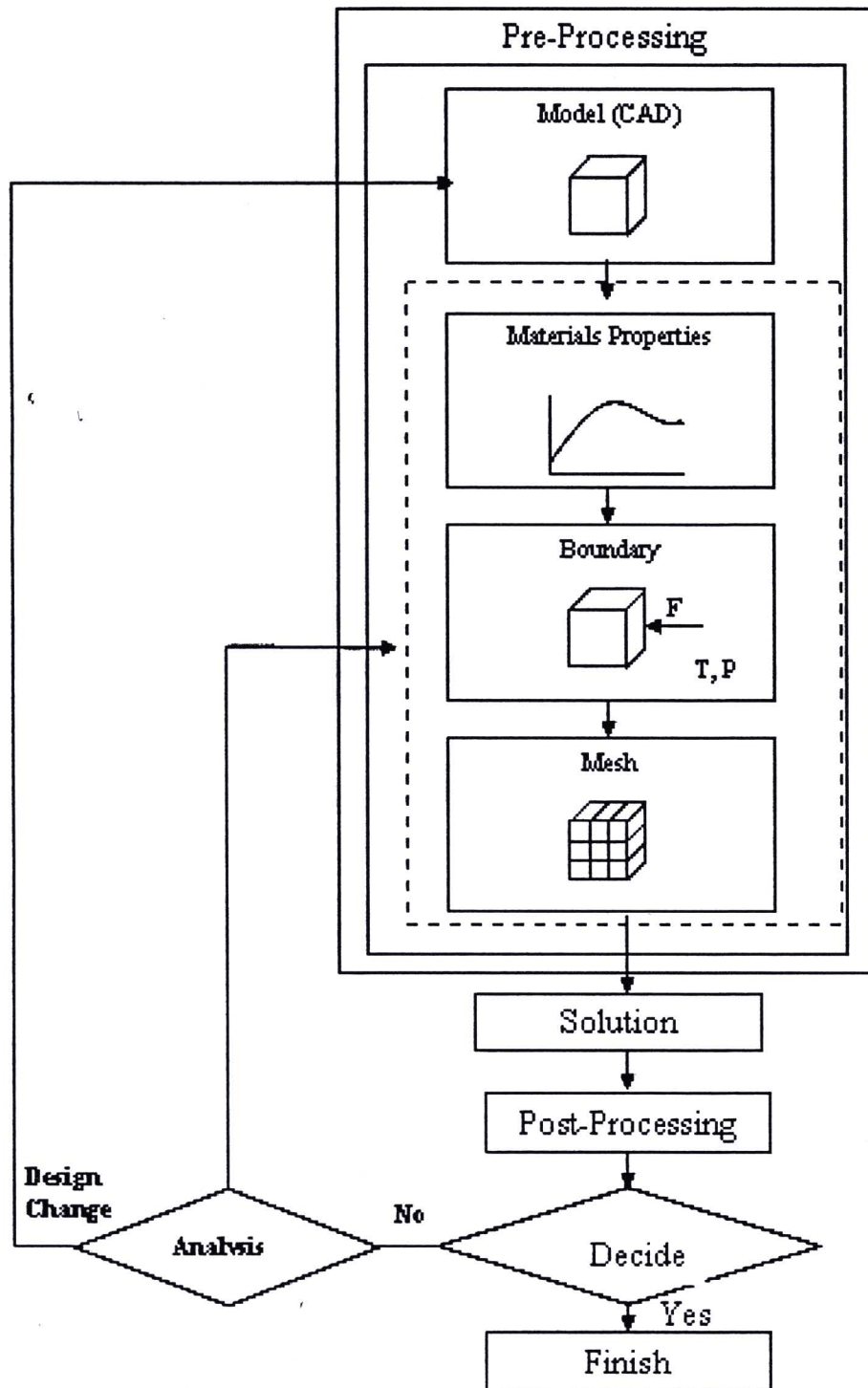
ขั้นตอนนี้ถือเป็นหัวใจของโปรแกรมที่ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณเพื่อหาคำตอบ โดยคอมพิวเตอร์จะ เป็นผู้แก้ปัญหาให้เราโดยอัตโนมัติ

ค. ขั้นตอนของกระบวนการขั้นท้าย (Post-Processing)

เป็นขั้นตอนในการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แก้ปัญหา ทำให้สามารถแสดงผลลัพธ์ให้เห็น ได้หลายวิธี คือ แสดงเป็นเฉดสีบนโมเดล แสดงผลเป็นกราฟ หรือดูการเคลื่อนตัว (Displacement)

ของชิ้นงาน ทำให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในปัญหาได้โดยชัดเจนรวดเร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่

2.10



รูปที่ 2.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [20]

2.4.4 การกำหนดสมบัติของวัสดุโดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์

สมบัติของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริง (True stress – True strain curve) หรือเรียกอีกชื่อว่า Flow curve ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linearity) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) โดยมีความสำคัญในการนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อช่วยให้ทำนายผลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะกำหนดให้วัสดุของแบบจำลองมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropy) ซึ่งจะแตกต่างจากพฤติกรรมของวัสดุจริงเนื่องจากวัสดุจริงมีการเรียงตัวของผลึกไม่เท่ากันทุกทิศทางทำให้วัสดุมีสมบัติแบบ Anisotropy โดยที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบดึง (Uni-Axial tension test) หรือการทดสอบกด (Compression Test) ในการทดสอบแรงดึง ขึ้นทดสอบชนิดหน้าตัดกลมหรือชนิดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกแรงกระทำโดยกระทำการดึงหรือกดเพิ่มแรงอย่างช้าๆ และควบคุมความเร็วให้ขึ้นงานทดสอบเปลี่ยนรูปร่างอย่างสม่ำเสมอตามแนวแกน แล้ววัดค่าแรงและระยะการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานทดสอบเกิดความเสียหายหรือขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหาสมบัติเชิงกลของวัสดุชิ้นทดสอบ ซึ่งความเค้นที่เกิดภายในวัสดุสามารถหาได้โดยนำแรงภายนอกในแต่ละช่วงของการทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น

$$\sigma = \frac{F_i}{A_0} \tag{2.54}$$

- โดย
- F_i

คือ แรงดึงหรือโหลด
- A_0

คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงานทดสอบ
- σ

คือ ความเค้นเฉลี่ยหรือความเค้นเชิงวิศวกรรม (Engineering Stress) ซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด A_0

สำหรับความเครียดเชิงวิศวกรรม (Engineering Strain) สามารถคำนวณได้จากความยาวที่เปลี่ยนไปหารด้วยความยาวเดิมของชิ้นงานทดสอบ

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \tag{2.55}$$

- โดย
- ΔL

คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป
- L_0

คือ ความยาวของชิ้นงานทดสอบ
- L_i

คือ ความยาวขณะใดขณะหนึ่ง และ
- ε

คือ ความเครียดเฉลี่ย เป็นความเครียดเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีทิศทางเดียวกับทิศทาง

ของแรง F

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการคำนวณโดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ เรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในวิศวกรรม (Engineering Stress-Strain curve) ซึ่งในการทดสอบจริงในขณะที่ยกระดับความเค้นในชิ้นงานทดสอบเพิ่ม เลยความเค้นคราก σ_0 พื้นที่หน้าตัดและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง จนเกิดการคอคอดและขาดออกจากกันในที่สุด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด สามารถหาได้โดยใช้พื้นที่หน้าตัดและความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละขณะซึ่งเรียกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นจริงและความเครียดจริง (True stress – True strain curve) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Flow curve ดังรูปที่2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของวัสดุในช่วงการเปลี่ยนรูปถาวร ถ้าให้ $\tilde{\sigma}$ เป็นความเค้นจริง และ $\tilde{\epsilon}$ เป็นความเครียดจริง ดังนั้น

$$\tilde{\sigma} = \frac{F_i}{A_i} = \sigma \left(\frac{A_0}{A_i} \right) \tag{2.56}$$

โดย A_i คือ พื้นที่หน้าตัดใดๆ A_0 คือพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น σ คือความเค้นเฉลี่ย F_i คือแรงดึงที่กระทำบนชิ้นทดสอบ สำหรับความเครียดจริง $\tilde{\epsilon}$ สามารถหาได้โดยพิจารณาที่ความยาวใดๆที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหาได้จากการอินทิเกรตความยาว dL_i ใดๆ

$$\tilde{\epsilon} = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L_i}{L_0} \tag{2.57}$$

ในกรณีการขึ้นรูปโลหะปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นจะสมมุติให้ปริมาตรไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูปทำให้มีปริมาตรเท่าเดิม

$$A_0 L_0 = A_i L_i \tag{2.58}$$

$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = 1 + \epsilon \tag{2.59}$$

ดังนั้นความเค้นจริงและความเครียดจริง หาได้โดยสมมุติฐานให้ปริมาตรก่อนและหลังการขึ้นรูปคงที่

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon) \tag{2.60}$$

$$\tilde{\epsilon} = \ln \frac{A_0}{A_i} = 2 \ln \frac{d_0}{d_i} \tag{2.61}$$

โดย d_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใดๆ
 d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ
สำหรับค่ายังมอดูลัส E สามารถหาได้จากช่วงการยืดหยุ่นเริ่มต้นของชิ้นงาน (Elastic region) โดยการหาความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดคือ

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} \tag{2.62}$$

สำหรับค่าตัวเลขยกกำลังหรือความเครียดแข็ง n และค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรงของวัสดุ K สามารถหาได้โดยทำการใส่ค่า log เข้าไปในสมการยกกำลังซึ่งทำให้ได้สมการใหม่คือ

$$\sigma = H \epsilon_p^n \tag{2.63}$$

$$\log \sigma = n \log \epsilon_p + \log H \tag{2.64}$$

โดยที่ค่าความเครียดพลาสติก ϵ_p สามารถหาได้คือ

$$\epsilon_p = \epsilon - \frac{\sigma}{E} \tag{2.65}$$

จากสมการ log ที่ได้สามารถเขียนได้ในรูปสมการเส้นตรงในแกน X และ Y ได้ เช่น $y = mx + b$ โดย $y = \log \sigma$, $x = \log \epsilon$, $m = n$ และ $b = \log H$ สำหรับ H สามารถหาได้โดย $H = 10^b$ ดังนั้นถ้าวาดจุดระหว่าง $\log \sigma$ และ $\log \epsilon$ ลงบนแกน X-Y จะได้กราฟเส้นตรงดังนั้นการหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีความจำเป็นเพื่อการคำนวณหาสมการคอนสทิทิวทีฟ และมีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

2.5 การเชื่อมเลเซอร์ [11]

2.5.1 ทฤษฎีและหลักการ

อะไรที่ทำให้เกิดแสงเลเซอร์ ถ้าแบตเตอรี่เป็นต้นกำเนิดของอิเล็กตรอน (พลังงานไฟฟ้า) จากแนวคิดเดียวกันนี้ เลเซอร์นั้นมีต้นกำเนิดจากโปรตอน (พลังงานแสง) กระแสของอิเล็กตรอน จากแบตเตอรี่สามารถให้ความร้อนกับไส้หลอดไฟ การรวมกันของแบตเตอรี่ และหลอดไฟ เป็นอีกทางที่ทำให้ได้โปรตอน ความแตกต่างระหว่าง 2 ตัวต้นกำเนิดโปรตอน คือโปรตอนจากแสงของไส้หลอดซึ่งเปล่งแสงแบบสุ่มในทุกทิศทาง เมื่อทำให้มันเป็นเส้นตรงโดยการผ่าน ตัวสะท้อนแสง (Flashlight reflector) จะสามารถจัดรูปแบบของแสง ทำให้เป็นลำแสงวิ่งอย่างรวดเร็ว ในช่วงกว้างของความยาวคลื่น (เป็นสี) ที่เหนือจากสเปกตรัม ความเข้มของระดับสีของโปรตอนจากเลเซอร์ที่ปล่อยออกมามีความแน่นอนในแนวนานกับลำแสง ซึ่งขนาดลำแสงทั้งหมดจะมีความยาวคลื่นเหมือนกันนี้ เรียกว่า การติดกันของลำแสง (Coherent beam) อย่างไรก็ตามการเกิด การติดต่อกันของลำแสงมันไม่สามารถเป็นไปได้ แต่จำนวนของ แสงที่ติดต่อกัน ขึ้นกับความแคบของบริเวณความยาวคลื่น และขนานกับทางเดินของแต่ละโปรตอน หนึ่งในคุณสมบัติการสร้างเลเซอร์คือ มีมูลค่า และ ต้องทำบัญชีรายการทุกความยาวคลื่นที่เหมาะสมในแต่ละงานซึ่งแตกต่างกันออกไป ในการอธิบายลักษณะความสัมพันธ์ระดับอนุภาค ระหว่าง ความถี่, เฟส, แอมพลิจูด และทิศทาง ความแตกต่างของลำแสงแต่ละส่วน จะเสริมกันเมื่อเป็นเฟสเดียวเหมือนกัน แต่จะหักล้างกันเมื่อเป็นเฟสตรงข้ามกัน ซึ่ง coherence จะเป็นตัวกำหนดสมบัติให้เหมือนกัน เมื่อสีของลำแสงเป็นสีเดียวกัน

การส่งคำสั่งหลายๆครั้งพร้อมกันโดยแสงแฟลช ในแต่ละครั้งแสงแฟลชจะถูกกรองสีให้มีความแตกต่างกัน ทำให้สามารถใช้ได้หลายช่องทาง (Channel) มากกว่าเส้นทางของลำแสงแบบเดิม อย่างไรก็ตาม การใช้งานที่มากกว่า 10 สีจะยากสำหรับแต่ละตัวรับที่จะแยกลักษณะให้ได้ตามคำสั่งที่ต้องการ แต่สำหรับเลเซอร์ แชนเนลแยกได้ชัดเจนถึง 1000 แชนเนล ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้มากกว่าเหมือนสีที่ได้การแยกสีของปริซึม

เมื่อมีความต้องการพลังงานสูงเพื่อที่จะเชื่อมวัสดุ ลำแสงจะถูกปรับโฟกัสให้เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้บริเวณนั้นไม่มีพลังงานตกค้าง ถ้าพลังงานที่ต้องการจะถูกระบุโดยเฉพาะตามช่วงความยาวคลื่น ยกตัวอย่างเช่น ความกว้าง $1 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$) ลำแสงสีเดียวต้องใช้พลังงานหลายพันวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ใน แบนวิทซ์ $1 \text{ \AA}$

เลเซอร์คือส่วนหน้าของแสงที่ผ่านภาคขยาย โดยจะถูกกระตุ้น ให้มีการเปล่งรังสีออกมาเพื่อให้เข้าใจการขยายตัวของแสงได้ง่าย ถ้าเปรียบเทียบในทอมของเสียง เครื่องขยายนั้นมีหลากหลายแบบ ทั้งหมดมีหน้าที่ให้การขยายสัญญาณเข้าที่มีกำลังน้อย ให้ออกมาเป็นสัญญาณขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้ยิน ในเครื่องขยายเสียงเป็นการทำงานอัตโนมัติ ด้วยทรานซิสเตอร์ หรือ ท่อสุญญากาศ ซึ่งในลักษณะนี้เรียกว่า เกรน (Grain) นั้นหมายความว่าอิเล็กตรอนที่มีกระแสมาก จะไหลผ่านท่อทาง ถ้า

ริด หรือมีการกระตุ้นแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ในทำนองเดียวกัน การขึ้น-ลงเพียงเล็กน้อยที่เกิดในแรงดันกริด แต่จะทำให้เกิดการขึ้น - ลง ของกระแสมากไหลผ่านท่อทาง ความยากอยู่บางเวลา ที่ต้องการจะปรับเปลี่ยนในการรับฟังการกระจายเสียงของสถานีวิทยุ ให้เสียงคมชัด และจัดการให้ปราศจากเสียงรบกวนจากคลื่นในความถี่ใกล้เคียงกัน จากตัวอย่างนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญสำหรับการขยายสัญญาณที่ความถี่แคบ จึงมีความพยายามที่จะทำให้มีการปรับหาคคลื่นให้มีความคมชัด มีคลื่นรบกวนน้อย ในปี 1954 มีการนำการส่งคลื่นวิทยุอย่างแรง (Maser) ของการขยายคลื่นระดับไมโคร โดยการกระตุ้นการเปล่งรังสี หลักการของคลื่นวิทยุอย่างแรง คือการขยายสัญญาณของคลื่นที่มีความยาวคลื่น ที่สั้นกว่าออกไปให้มากขึ้น

นีออน หรือแสงฟลูออเรสเซนต์ เหมือนเป็นแหล่งพลังแสง นั้นเหมือนกับเลเซอร์แต่ปราศจากเกรน ซึ่งสมบัติของเลเซอร์ นีออนเป็นก๊าซที่ถูกเติมเข้าไป ให้มีสีที่คมชัด และมีสีแดงที่ปลายของ optical spectrum หม้อแปลงจะก่อให้เกิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมา แรงปฏิกิริยากับอะตอมของก๊าซให้มีพลังงานอยู่ในระดับสูง การที่มีตัวเร่งอะตอมของก๊าซเฉื่อย ทำให้เกิดการเปล่งพลังงานในรูปของ โปรตอน ซึ่งเป็นพลังงานแสง การเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้กับก๊าซทำให้การรวมกลุ่มของแสงที่เปล่งออกมา การดูดกลืน และ กระตุ้นให้เปล่งแสงในบางครั้ง สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยตัวเองแบบไม่เป็นระเบียบ แต่หลอดนีออนจะไม่มีเกรนซึ่งจำเป็นสำหรับการใช้ขยายคลื่นแสง

เกรนสามารถจัดเตรียมได้ในแก๊ส โดยเลือกกระตุ้นอะตอมเพื่อให้ระดับพลังงานของการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้นจากพลังงานระดับต่ำ ซึ่งจะลดระดับพลังงานอย่างรวดเร็วจนมีระดับพลังงานต่ำที่สุดโดยธรรมชาติ อะตอมสามารถถูกกระตุ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ระดับพลังงานสูงดังนั้นจะมีปริมาณอะตอมที่มีระดับพลังงานสูง เพราะฉะนั้นที่สถานะนี้แก๊สที่ออกมาจะอยู่ในสภาวะสมดุล เรียกว่า การสลับประชากร (Population inversion) และสถานะนี้จะทำให้เกิดเกรนในแก๊สในระดับปานกลาง เมื่อสภาวะของการสลับประชากรคือผลที่เกิดจากการกระตุ้นภายนอกของเลเซอร์ระดับปานกลาง โดยทั่วไปเรียกว่า การปั๊ม (Pumping) และอาจเป็นผลมาจาก ออปติค และอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อโปรตอนที่เปล่งพลังงานด้วยตัวเอง (อยู่ระหว่างพลังงานระดับสูง และต่ำ) จะกระทบกับโมเลกุลในระดับพลังงานสูง ซึ่งการปะทะกันเป็นตัวกระตุ้นการเปล่งแสงของโปรตอนตัวอื่นๆ ซึ่งในการกลับมากระตุ้นการเปล่งแสงจากการชนกันของโมเลกุลที่ตำแหน่งระดับพลังงานสูง ทุกครั้งที่มีการกระตุ้นโปรตอนให้เปล่งแสงมีทิศทางแน่นอนในทิศทางเดิม จะทำให้ความถี่ที่ได้เหมือนกันในท้ายที่สุด การจัดเรียงเพื่อโปรตอนจะทำให้ได้แสงของ ลำแสงที่ติดต่อกัน โดยแสงจะถูกขยายด้วยการกระตุ้นของรังสี

การจัดเรียงโปรตอนที่ออกมา ลำแสงที่ออกมาจะถูกขยายพลังงานโดยการกระตุ้นการเปล่งแสง ในการสร้างการจัดเรียงโปรตอนนี้ สามารถทำได้ภายใน ช่องเรโซแนนซ์ (Resonant cavity) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับภาคขยายโดยรังสีที่ผ่านจะเป็นเลเซอร์ระดับปานกลาง

เลเซอร์เกิดจากปฏิกิริยาของอะตอม ซึ่งถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานสูงขึ้น ส่วนแหล่งจ่ายที่ปั๊มให้ จะทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาของอะตอม และช่องเรโซแนนซ์เพื่อเตรียมรับผลกระทบจากการสั่นของเลเซอร์ สิ่งนี้คือเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานไฟฟ้าแม่เหล็ก

2.5.2 ตัวแปรสำคัญ

3 ตัวแปรสำคัญที่เป็นปัจจัยสำหรับเลเซอร์ คือวัสดุที่เหมาะสม, แหล่งพลังงาน (ปั๊ม) ที่เหมาะสม และการออกแบบเพื่อเสริมการกระตุ้นการปล่อยพลังงาน

2.5.3 วัสดุเลเซอร์

ความต้องการของวัสดุที่ประกอบกันเป็นเลเซอร์ เป็นสภาวะที่ขึ้นกับการถูกกระตุ้นให้ปล่อยพลังงาน ซึ่งวัสดุนั้นควรต้องมีสมบัติต่างดังนี้

- จะต้องเป็นวัสดุที่เรืองแสงเมื่อถูกกระตุ้นโดย ออปติคอล ไฟฟ้า ความถี่วิทยุ หรือ หรือ พลังงานแบบอื่นๆ
- การเปล่งแสงที่ส่งถ่ายจะต้องเปล่งแสงได้ด้วยตัวเองเป็นระยะเวลานาน
- สมบัติการดูดซับ วัสดุจะต้องดูดซับพลังงานที่กระตุ้นได้ดีสามารถผลิต และปล่อยพลังงานระดับสูงให้มีจำนวนมากๆได้
- เลนส์ต้องมีคุณภาพดีเพียงพอ เช่น ไม่มีรอยขีดข่วน จนทำให้ทำให้ลำแสงที่ปล่อยออกมาไม่สมบูรณ์

อุปกรณ์และแก๊สที่จำเป็นต้องใช้ในงานเชื่อมเลเซอร์แบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เลเซอร์สำหรับเชื่อม

Laser	Operation	Pulse length	Pulse energy	Peak power	Max weld thickness*		Speed of welding	
		ms	J	W	in	mm	in/min	mm/s
Ruby	Pulsed	3-10	20-50	1-5k	0.005 to 0.020	0.13 to 0.50	3.0	1.2
Nd :glass	Pulsed	3-10	20-50	1-5k	0.005 to 0.020	0.13 to 0.50	1.5	0.63
Nd : yag	Pulsed	3-10	10-100	1-10k	0.005 to 0.025	0.13 to 0.60	5.0	2.1
CO ₂	Pulsed	5-20	0.1-10	1-5k	0.025	0.13	3.0	1.2
Nd : yag	CW			1000	0.150	3.81	30.0	12.7
CO ₂	CW			1000	0.025	0.60	30.0	12.7
Gas dynamic	Cw			20k	0.750	19.0	50.0	21.2

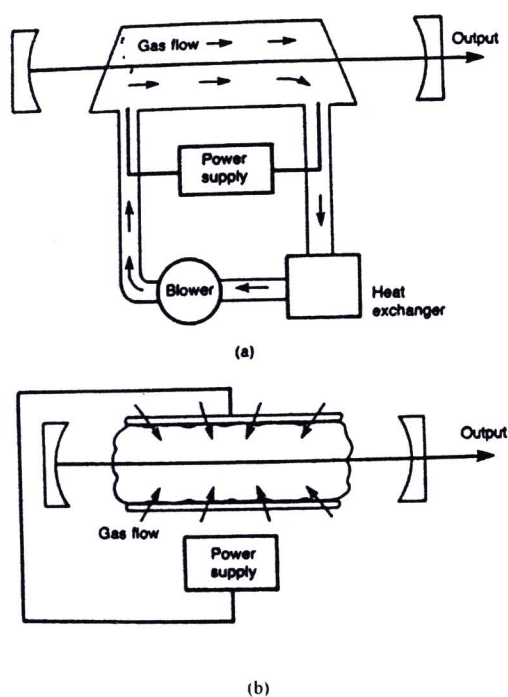
* Maximum thickness given here is for 304 stainless steel

แบบของเลเซอร์ระดับปานกลางนั้น เป็นแบบแกนคริสตัลเดี่ยวของ อิทเรียม-อลูมิเนียม โกลเมท (Yttrium-aluminum garnet หรือเรียกสั้นๆว่า yag) ซึ่งบรรจุไปด้วย ไอออน ของ นีโอดีเมียม (Neodymium) neodymium-doped yag (Nd : yag) มีการเปลี่ยนมาใช้มากในวัสดุอื่นๆ สำหรับ การใช้ งาน เลเซอร์คริสตัลที่ใช้พลังงานสูง เนื่องจากวิธีนี้ให้อัตราพัลส์ (Pulse rate) สูง ทำให้ประสิทธิภาพ สูงตามไปด้วย และยังสามารถใช้งานกับระบบหล่อเย็นแบบธรรมดาได้

อาร์กอน, ฮีเลียม, คริปทอน, นีออน, ออกซิเจน และซีนอน เป็นสารที่ทำให้เลเซอร์ออกมาดี คาร์บอนไดออกไซด์, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เป็นตัวสร้างการเปล่งแสงเลเซอร์ ออกซิเจน จะถูก ใช้ในการผสมของอาร์กอน หรือ นีออน นีออนจะสร้างแสงเลเซอร์ได้ทั้งแบบใช้ แก๊สเดี่ยว หรือ ใช้ การผสมของ ฮีเลียมกับนีออน ส่วน อาร์กอน, คริปทอน และ ซีนอน จะใช้แบบแก๊สเดี่ยวล้วนๆ

การเชื่อมเลเซอร์แบบ CO₂ จริงแล้วใช้การผสมของแก๊ส 3 ชนิดคือ คาร์บอนไดออกไซด์ ฮีเลียม และไนโตรเจน เพื่อให้ได้พลังงานสูง คาร์บอนไดออกไซด์เป็น ส่วนหลักที่จำเป็นในการ

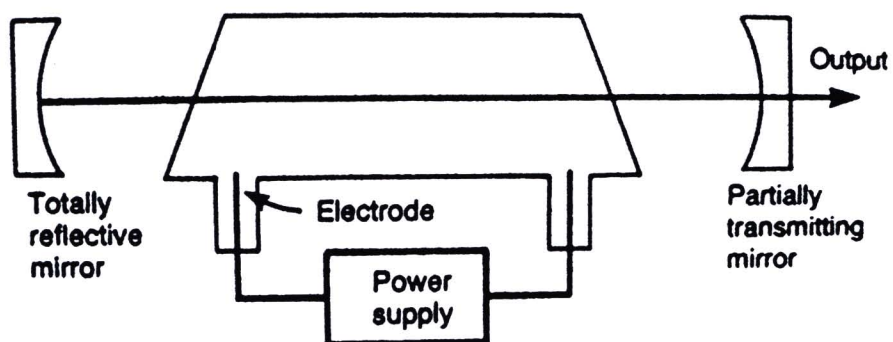
สร้างโปรตอน ส่วนไนโตรเจนช่วยเสริม และฮีเลียมช่วยในการหล่อเย็น ในการไหลของระบบเชื่อมแบบนี้ จะบีบแก๊สให้ผ่านช่องเรโซแนนซ์ ก่อนส่งไปยังทางออกของเลเซอร์ แสดงในรูปที่ 2.8 ข้อดีของระบบนี้คือ แก๊สจะมีความถี่สม่ำเสมอ และแสงที่ได้จะเป็นสีเดียวกันแต่ประสิทธิภาพต่ำ (น้อยกว่า 10%) ในสถานะของแข็ง (Solid state) จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น (เพิ่มมากขึ้นถึง 10%) แต่ส่วนใหญ่คลื่นจะเคลื่อนตัวแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเทคนิคที่ทำให้คลื่นเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องคือเครื่องเชื่อมเลเซอร์แบบ Nd:yag



รูปที่ 2.11 การไหลเวียนแก๊สของระบบเลเซอร์ (a) Axial flow (b) Cross

2.5.4 พลังปั๊ม

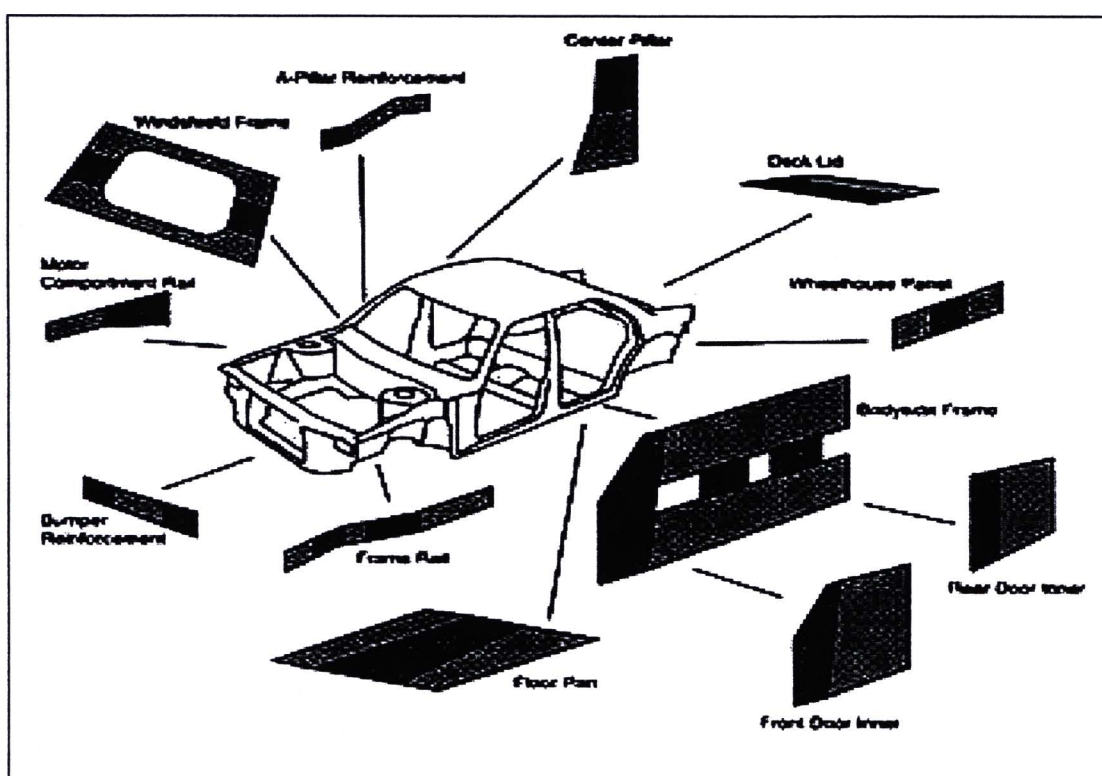
ปัจจัยที่สำคัญอื่น ๆ คือพลังปั๊มที่ให้กับเลเซอร์ เป็นตัวแปรใหญ่สำหรับ ความแรงและระยะเวลาของลำแสงที่ออกมาในการใช้งาน ในสถานะของแข็ง ของเลเซอร์ จะมีการปั๊มโดยไฟแฟลช อยู่ในช่องสะท้อนแสง ซึ่งบรรจุแท่งเลเซอร์ โดยในโคมไฟแฟลชจะบรรจุด้วยแก๊ส ซีนอน (Xenon) หรือ คริปทอน (Krypton) โดยปกติจะถูกปั๊มด้วย การปล่อยแบบไฟฟ้า (Electric discharge) ในหลอดแก๊ส ซึ่งรูปร่างโดยปกติของตัวส่งจ่ายไฟฟ้าที่ใช้งานโดยอิเล็กโทรด (Electrodes) แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการจัดเรียงลำแสงอิเล็กตรอน แบบพิเศษที่ใช้ในกระบวนการผลิต



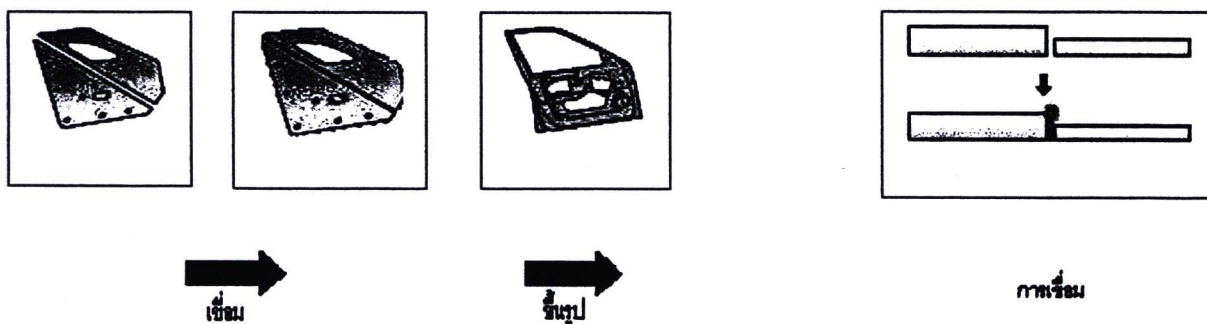
รูปที่ 2.12 Sealed-tube ของระบบเลเซอร์

2.6 แผ่นเชื่อมพ่วง (Tailor Welded Blank) [21]

แผ่นเชื่อมพ่วงเป็นกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์โดยนำเหล็กแผ่นที่มีความหนาแตกต่างกัน รวมไปถึงเหล็กที่มีคุณสมบัติหรือชั้นเคลือบที่ต่างกันมาเชื่อมต่อให้เป็นเหล็กแผ่นชิ้นเดียวกันก่อนที่จะนำไปทำการขึ้นรูป แนวคิดในการรวมเหล็กประเภทต่างๆเข้ามาเป็นแผ่นเดียวกันด้วยการเชื่อม ถูกพัฒนาเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรมโดยนำเหล็กที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมาต่อให้อยู่ในบริเวณที่เหมาะสมที่สุดเพื่อผลิตให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีที่สุด วิธีนี้ไม่เพียงแต่จะช่วยลดน้ำหนักของชิ้นส่วนให้ลดลง แต่ยังช่วยให้สามารถผลิตชิ้นส่วนได้โดยลดการใช้อุปกรณ์ขึ้นรูปต่างๆ ด้วย กระบวนการนี้ถูกนำไปใช้และพัฒนาอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมีแรงผลักดันมาจากข้อบังคับทางด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งต้องการให้ออกแบบรถยนต์ที่มีน้ำหนักเบา เพื่อประหยัดพลังงาน และก่อให้เกิดมลภาวะน้อยลง พร้อมกับการปรับปรุงโครงสร้างของตัวรถให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น ตัวอย่างชิ้นส่วนที่ผลิตมาจาก TWB ได้แก่ body side frames, door inner panels, motor compartment rails และ center pillar inner panels เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างงาน และชิ้นส่วนที่นิยมทำแผ่นเชื่อมพ่วง [21]



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการใช้งาน TWB ในชิ้นส่วนต่างๆ ของรถยนต์ [21]

2.6.1 ข้อดีของ Tailor Welded Blank

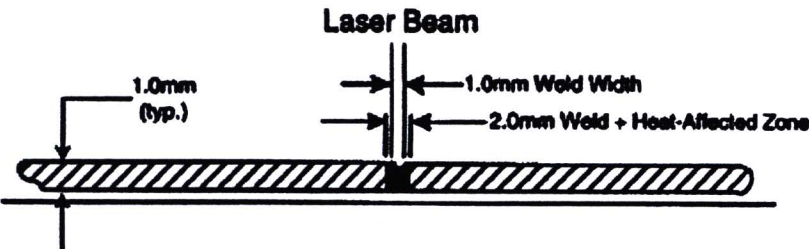
- ลดน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์
 - สามารถเลือกใช้เหล็กที่มีความหนาต่างกันได้ในการผลิตชิ้นส่วนขึ้นเดียวทำให้ลดน้ำหนัก
 - ผู้ออกแบบสามารถกำหนดให้ใช้เหล็กหนาได้เฉพาะในบริเวณที่ต้องการให้มีคุณสมบัติทนต่อการกระแทกที่ดี
 - การเปลี่ยนแปลงการออกแบบทางวิศวกรรม สามารถทำได้โดยเปลี่ยน sub blank
- ต้นทุนการผลิตต่ำลง
- สามารถใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติตามต้องการได้ในจุดที่ต้องการ
- คุณภาพรวมของ TWB สามารถควบคุมได้จาก sub blank ที่ประกอบขึ้นเป็น TWB
- ลดจำนวนการใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปเหล็กแผ่น
- ลดจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมลง
- ความยืดหยุ่นในการผลิตสูง สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายมากขึ้น

2.6.2 วิธีการเชื่อมเหล็กแผ่นสำหรับ TWB

วิธีการเชื่อมในการผลิต TWB มีอยู่ 4 วิธี ได้แก่ Laser beam butt welding, Resistance mash seam welding, High-frequency induction และ Electron beam welding ซึ่ง 2 วิธีแรก เป็นการเชื่อมที่มีการใช้แพร่หลายมากที่สุด โดยแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันดังนี้

1. Laser beam butt welding

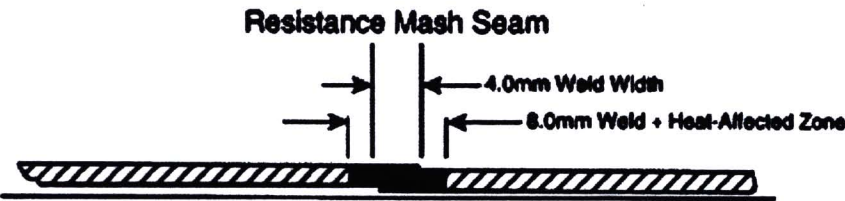
เป็นการเชื่อมแบบเต็ม (full-penetration) ซึ่งสามารถเชื่อมให้ได้รอยเชื่อมที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อความหนาสูง ดังนั้นวิธีนี้จึงสามารถเชื่อมได้แนวเชื่อมที่ลึก และแคบ นอกจากนี้อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมที่สูงมาก ทำให้ได้ความแข็งของรอยเชื่อมที่สูงกว่าการเชื่อมด้วยวิธี resistance mash seam weld และควบคุมแนวเชื่อมได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 2.15 การเชื่อมแบบ Laser beam butt welding [21]

2. Resistance mash seam welding

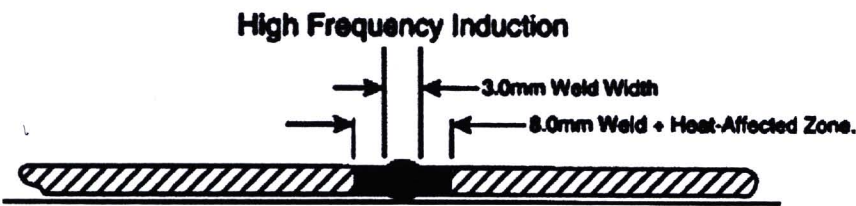
เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้ลูกรีด (ต้องอาศัยรอยเชื่อมที่ต่อเหลื่อมกัน) อัดเนื้อเหล็กเข้าด้วยกัน ขณะที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน วิธีนี้เป็นการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (solid-state) วิธีนี้จะได้แนวเชื่อมที่กว้างกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์เล็กน้อย วิธีเชื่อมแบบนี้จะใช้กับการผลิตรถยนต์ในยุโรปของ Volkswagen, Volvo, SEAT, ฯลฯ



รูปที่ 2.16 การเชื่อมแบบ Resistance mash seam welding [21]

3. High-frequency induction

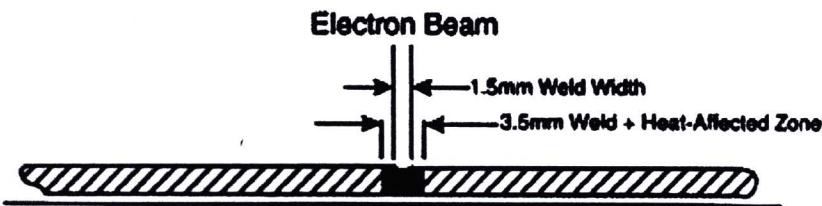
เป็นการเชื่อมแบบค่อชน (butt-upset weld) ซึ่งพัฒนาโดยบริษัท Volvo ใช้สำหรับเชื่อมงานเหล็กแผ่น ปัจจุบันมีการใช้สำหรับงานเชื่อมที่มีความยาวของแนวเชื่อมสูงสุด 1 เมตร รอยเชื่อมที่ได้จะมีความหนาสูงกว่าความหนาของเหล็กแผ่นประมาณ 50 % ซึ่งต้องทำการขัดออกภายหลังการเชื่อม การเชื่อมทำโดยนำเหล็กแผ่น 2 แผ่นมากดเข้าหากันตรงขอบด้วยตัวยึดตลอดแนวความยาวของเหล็กแผ่น และหน้าสัมผัสของชิ้นงานจะถูกกดด้วยแรงอัดในระหว่างการเชื่อม ซึ่งเหล็กจะหลอมติดกัน



รูปที่ 2.17 การเชื่อมแบบ High-frequency induction [21]

4. Electron beam welding

เป็นการเชื่อมแบบหลอมละลายเช่นเดียวกับวิธีอื่นๆ โดยทั่วไปใช้กำลังไฟฟ้าประมาณ 25 - 35 กิโลวัตต์ วิธีนี้เหมาะสำหรับการเชื่อมวัสดุที่มีขนาดหนาๆ และเลเซอร์ พบว่า Electron beam welding สามารถเชื่อมได้โดยที่มีระยะห่างของแผ่นโลหะ (Gap) มากกว่าการเชื่อมด้วยเลเซอร์เล็กน้อย นอกจากนี้ยังทำการเชื่อมได้เร็วกว่า และกระแสนของอิเล็กตรอนก็ควบคุมได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่สำคัญของ Electron beam welding คือ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันการแผ่รังสีจากรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อม



รูปที่ 2.18 การเชื่อมแบบ Electron beam welding [21]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brad Kinsey และคณะ., 2001[12] ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปวัสดุอะลูมิเนียมชนิดเชื่อมพ่วง โดยใช้แผ่นชิ้นงานอะลูมิเนียม Al 5182-H00 ที่มีความหนา 1.0 และ 2.0 มิลลิเมตร มาเชื่อมต่อกันด้วย YAG laser จากนั้นนำมาทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป โดยใช้การทดสอบแบบ Limit Dome Height พบว่า สามารถเพิ่มความลึกของการลากขึ้นรูปได้ 22 เปอร์เซ็นต์, ลดความเครียดในแนวขวาง แนวเชื่อมของวัสดุที่บางกว่าได้มากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ และลดการเคลื่อนที่ของแนวเชื่อมได้ 44 เปอร์เซ็นต์

Abdullah และคณะ., 2001[13] ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของรอยเชื่อมเพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของรอยเชื่อมที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นเชื่อมพ่วง ผลจากการทดลองพบว่ารอยแตกจะเกิดขึ้นบนชิ้นงานในส่วนของวัสดุที่อ่อนแอกว่า ซึ่งอยู่ในบริเวณใกล้กับรอยเชื่อม สรุปได้ว่ารอยเชื่อมไม่ใช่ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นเชื่อมพ่วง

Sadok Gaied และคณะ., 2008[14] ได้ทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปของแผ่นเชื่อมพ่วง โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ 1)ความหนาของวัสดุต่างกัน(Mild steel ความหนา 0.8มม. เชื่อมต่อกับความหนา 1.5 มม.) 2)ชนิดของวัสดุต่างกัน (Mild Steel ความหนา1.2 มม.เชื่อมต่อกับ HSLA ความหนา1.2 มม.) 3)ทั้งชนิดและความหนาของวัสดุต่างกัน (Mild Steel ความหนา0.8 เชื่อมต่อกับ HSLA ความหนา 1.2 มม.) โดยใช้การทดสอบแบบ Nagazima Test จากการทดสอบพบว่าชิ้นงานจะเกิดการแตกในส่วนของวัสดุที่อ่อนแอกว่าและเกิดในบริเวณที่ใกล้กับรอยเชื่อม

Zhao และคณะ.,2001[15] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์การขึ้นรูป วัสดุชนิดเชื่อมพ่วง เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แผ่นชิ้นงาน SPCEN ที่มีความหนา0.8มิลลิเมตร และ SPRC ที่มีความหนา1.4 มิลลิเมตร มาเชื่อมต่อกันด้วย CO₂ Laser แล้วนำไปทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูป จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการทดสอบมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการใช้ 3D Shell element จะใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าแล้วมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้ 3D Solid element

Chan และคณะ., 2003[16] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของความหนาที่แตกต่างกันของวัสดุชนิดเชื่อมพ่วงที่มีผลต่อ Forming Limit Diagram โดยใช้แผ่นชิ้นงาน PPCC (Cold-rolled) ที่มีความหนา 0.5, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิเมตร มาเชื่อมต่อกันด้วย Nd : YAG laser โดยให้มีอัตราส่วนของความหนาเท่ากับ 2(0.5/1.0), 1.67(0.6/1.0), และ 1.25(0.8/1.0) แล้วนำไปทำการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปพบว่า ระดับของ FLC จะลดลงเมื่ออัตราส่วนของความหนาเพิ่มขึ้น