

บทที่ 4

ผลการออกแบบ

4.1 ลักษณะจำเพาะของเครื่องทดสอบ

4.1.1 สภาวะทดสอบ

รายละเอียดของการกำหนดอุณหภูมิออกแบบ ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.6 มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดชนิดของวัสดุ :

ในที่นี้เลือกเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo เป็นวัสดุอ้างอิง เพราะเป็นวัสดุที่ใช้ทำหม้อไอน้ำ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดอุณหภูมิทดสอบต่ำสุด :

อุปกรณ์นี้ถูกใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 540 °C ^[13] ดังนั้นกำหนด ขอบเขตล่างของอุณหภูมิทดสอบ เท่ากับ

$$T_{min} = 540 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.1)$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดอุณหภูมิทดสอบสูงสุด :

อุณหภูมิทดสอบสูงสุดควรมีค่ามากกว่าอุณหภูมิต่ำสุดอย่างน้อย 50 °C ดังนั้นกำหนดอุณหภูมิทดสอบสูงสุดคือ

$$T_{max} = 600 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4.2)$$

รายละเอียดของการกำหนดภาระออกแบบ ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.7 มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดระยะเวลาทดสอบที่สั้นที่สุด :

กำหนดระยะเวลาทดสอบที่สั้นที่สุด เท่ากับ 20 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณความเค้นสูงสุดบนชิ้นงานทดสอบ

ความเค้นสูงสุดบนชิ้นงานทดสอบจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิทดสอบต่ำสุด และระยะเวลาทดสอบสั้นที่สุด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และอายุความคืบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของวัสดุที่เลือก จากเอกสารอ้างอิง ^[7] คือ

$$(T + 273.15)(\log t_r + 15.956) = 18600.626 + 659.767 \log \sigma - 2655.786(\log \sigma)^2 \quad (4.3)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)

t_r คือ อายุความคืบ (hr)

σ คือ ความเค้นทดสอบ (kgf/mm^2)

กำหนดอุณหภูมิทดสอบต่ำสุดคือ 540°C แทนค่าที่กำหนด ($T = 550^{\circ}\text{C}$ และ $t_r = 20$ ชม.) ลงในสมการที่ (4.3) แก้สมการออกมาจะได้

$$\sigma_{\max} = 271.1 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดลักษณะหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ :

เลือกชิ้นงานทดสอบมีหน้าตัดรูปวงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ

$$d = 6 \text{ มม.} \quad (4.5)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณพื้นที่หน้าตัด :

$$\text{จากขั้นตอนที่ 3 พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน คือ } A = \frac{\pi}{4} d^2 = 28.27 \text{ มม.}^2$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณภาระสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ : ขนาดของภาระสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ เท่ากับผลคูณของระหว่างความเค้นสูงสุด (ขั้นตอนที่ 1) และขนาดพื้นที่หน้าตัด (ขั้นตอนที่ 3) ดังนั้น

$$P_{\max} = \sigma_{\max} A = 7664.78 \text{ นิวตัน} \quad (4.6)$$

เพื่อความสะดวกในการคำนวณต่อไป จะปรับค่าที่ได้เป็น

$$P_{\max} = 8000 \text{ นิวตัน} \quad (4.7)$$

ขั้นตอนที่ 6, 7 และ 8 กำหนดอัตราทดของคาน คำนวณขนาดของน้ำหนักถ่วง และตรวจสอบ:

อัตราทดของคานที่เหมาะสมขึ้นกับขนาดสูงสุดของตุ้มน้ำหนัก ขณะทดสอบภายใต้ภาระสูงสุด ถ้าตุ้มน้ำหนักที่ต้องใช้น้ำหนักมากเกินไป ก็สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มอัตราทดของคานทดแรง หรือลดขนาดพื้นที่ที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ

กำหนดอัตราทดของคานทดแรงเท่ากับ k แล้ว ขนาดสูงสุดของตุ้มน้ำหนักที่ต้องการ คือ

$$w_{\max} = \frac{P_{\max}}{k} \quad (4.8)$$

ถ้าตม้่น้ำหนักทำด้วยเหล็ก (ความหนาแน่น $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$) กลึงเป็นรูปจานกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ d_w แล้วความสูงของตม้่น้ำหนักเมื่อวางซ้อนกัน h_w จะหาได้จากสมการ

$$h_w = \frac{P_{\max}}{\left(\rho \frac{\pi}{4} d_w^2\right) k} \quad (4.9)$$

สมมติว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตม้่น้ำหนักเท่ากับ 150 มม. แล้ว จะได้ h_w ที่อัตราทดต่าง ๆ ดังสรุปตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักสูงสุดของตม้่น้ำหนัก และความสูงสุทธิของตม้่น้ำหนัก

อัตราทด k (เท่า)	น้ำหนักสูงสุดของตม้่น้ำหนัก w_{\max} (กิโลกรัม)	ความสูงสุทธิของตม้่น้ำหนัก h_w (เมตร)
5	160	1.164
10	80	0.582
15	53	0.388
20	40	0.291

จากตารางจะเห็นว่า อัตราทดของคานทอดแรงควรอยู่ในช่วง 10-20 เท่า เพื่อไม่ให้ตม้่น้ำหนักวางซ้อนกันสูงเกิน ในที่นี้เลือกให้อัตราทด

$$k = 20 \text{ เท่า} \quad (4.10)$$

4.1.2 วิธีให้ความร้อนกับชิ้นงาน

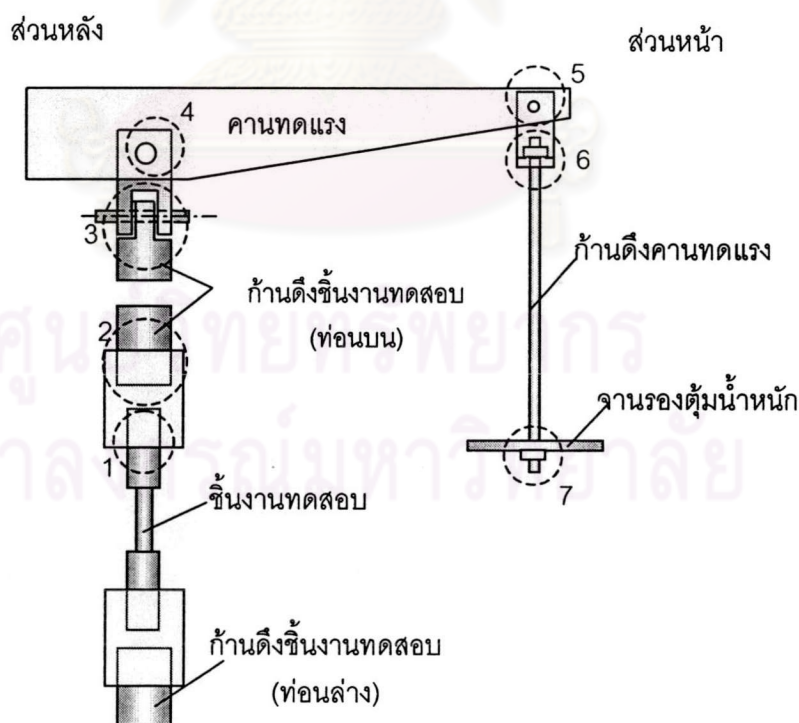
วิธีให้ความร้อนกับชิ้นงานทดสอบที่เลือกใช้ เป็นแบบขดลวดความต้านทาน ด้วยเหตุผลต่อไปนี้

- 1) ค่าใช้จ่ายในการสร้างน้อยกว่าวิธีทำความร้อนแบบอื่น ๆ
- 2) หลักการทำงานไม่ซับซ้อนใช้งานง่าย
- 3) เหมาะสมกับการทดสอบ (ความเค้น) ที่อุณหภูมิคงที่ เพราะไม่ต้องการอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากนัก
- 4) ทำให้การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของชิ้นงานทดสอบน้อย

4.1.3 วิธีให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบ

วิธีให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบขึ้นกับโหมดของภาระ (ดึง บีด เจียน หรือกด ฯลฯ) ที่ต้องการกระทำต่อชิ้นงานทดสอบ สิ่งสำคัญที่ต้องระวังคือ วิธีให้ภาระที่ใช้จะต้องไม่สร้างโหมดของภาระอื่นปนมาด้วย สำหรับเครื่องทดสอบในงานวิจัยนี้ต้องการทดสอบชิ้นงานภายใต้ภาระดึง วิธีให้ภาระที่เลือกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.1 จากรูปจะเห็นว่า ตัวจับยึดในระบบให้ภาระมีหลายจุด ทั้งนี้ก็เพื่อให้สามารถดัดแปลงให้ใช้ชิ้นงานทดสอบรูปแบบอื่นได้ และไม่สร้างภาระดัดบนชิ้นงานทดสอบ จุดจับยึดทั้งหมดมีดังนี้

- 1) การจับยึดระหว่าง ชิ้นงาน กับ ตัวจับยึดชิ้นงาน
- 2) การจับยึดระหว่าง ตัวจับชิ้นงาน กับ ก้านดึงชิ้นงานทดสอบ
- 3) การจับยึดระหว่าง ก้านดึงชิ้นงานทดสอบกับ ตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง)
- 4) การจับยึดระหว่าง ตัวจับยึดคานทอดแรง(ส่วนหลัง) และคานทอดแรง
- 5) การจับยึดระหว่างคานทอดแรง และ ตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหน้า)
- 6) การจับยึดระหว่าง ตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหน้า) กับก้านดึงคานทอดแรง
- 7) การจับยึดระหว่าง ก้านดึงคานทอดแรง กับจานรองตุ้มน้ำหนัก



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบ

การจับยึดจุดที่ 1 และ 2 ใช้แบบขันเกลียว เพราะยึดแน่นและสามารถส่งผ่านแรงไปยังชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ การจับยึดจุดที่ 3, 4 และ 5 ใช้สลัก (pin) เพื่อไม่ให้เกิดโมเมนต์ดัดที่ชิ้นงานทดสอบขณะที่คานทอดแรงเคลื่อนที่เนื่องจากการเสียรูปของชิ้นงานระหว่างทดสอบ การจับยึดจุดที่ 6 และ 7 เป็นการขันแน่นด้วยน็อตตัวเมีย

4.1.4 ลักษณะโดยรวมของโครงสร้าง

ลักษณะโดยรวมของโครงสร้างของเครื่องทดสอบความคืบ จะคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งอธิบายได้ดังนี้ โครงสร้างประกอบด้วย เสา (จำนวน 4 ต้น), ฐานล่าง, คานกลาง, คานบน, คานทอดแรงซึ่งมีชุดใส่น้ำหนักถ่วง (จานรองตุ้มน้ำหนัก ก้านดึงคานทอดแรง และตัวจับยึดคานทอดแรง) ต่อพ่วงอยู่ที่ปลายคานด้านหน้า และมีชุดให้ภาระกับชิ้นงานทดสอบ (ตัวจับยึดบนและล่าง ก้านดึงชิ้นงานทดสอบบนและล่าง ตัวจับยึดชิ้นงานบนและล่าง ชิ้นงานทดสอบ และตัวหมุนปรับแนวแกน) ต่อพ่วงอยู่กับคานทอดแรงส่วนหลัง โดยอยู่ถัดจากจุดหมุนของคานทอดแรงเล็กน้อย

ขณะทดสอบชิ้นงานทดสอบจะถูกยึดออกขณะที่ปลายด้านล่างถูกตรึงไว้ กลไกการดึงชิ้นงานทดสอบจากปลายด้านบนทำให้สามารถติดตั้งชิ้นงานทดสอบได้ง่ายกว่าการดึงชิ้นงานทดสอบจากปลายด้านล่าง แต่ก็มีข้อเสียคือ จุดศูนย์ถ่วงของเครื่องทดสอบอยู่สูงจากฐานมากกว่า ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญกับ การจับยึดระหว่างเสากับฐาน, มิติของฐาน และการกระจายน้ำหนักที่ฐานเพื่อให้เครื่องทดสอบตั้งได้อย่างมีเสถียรภาพ

4.2 ผลการออกแบบชิ้นงานทดสอบ

รายละเอียดของการออกแบบชิ้นงานทดสอบ ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.8 มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดความยาวเกจของชิ้นงานทดสอบ L_G :

จากเอกสารอ้างอิงหมายเลข^[3] ความยาวเกจควรมีค่าประมาณ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังนั้น

$$L_G = 30 \text{ มม.} \quad (4.11)$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดวิธีจับยึดชิ้นงานทดสอบ :

เลือกวิธีจับยึดแบบเกลียว (ตำแหน่งหมายเลข 1 ในรูปที่ 4.1) ดังนั้นปลายชิ้นงานทดสอบจะเป็นทรงกระบอกมีเกลียว

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดขนาดหน้าตัดของชิ้นงานทดสอบบริเวณต่อกับตัวจับยึด :

การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณจับยึดแบบเกลียว ใช้แนวทางของมาตรฐาน ASTM E8 ^[22] ซึ่งแนะนำสัดส่วนของปลายชิ้นงานหน้าตัดกลมทำเป็นเกลียวไว้ที่อย่างน้อย 1.6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของความยาวเกลียว แต่ว่าค่าที่แนะนำเป็นของกรณีการทดสอบแรงดึงที่อุณหภูมิห้องซึ่งไม่มีผลของการคืบ ดังนั้นจึงปรับอัตราส่วนนี้เป็น 2 เท่า เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกลียวจับยึด

สรุปว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายของชิ้นงานทดสอบตรงส่วนจับยึด d_{s_n} คือ

$$d_{s_n} = 12 \text{ มม.} \quad (4.12)$$

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณความยาวชิ้นงานทดสอบที่อยู่นอกความยาวเกลียว :

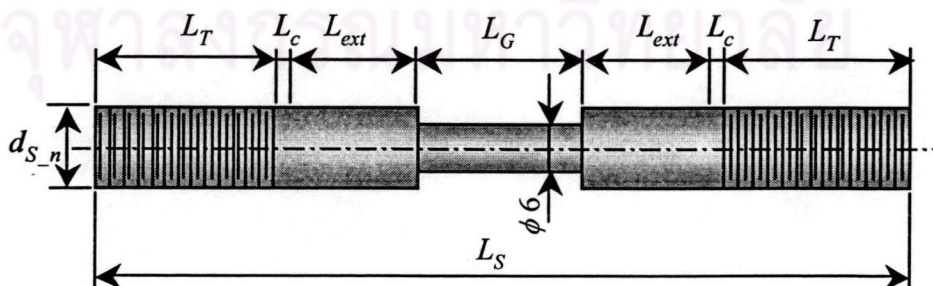
ความยาวที่อยู่นอกความยาวเกลียวของชิ้นงานทดสอบ เท่ากับผลบวกของระยะสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว L_{ext} และระยะจับยึดกับตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ (หรือในที่นี้คือระยะเกลียว)

ในขั้นตอนนี้จะกำหนด ระยะติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว L_{ext} และระยะเผื่อถึงตำแหน่งสิ้นสุดเกลียว L_C (รูปที่ 4.2) ดังนี้

$$L_{ext} = 20 \text{ มม.} \quad (4.13)$$

และ
$$L_C = 3 \text{ มม.} \quad (4.14)$$

การคำนวณความยาวเกลียวประกอบด้วย ประกอบด้วยการคำนวณ 2 ส่วน คือ 1) การคำนวณความเค้นที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ (allowable stress) 2) การคำนวณจำนวนเกลียวภายใต้ความเสียหายโหมดต่าง ๆ ^[17] รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อย่อยต่อไป



รูปที่ 4.2 รูปร่าง และตัวแปรอภิมิติ ของชิ้นงานทดสอบ

1) การคำนวณความเค้นที่ยอมให้เกิดขึ้นได้

ในการออกแบบชิ้นส่วนที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง ความเค้นที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ คือ ค่าต่ำสุดของความแข็งแรงของวัสดุ 6 อย่างต่อไปนี้

- 1) 25 เปอร์เซ็นต์ของความต้านแรงดึงที่ต่ำที่สุด ณ อุณหภูมิห้อง หรือ $0.25\sigma_{u,RT}$
- 2) 25 เปอร์เซ็นต์ของความต้านแรงดึง ณ อุณหภูมิใช้งาน หรือ $0.25\sigma_{u,HT}$
- 3) 67 เปอร์เซ็นต์ของความต้านแรงดึงครากต่ำสุด ณ อุณหภูมิห้องหรือ $0.67\sigma_{y,RT}$
- 4) 67 เปอร์เซ็นต์ ของความต้านทานแรงดึงครากที่ต่ำที่สุด ณ อุณหภูมิใช้งานหรือ $0.67\sigma_{y,HT}$
- 5) 100 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นที่ทำให้เกิดความเครียดคืบ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ใน 10^3 ชั่วโมง หรือ 1 เปอร์เซ็นต์ ใน 10^5 ชั่วโมง $\sigma_{c_{1\%}}$ โดยจะเลือกค่าที่น้อยกว่า
- 6) 67 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเฉลี่ยของความเค้น หรือ 80 เปอร์เซ็นต์ ของค่าต่ำสุดของความเค้นที่ทำอายุการคืบ เท่ากับ 10^5 ชั่วโมง (หาโดยประมาณค่านอกช่วง) โดยจะเลือกค่าที่น้อยกว่า

เนื่องจากข้อมูลความแข็งแรงสำหรับเกณฑ์ข้อที่ 5 (เฉพาะกรณีอายุความคืบ 1000 ชม. และข้อที่ 6 ไม่สามารถหาได้ จึงใช้เฉพาะข้อมูลที่หาได้ สำหรับหาค่าความเค้นที่ยอมรับได้

ชิ้นงานทดสอบทำจากเหล็กกล้า 2.25Cr-1Mo (หัวข้อ 4.1.1 ขั้นตอนที่ 1) ข้อมูลความแข็งแรงที่ทราบมีดังนี้^[7]

$$\sigma_{u,RT} = 496.44 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{u,HT} = 282.70 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y,RT} = 272.35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y,HT} = 110.32 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c_{1\%}} = 31.716 \text{ MPa}$$

ขดเซยความไม่แน่นอนของข้อมูลความแข็งแรงของวัสดุประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์^[9] ดังนั้นจึงขดเซยความไม่แน่นอนของความแข็งแรงของวัสดุ ด้วยตัวประกอบความปลอดภัย (safety factor) SF เท่ากับ 1.1

ความเค้นดึงที่ยอมรับได้ของเหล็กกล้า 2.25Cr-1 Mo คือ

$$\begin{aligned}\sigma_{allow1} &= \frac{1}{SF} \min\left(\frac{1}{4}\sigma_{u_RT}, \frac{1}{4}\sigma_{u_HT}, \frac{2}{3}\sigma_{y_RT}, \frac{2}{3}\sigma_{y_HT}, \sigma_{c_1\%}\right) \\ &= 28.83 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.15)$$

ความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ของวัสดุนี้ τ_{allow1} คือ

$$\begin{aligned}\tau_{allow1} &= 0.5\sigma_{allow1} \\ &= 14.42 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.16)$$

ตัวจับยึดชิ้นงานทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 310 S ซึ่งข้อมูลความแข็งแรงที่ทราบ มีดังนี้^[13]

$$\begin{aligned}\sigma_{u_RT} &= 627 \text{ MPa} \\ \sigma_{u_HT} &= 440 \text{ MPa} \\ \sigma_{y_RT} &= 290 \text{ MPa} \\ \sigma_{y_HT} &= 151.13 \text{ MPa} \\ \sigma_{c_1\%} &= 54.25 \text{ MPa}\end{aligned}$$

ขดเชยความไม่แน่นอนของข้อมูลความแข็งแรงของวัสดุประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์^[9] ดังนั้น SF เท่ากับ 1.1

ความเค้นดึงที่ยอมรับได้ของวัสดุนี้ คือ

$$\begin{aligned}\sigma_{allow2} &= \frac{1}{SF} \min\left(\frac{1}{4}\sigma_{u_RT}, \frac{1}{4}\sigma_{u_HT}, \frac{2}{3}\sigma_{y_RT}, \frac{2}{3}\sigma_{y_HT}, \sigma_{c_1\%}\right) \\ &= 49.318 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.17)$$

ความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ของวัสดุนี้ τ_{allow2} คือ

$$\begin{aligned}\tau_{allow2} &= 0.5\sigma_{allow2} \\ &= 24.66 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.15) – (4.18) เมื่อเปรียบเทียบกันจะเห็นว่าวัสดุที่ใช้ทำตัวจับยึดชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นจำนวนเกลียวบนตัวจับยึดชิ้นงานที่ต้องการจึงถูกกำหนดโดยจำนวนเกลียวบนชิ้นงานทดสอบไปโดยอัตโนมัติ

2) การคำนวณจำนวนเกลียวภายใต้ความเสียหายโหมดต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายของชิ้นงานทดสอบ จากสมการที่ (4.12) คือ 12 มม. เมื่อเปิดตารางเกลียวมาตรฐานจะได้ ระยะพิทช์ $p = 1.75$ มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก (root diameter) d_{s_r} ของชิ้นงานทดสอบ คือ ^[17]

$$d_{s_r} = d_{s_n} - \frac{5\sqrt{3}}{8} p = 10.106 \text{ มม.} \quad (4.19)$$

โหมดความเสียหายของเกลียวที่นำมาพิจารณา มีดังนี้

- 1) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง
- 2) เกลียวเสียหายแบบครากเนื่องจากความเค้นอัด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง

พื้นที่รับความเค้นเฉือนในกรณีนี้คือ พื้นที่ฐานของเกลียว A ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$A = \pi d_{s_r} b n$$

โดย d_{s_r} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก ของก้านตั้งชิ้นงานทดสอบ

b คือ ความสูงของฐานเกลียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{3}{4} p$ ^[17]

n คือ จำนวนเกลียว

สมการออกแบบคือ

$$\frac{3 P_{\max}}{2 A} = \tau_{allow1}$$

ภาระออกแบบ P_{\max} เท่ากับ 8000 นิวตัน (สมการที่ (4.7)) แก่สมการได้ $n = 20$ เกลียว (ปัดเศษขึ้น)

2.2) เกลียวเสียหายแบบครากเนื่องจากความเค้นอัด

พื้นที่รับความเค้นอัดในกรณีนี้ คือ พื้นที่ของหน้าเกลียว ซึ่งประมาณได้จาก

$$A = \frac{\pi}{4} (d_{s_n}^2 - d_{s_r}^2) n$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_{\max}}{A} = \sigma_{allow1}$$

ภาระออกแบบ P_{max} เท่ากับ 8000 นิวตัน (สมการที่ (4.7)) แก่สมการ $n = 9$ เกลียว (ปิดเศษขึ้น)

จำนวนเกลียวที่ต้องการเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายทั้งสองโหมด คือค่าที่มากกว่า ดังนั้น
จำนวนเกลียวบนชิ้นงานทดสอบ $n = 20$ เกลียว (4.20)

และความยาวเกลียวเท่ากับ $L_T = nP = 20 \times 1.75 = 35$ มม. (4.21)

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณความยาวสุทธิของชิ้นงานทดสอบ :

จากรูปที่ 4.2 ความยาวสุทธิของชิ้นงานทดสอบ L_S คือ

$$\begin{aligned} L_S &= 2(L_T + L_C + L_{ext}) + L_G \\ &= 2(35+3+20)+30 = 146 \text{ มม.} \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.3 ผลการออกแบบก้านดึงชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด

4.3.1 ผลการออกแบบก้านดึงชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด (ด้านบน)

รายละเอียดของผลการออกแบบก้านดึงชิ้นงานทดสอบ และอุปกรณ์จับยึด (ด้านบน) ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.9 มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดวิธีจับยึดระหว่างก้านดึงชิ้นงานกับตัวจับยึดชิ้นงาน :

กำหนดให้กลไกจับยึดระหว่างชิ้นงานทดสอบกับตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ (จุดที่ 1 ในรูปที่ 4.1) และระหว่างตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบกับก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (จุดที่ 2 ในรูปที่ 4.2) เป็นแบบเกลียว เพื่อลดความเค้นหนาแน่น (stress concentration) บริเวณจุดจับยึด

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบรูปร่างของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ :

รูปร่างของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบขึ้นอยู่กับ รูปร่าง(หน้าตัด) ของก้านดึงชิ้นงานทดสอบ, รูปร่าง(หน้าตัด)ของชิ้นงานทดสอบ และวิธีจับยึดที่กล่าวไปในขั้นตอนที่ 1

เนื่องจากรูปร่างชิ้นงานทดสอบ และก้านดึงชิ้นงานทดสอบเป็นรูปทรงกระบอก ดังนั้นรูปร่างภายในของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบจึงเป็นรูเจาะทำเกลียว รูปร่างภายนอกของตัวจับยึดชิ้นงานที่เลือกคือทรงกระบอก เพราะสอดคล้องกับรูปร่างวัตถุเดิมที่มีขาย (เหล็กกล้าไร้สนิม 310 S) ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาการสร้าง

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดกลไกการจับยึดระหว่างก้านตั้งชิ้นงานทดสอบกับตัวจับยึดคานทดสอบ :

วิธีจับยึดระหว่าง ก้านตั้งชิ้นงานและตัวจับยึดคานทดสอบ (จุดที่ 3 ในรูปที่ 4.1), ระหว่างตัวจับยึดคานทดสอบและคานทดสอบ (จุดที่ 4 ในรูปที่ 4.1) คือ ใช้สลัก เพื่อกำจัดโมเมนต์ดัด

ขั้นตอนที่ 4 เลือกวัสดุสำหรับทำก้านตั้งชิ้นงาน, ตัวจับยึดชิ้นงาน และตัวจับยึดคานทดสอบ :

ชิ้นส่วนที่กล่าวมาถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูง (ในที่นี้ออกแบบที่ 600°C) และรับภาระ ดังนั้นวัสดุที่เหมาะสมจะต้องมีคุณสมบัติ ต่อไปนี้

- 1) มีความต้านทานแรงดึงคราก (ณ อุณหภูมิใช้งาน) สูง
- 2) มีความต้านทานต่อการคืบสูง
- 3) ความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง

กลุ่ม (class) ของวัสดุที่สามารถใช้งานได้ในช่วง $600^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}$ มีดังนี้ ^[8]

- 1) เหล็กกล้าไร้สนิมหรือ เหล็กกล้าสเตนเลส
- 2) Fe-Ni-base ซุปเปอร์อัลลอย
- 3) Ni-base ซุปเปอร์อัลลอย
- 4) Co-base ซุปเปอร์อัลลอย

แม้ว่าวัสดุประเภทซุปเปอร์อัลลอย มีคุณสมบัติทั้ง 3 ข้อที่ต้องการดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิเท่ากัน แต่เนื่องจากไม่มีตัวแทนจำหน่ายในประเทศ และการสั่งซื้อแม้จะทำได้แต่ก็เป็นกรณีพิเศษจึงเสียค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นจึงสมควรเลือกใช้วัสดุในกลุ่มเหล็กกล้าสเตนเลสประเภทออสเทนนิติก (austenitic) เพราะมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดีกว่า เหล็กกล้าสเตนเลสประเภทอื่น (เฟอร์ริติก และมาร์เทนซิติก)

ในที่นี้เลือกใช้เหล็กกล้าสเตนเลส ประเภทออสเทนนิติกเบอร์ 310S เพราะมีความแข็งแรง ความต้านทานการคืบ และความต้านทานออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิสูงดี และมีตัวแทนจำหน่ายในประเทศ

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณมิติหน้าตัดของก้านดึงชิ้นงาน (ด้านชิ้นงานทดสอบ) :

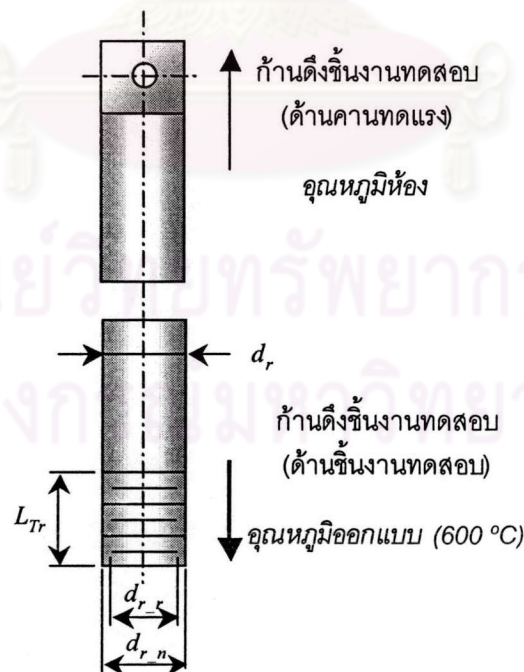
จากรูปที่ 4.3 มิติของหน้าตัดของก้านดึงชิ้นงาน (ด้านชิ้นงานทดสอบ) ที่ต้องการทราบคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงาน d_r (ซึ่งเท่ากับ ขนาด (ระบุ) ของเกลียวที่ปลายของ ชิ้นงานทดสอบ) ส่วนมิติที่เกี่ยวข้องกับการจับยึดที่ต้องการทราบก็คือ ความยาวเกลียว L_{Tr}

โหมดความเสียหายของก้านดึงชิ้นงาน และตัวจับยึดชิ้นงาน ที่เป็นไปได้คือ

- 1) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง
- 2) เกลียวเสียหายแบบครากเนื่องจากความเค้นอัด
- 3) ก้านดึงชิ้นงานขาดเนื่องจากความเค้นดึง

ในเบื้องต้น ผู้วิจัยสมมุติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงาน d_r เท่ากับ 22 มม. แต่เนื่องจากปลายอีกข้างต้องทำเกลียวจึงเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สมมุติขึ้นกับขนาดเกลียวมาตรฐาน ซึ่งพบว่าเกลียวที่มีขนาดใหญ่กว่าและใกล้เคียงกับขนาดที่สมมุติ คือ 24 มม. ดังนั้นจึงปรับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงาน เป็น

$$d_r = 24 \text{ มม.} \quad (4.23)$$



รูปที่ 4.3 รูปร่างและตัวแปรมิติของก้านดึงชิ้นงานที่ออกแบบ

ในส่วนปลายที่เป็นเกลียว จะได้ว่า $d_{r_n} = d_r^1$ (4.24)

จากตารางเกลียวมาตรฐานจะได้ ระยะพิทช์ คือ $p = 3$ มม.

1) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง

พื้นที่ที่รับความเค้นเฉือนในกรณีนี้คือ พื้นที่ฐานของเกลียว A

$$A = \pi d_{r_r} b n$$

โดย d_{r_r} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางราก ของก้านดิ่งชิ้นงานทดสอบ ซึ่งหาได้จาก

$$d_{r_r} = d_{r_n} - \frac{5\sqrt{3}}{8} p$$

โดยที่ b คือ ความสูงของฐานเกลียว มีค่าเท่ากับ $\frac{3}{4} p$

n คือ จำนวนเกลียว

สมการออกแบบคือ

$$\frac{3 P_{\max}}{2 A} = \tau_{allow2}$$

ภาระออกแบบ P_{\max} เท่ากับ 8000 นิวตัน (สมการที่ (4.7)) ดังนั้นเมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการออกแบบจะได้จำนวนเกลียว คือ $n = 4$ เกลียว (ปัดเศษขึ้น)

2) เกลียวเสียหายแบบครากเนื่องจากความเค้นอัด

พื้นที่ ที่รับความเค้นอัดในกรณีนี้ คือ พื้นที่หน้าเกลียว ซึ่งประมาณได้จาก

$$A = \frac{\pi}{4} (d_{r_n}^2 - d_{r_r}^2) n$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_{\max}}{A} = \sigma_{allow2}$$

ภาระออกแบบ P_{\max} เท่ากับ 8000 นิวตัน (สมการที่ (4.7)) แก่สมการจะได้ $n = 2$ เกลียว (ปัดเศษขึ้น)

¹ โดยสมมติให้ก้านดิ่งชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอทั้งท่อน อย่างไรก็ตาม ขนาดมาตรฐานของเพลามีขายคือ 25.4 มม. (1 นิ้ว) ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีการกลึงปอกผิวก้านดิ่งชิ้นงานออกให้เหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มม.

3) กำหนดขนาดเนื่องจากความเค้นดึง

พื้นที่น้อยที่สุดที่รับแรงดึงคือ พื้นที่วงกลมฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$A = \frac{\pi}{4} d_{r-r}^2$$

สมการออกแบบ คือ

$$\frac{P_{\max}}{A} = \sigma_{allow2}$$

แทนค่าแล้วแก้สมการจะได้

$$d_{r-r} = 7.18 \text{ มม.}$$

ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงานที่สมมุติจึงยอมรับได้

จากผลการคำนวณจำนวนเกลียวในข้อย่อย 1) และ 2) จะเลือกใช้ค่าที่มากที่สุด ซึ่งเท่ากับ 4 เกลียว เมื่อนำไปคูณกับระยะพิทช์ แล้วจะได้ความยาวเกลียว L_{Tr} เท่ากับ

$$L_{Tr} = np = 3 \times 4 = 12 \text{ มม.}$$

อย่างไรก็ดี มีคำแนะนำเกี่ยวกับระยะของการจับยึดด้วยเกลียว^[12.17] ว่าควรจะอยู่ในช่วง 1-1.25 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของเกลียวตัวผู้ (ในกรณีตัวจับยึดทำจากเหล็กกล้า) ดังนั้นความยาวเกลียวตามที่แนะนำควรมีค่าอยู่ในช่วง 24 - 30 มม. ในที่นี้เลือกค่าสูงสุด ดังนั้น

$$L_{Tr} = 30 \text{ มม.} \quad (4.25)$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณมิติของก้านดึงชิ้นงาน (ด้านคานทอดแรง) :

การคำนวณในขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับ ตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) ด้วย ดังนั้นการออกแบบจะครอบคลุมการหา มิติของตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงชื่อตัวแปรขนาดที่ใช้กำหนดมิติของตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) และปลายของก้านดึงชิ้นงานทดสอบตามลำดับ ขั้นตอนหลัก ประกอบด้วย

- 1) การเลือกวัสดุ
- 2) การคำนวณขนาดของชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจับยึด (ระหว่างก้านดึงชิ้นงานกับคานทอดแรง)

1) การเลือกวัสดุ

การเลือกวัสดุสำหรับทำตัวจับยึดของคานทอดแรง พิจารณาจากความต้านแรงดึงคราก เพราะการใช้งานอยู่ที่อุณหภูมิห้อง ในที่นี้เลือกใช้เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง AISI 4340 เพราะหาซื้อได้ในประเทศ และมีราคาไม่แพงนัก (ประมาณ 200 บาทต่อกิโลกรัม) สำหรับทำตัวจับยึดคาน

ทดแรง และสลัก จากเอกสารของผู้ผลิต^[18] ความต้านแรงดึงคราก ของวัสดุ AISI 4340 (ที่ อุณหภูมิห้อง) เท่ากับ

$$\sigma_{y3} = 896.3 \text{ MPa}$$

ดังนั้นความเค้นเฉือนคราก τ_{y3} จะประมาณได้จาก

$$\tau_{y3} \approx 0.5\sigma_{y3} = 448.16 \text{ MPa}$$

เลือกตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 3 ดังนั้น ความเค้นดึงที่ยอมรับได้ และความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ คือ

$$\sigma_{allow3} = \frac{\sigma_{y3}}{3} = 298.77 \text{ MPa} \quad (4.26)$$

$$\tau_{allow3} = 0.5\sigma_{allow3} = 149.39 \text{ MPa} \quad (4.27)$$

สำหรับเหล็กกล้าสเตนเลส เบอร์ 310S (ใช้ทำก้านดึงชิ้นงานทดสอบ) ความต้านแรงดึงครากที่อุณหภูมิห้อง (หัวข้อที่ 4.2 ขั้นตอนที่ 4 ข้อย่อย 1) คือ

$$\sigma_{y2} = 290 \text{ MPa}$$

ดังนั้นความเค้นเฉือนคราก τ_{y2} จะประมาณได้จาก

$$\tau_{y2} \approx 0.5\sigma_{y2} = 145 \text{ MPa}$$

เลือกใช้ตัวประกอบความปลอดภัยเท่ากับ 2 เพราะเป็นวัสดุเหนียว ดังนั้นความเค้นดึงที่ยอมรับได้ และความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้ คือ

$$\sigma_{allow2} = \frac{\sigma_{y2}}{2} = 145 \text{ MPa} \quad (4.28)$$

$$\tau_{allow2} = 0.5\sigma_{allow2} = 72.5 \text{ MPa} \quad (4.29)$$

2) การคำนวณขนาดของชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจับยึด

การคำนวณที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

2.1) การคำนวณมิติที่ปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (รูปที่ 4.4)

2.2) การคำนวณขนาดของแชนด้านข้าง (อยู่ด้านล่าง) ของตัวจับยึดคานทดแรง (รูปที่

4.5)

2.3) การคำนวณขนาดของสลักกีคระหว่าง ก้านดึงชิ้นงานทดสอบและตัวจับยึดคานทดสอบ
แรง

2.4) การคำนวณขนาดของแขนตรงกลาง (อยู่ด้านบน) ของตัวจับยึดคานทดสอบแรง (รูปที่
4.5)

2.5) การคำนวณขนาดของสลักกีคระหว่าง ตัวจับยึดคานทดสอบแรงและคานทดสอบแรง

2.1) การคำนวณมิติที่ปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบ

โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับก้านดึงชิ้นงานทดสอบ คือ ความเค้นดึงสูงสุดที่รูเจาะมีค่ามากกว่าความเค้นดึงที่ยอมรับได้ ในที่นี้ออกแบบให้ปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ดูรูปที่ 4.5)

จากรูป ความกว้างหน้าตัด w_2 สามารถประมาณได้จากสมการ

$$w_2 = 2\sqrt{\frac{d_{r-n}^2}{4} - \frac{t_3^2}{4}} \quad (4.30)$$

สมการการออกแบบคือ

$$k_t \frac{P}{w_2 t_3} = \sigma_{allow2} \quad (4.31)$$

โดย คือ k_t ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (stress concentration factor)

สำหรับกรณีนี้ที่อัตราส่วน $h_5/w_2 = 1$ จะได้^[9]

$$k_t = 34.524 \left(\frac{d_1}{w_2} \right)^2 - 30.31 \frac{d_1}{w_2} + 11.314 \quad (4.32)$$

สมมุติ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ เท่ากับ 10 มม. (จะตรวจสอบว่าเหมาะสมกับขนาดของสลักหรือไม้ในภายหลัง) และแทนสมการที่ (4.30) และ (4.32) ลงในสมการที่ (4.31) แล้วแก้สมการ ด้วยวิธีเชิงตัวเลข จะได้

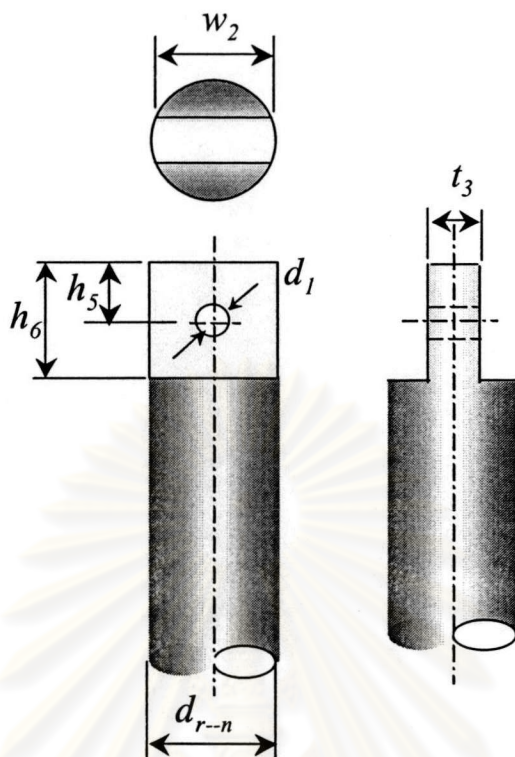
$$t_3 = 12 \text{ มม. (ปัดเศษขึ้น)} \quad (4.33)$$

แทนผลลัพธ์ (4.28) ลงในสมการที่ (4.25) จะได้

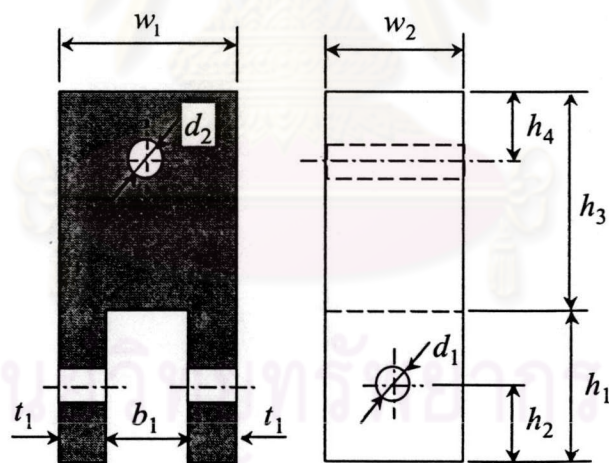
$$w_2 = 21.932 \text{ มม.} \quad \text{ปรับเป็น 22 มม.} \quad (4.34)$$

จากที่กำหนด จะได้ $h_5 = w_2 = 21.932 \text{ มม.}$ ปรับเป็น 22 มม. (4.35)

และเลือก $h_6 = 2.75 h_5 = 60.31 \text{ มม.}$ ปรับเป็น 60 มม. (4.36)



รูปที่ 4.4 รูปร่างและตัวแปรขนาด ของก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (ด้านคานทดสอบ)



รูปที่ 4.5 รูปร่าง และตัวแปรขนาดของ ตัวจับยึดคานทดสอบ

2.2) การคำนวณขนาดแนวด้านข้างของตัวจับยึดคานทดสอบ

โหมดความเสียหายที่เป็นไปได้ คือ ความเค้นดึงสูงสุดที่รูเจาะมีค่ามากกว่าความเค้นดึงที่ยอมรับได้

สมการออกแบบ คือ

$$k_t \frac{\left(\frac{P_{max}}{2}\right)}{w_1 t_1} = \sigma_{allow1}$$

กำหนด $w_1 = 22$ มม. และอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ d_1 และความกว้าง w_1 เท่ากับหนึ่งแล้ว (จากสมการที่ (4.32)) จะได้ $k_t = 4.67$ และ $P_{max} = 8000$ นิวตัน แทนในสมการออกแบบ แล้วแก้สมการจะได้

$$t_1 = 3 \text{ มม. (ปัดเศษขึ้น)}$$

จากเอกสารอ้างอิง ^[12] แนะนำว่าความหนาของแกนด้านข้างในข้อต่อชนิดนี้ คือค่าที่มากกว่าระหว่างความหนาที่คำนวณได้ กับค่า 0.75 เท่า ของความหนาของปลายชิ้นส่วนอีกอันที่สอดคล้องกล่าวคือ

$$\begin{aligned} t_1 &= \max(t_1, 0.75 t_3) \\ &= 9 \text{ มม.} \end{aligned} \quad (4.37)$$

เลือกใช้
$$h_2 = h_5 = 22 \text{ มม.} \quad (4.38)$$

และ
$$h_1 = 2.25 h_2 = 50 \text{ มม.} \quad (4.39)$$

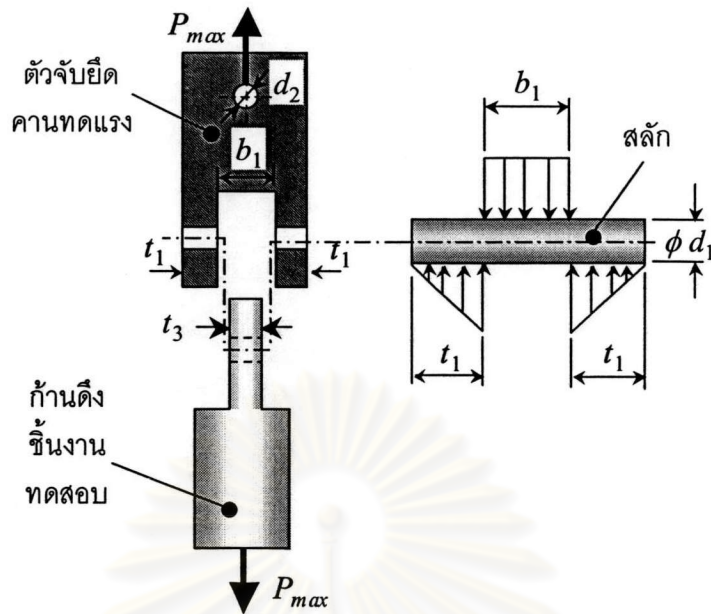
2.3) การคำนวณขนาดของสลักยึดระหว่างก้านดึงชิ้นงานทดสอบ และตัวจับยึดคานทดสอบ

จากรูปที่ 4.5 สลักยึดระหว่างก้านดึงชิ้นงานทดสอบ และตัวจับยึดคานทดสอบ จะสอดผ่านรูเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด d_1 ดังนั้น สลักที่จะออกแบบจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ d_1 โหมดความเสียหายอาจเกิดขึ้นได้ ประกอบด้วย

- 1) ความเค้นดัดสูงสุดมากกว่าความเค้นดัดที่ยอมรับได้
- 2) ความเค้นเฉือนตามขวางมากกว่าความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้

2.3.1) ความเค้นดัดสูงสุดมากกว่าความเค้นดัดที่ยอมรับได้

รูปที่ 4.6 แสดงภาพประกอบของการจับยึดระหว่างก้านดึงชิ้นงานทดสอบและตัวจับยึดคานทดสอบ (ส่วนหลัง) ด้วยสลัก ชิ้นส่วนที่ประกอบเข้ากันนี้จะอยู่ภายใต้ภาระดึง P_{max} หากกำหนดให้ t_3 มีค่าประมาณ b_1 (ความกว้างช่องของแกนตัวจับยึดคานทดสอบ) และการกระจายของภาระบนสลักมีลักษณะดังแสดงในรูปแล้วตำแหน่งที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด M_{max} คือ ที่กึ่งกลางความยาวสลัก โดยมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 4.6 ภาพประกอบของการจับยึดระหว่างก้านดึงชิ้นงานทดสอบกับตัวจับยึดคานทอดแรงด้วยสลัก

$$M_{max} = \frac{P_{max}}{2} \left(\frac{t_1}{3} + \frac{b_1}{2} \right) - \frac{P_{max}}{2} \frac{b_1}{4} \quad (4.40)$$

กำหนดให้เท่ากับ b_1 เท่ากับผลบวกของระยะเผื่อ (เลือกใช้ค่า 2 มม.) และความหนาของปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบ t_3 ดังนั้น

$$b_1 = t_3 + 2 = 14 \text{ มม.} \quad (4.41)$$

สมการออกแบบ คือ

$$\frac{32M_{max}}{\pi d_1^3} = \sigma_{allow3} \quad (4.42)$$

แทนค่าผลลัพธ์ที่ (4.7), (4.37), (4.41) ลงในสมการ (4.40) แล้วนำไปแทนในสมการออกแบบ (4.42) และจากผลลัพธ์ (4.26) จะแก้สมการหา d_1 ได้

$$d_1 = 9.606 \text{ มม.}$$

2.3.2) ความเค้นเฉือนตามขวางสูงสุดมากกว่าความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้

สมการออกแบบ คือ

$$\frac{4}{3} \frac{P_{max}}{\pi d_1^2} = \tau_{allow3} \quad (4.43)$$

แทนค่าผลลัพธ์ (4.7) และ (4.27) ลงในสมการที่ (4.43) แล้วแก้สมการหา d_1 จะได้

$$d_1 = 9.535 \text{ มม.}$$

จากผลการคำนวณในข้อย่อยที่ 2.3.1) และ 2.3.2) เลือกค่าที่มากกว่าดังนั้นจะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักคือ

$$d_1 = 9.606 \text{ มม.} \quad (4.44)$$

เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักเล็กกว่าขนาดของรูเจาะ และมีระยะเผื่อเหมาะสมในการสวมแบบหลวมดังนั้นจึงไม่ต้องคำนวณซ้ำ

2.4) การคำนวณขนาดของแขนตัวกลางของตัวจับยึดคานทดแรง

จากสมการที่ (4.37) และ (4.41) จะได้ความกว้างของแขนตัวกลาง w_1 (รูปที่ 4.5) เท่ากับ $t_1 + t_1 + b_1$ ดังนั้น

$$w_1 = 32 \text{ มม.} \quad (4.45)$$

เพื่อให้ค่าของตัวประกอบความเค้นหนาแน่นน้อยที่สุด จะได้ระยะ h_4 เท่ากับ w_1 ดังนั้น

$$h_4 = 32 \text{ มม.} \quad (4.46)$$

สมมติว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ d_2 เท่ากับ 11 มม. แทนค่าลงในสมการที่ (4.32) จะได้ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นเท่ากับ

$$k_t = 4.974 \quad (4.47)$$

ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นตรงรูเจาะคือ

$$\sigma = k_t \frac{P_{\max}}{w_2(2t_1 + b_1)} \quad (4.48)$$

เมื่อแทนค่าลงไปจะได้ความเค้นสูงสุดเท่ากับ 56.7 MPa ซึ่งน้อยกว่าความเค้นที่ยอมรับได้ ดังนั้นสามารถใช้สลักขนาดนี้ได้อย่างปลอดภัย

ในที่นี้กำหนดระยะ h_3 เท่ากับ

$$h_3 = 2h_4$$

แทนค่าจะได้

$$h_3 = 64 \text{ มม.} \quad (4.49)$$

2.5) การคำนวณขนาดของสลักยึดระหว่าง ตัวจับยึดคานทอดแรงและคานทอดแรง

ลักษณะที่พิจารณารับภาระแนวขวางดังนั้นใหม่ตความเสียหายที่เกิดขึ้นประกอบด้วย

- 1) ความเค้นดัดสูงสุดมากกว่าความเค้นดัดที่ยอมรับได้
- 2) ความเค้นเฉือนตามขวางมากกว่าความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้

2.5.1) ความเค้นดัดสูงสุดเท่ากับความเค้นดัดที่ยอมรับได้

กำหนดให้ ความหนาของคานทอดแรงซึ่งทำหน้าที่รองรับปลายทั้งสองข้างของสลัก t_4 มีความหนาเท่ากับ t_1 ดังนั้น

$$t_4 = 9 \text{ มม.} \quad (4.50)$$

โมเมนต์ดัดสูงสุดคือ

$$M_{\max} = \frac{P_{\max}}{2} \left(\frac{t_4}{3} + \frac{b_2}{2} \right) - \frac{P_{\max}}{2} \frac{b_2}{4} \quad (4.51)$$

โดย b_2 คือ ระยะห่างระหว่างผิวด้านในของคานทอดแรง ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับผลบวกของความหนาของแขนตัวกลางของ ตัวจับยึดคานทอดแรง w' (สมการที่ (4.45)) กับ ระยะเผื่อ ซึ่งในที่นี้เลือกค่า 2 มม. ดังนั้น

$$b_2 = 34 \text{ มม.} \quad (4.52)$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{32M_{\max}}{\pi d_2^3} = \sigma_{allow3} \quad (4.53)$$

แทนค่าผลลัพธ์ (4.7), (4.50), (4.52) ลงในสมการ (4.51) ออกแบบ จากนั้นแทนลงในสมการออกแบบ (4.53) และจากผลลัพธ์ (4.26) จะแก้สมการหา d_2 ได้เท่ากับ

$$d_2 = 10.50 \text{ มม.}$$

2.5.2) ความเค้นเฉือนตามขวางสูงสุดเท่ากับความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้

สมการออกแบบคือ

$$\frac{4}{3} \frac{P_{\max}}{\pi d_2^2} = \tau_{allow3} \quad (4.54)$$

แทนค่าตัวแปรที่ทราบลงในสมการออกแบบ แล้วแก้สมการหา d_2 จะได้

$$d_2 = 9.535 \text{ มม.}$$

เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักค้ำที่มากกว่า
ดังนั้น

$$d_2 = 10.50 \text{ มม.} \quad (4.55)$$

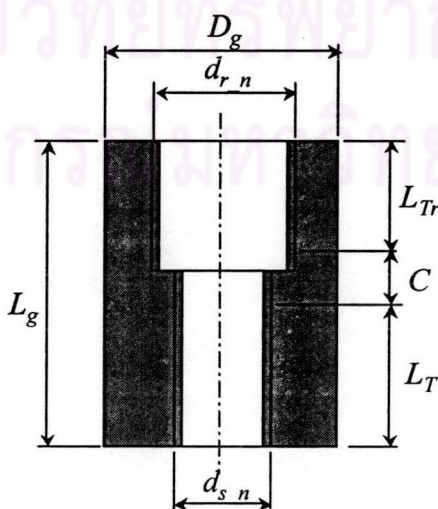
เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักค้ำเล็กกว่าขนาดของรูเจาะ (สมมุติไว้ 11 มม.) และมีระยะ
เผื่อที่เหมาะสมในการสวมแบบหลวมดังนั้นจึงไม่ต้องคำนวณซ้ำ

จากผลการคำนวณที่แสดงทั้งหมด สรุปว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงานที่
กำหนด (24 มม. ตรงส่วนที่ทำเกลียว) มีความเหมาะสม ใดๆก็ดี ได้กล่าวไปแล้วว่าขนาดเพลา
มาตรฐานที่มีขายคือ 25.4 มม. (1 นิ้ว) ดังนั้นจะใช้ก้านดึงชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังกล่าว
แต่บริเวณที่ทำเกลียวจะกลึงปอกจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มม.

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณมิติของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ :

มิติของตัวจับยึดชิ้นงานบางส่วน ได้จากผลการคำนวณที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ ยกตัวอย่าง
เช่น $d_{r_n} = 24$ มม. (สมการที่ (4.24)), $d_{s_n} = 12$ มม. (สมการที่ (4.12)), $L_T = 35$ มม..
(สมการที่ (4.21)) และ $L_{Tr} = 30$ มม. (สมการที่ (4.25)) ตัวแปรรอบขนาดเหล่านี้ และภาพตัด
ของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7 จากรูป เพื่อระยะห่างจากปลายชิ้นงานทดสอบ
ถึงปลายก้านดึงชิ้นงานทดสอบที่ขันเข้าไปในตัวจับชิ้นงานเท่ากับ C เท่ากับ 10 มม. ทั้งสองด้าน
ของตัวจับชิ้นงานแล้วจะได้ความยาวของตัวจับชิ้นงาน เท่ากับ

$$\begin{aligned} L_g &= L_{Tr} + L_T + C \\ &= 30 + 35 + 10 = 75 \text{ มม.} \end{aligned} \quad (4.56)$$



รูปที่ 4.7 รูปร่าง และตัวแปรรอบขนาดของ ตัวจับยึดชิ้นงาน

มิติของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบที่ยังไม่ทราบคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก D_g จากรูปที่ 4.6 พื้นที่รับแรงดึงของตัวจับยึดชิ้นงาน ด้านก้านดึงชิ้นงานทดสอบ จะน้อยกว่าด้านชิ้นงานทดสอบ ดังนั้นด้านก้านดึงชิ้นงานทดสอบจะเสียหายก่อน หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งคือ เป็นตัวกำหนด D_g โหมดความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ก็คือ การครากเนื่องจากความเค้นดึง

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_{\max}}{\frac{\pi}{4}(D_g^2 - d_{r-n}^2)} = \sigma_{allow2} \quad (4.57)$$

แทนผลลัพธ์ใน (4.7), (4.24) และ (4.28) ลงในสมการออกแบบ (4.57) แก้สมการหา D_g จะได้

$$D_g = 28 \text{ มม. (ปัดเศษขึ้น)}$$

เอกสารอ้างอิงหมายเลข [12] แนะนำว่าในกรณีเช่นนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกควรเป็น 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะมีเกลียว ดังนั้น

$$D_g = \max(D_g, 1.5d_{r-n})$$

จะได้

$$D_g = 36 \text{ มม.} \quad (4.58)$$

4.3.2 ผลการออกแบบก้านดึงชิ้นงานทดสอบและอุปกรณ์จับยึด (ด้านล่าง)

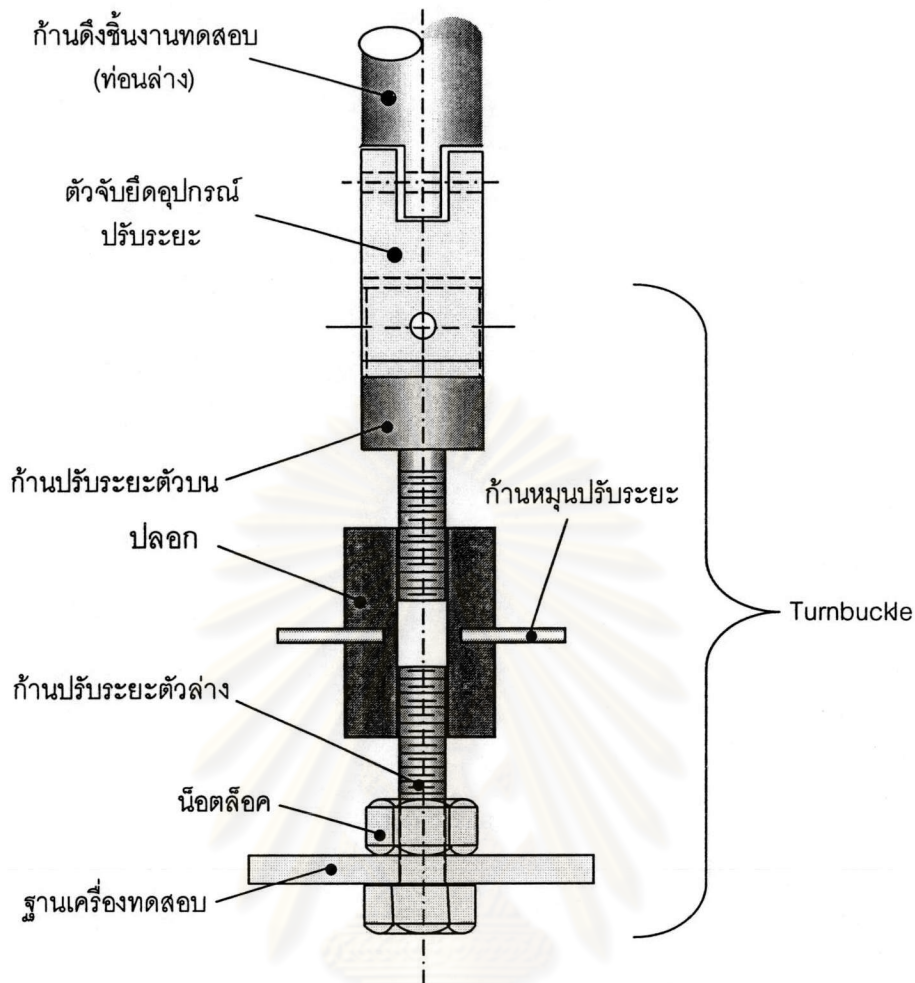
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดรูปร่าง และมิติของตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ :

เหมือนตัวจับยึดชิ้นงานตัวบนทุกประการ ดังนั้นจะได้ $d_{r-n} = 24$ มม. $L_T = 30$ มม. $L_T = 35$ มม. $L_G = 75$ มม. และ $D_g = 36$ มม. (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ)

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดกลไกจับยึดระหว่างก้านดึงชิ้นงานกับตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะ :

กลไกปรับระยะตามแนวแกน และการจับยึดชิ้นส่วนต่าง ๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.8

จากรูปกลไกปรับระยะที่ใช้คือ turnbuckle (ต่อไปจะใช้ชื่อทั่วไปว่า อุปกรณ์ปรับระยะ) แกนของอุปกรณ์ปรับระยะขึ้นบนและขึ้นล่างจะทำเกลียวทิศตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ ขึ้นบนจะทำเกลียวซ้ายแต่ขึ้นล่างทำเกลียวขวา แกนขึ้นบนต่อกับตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะด้วยสลัก แกนท่อนล่างคือลำตัวของสลักเกลียว ซึ่งสอดผ่านด้านล่างของฐานเครื่องทดสอบอีกด้านหนึ่งของตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะจะต่อกับก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนล่างด้วยสลัก



รูปที่ 4.8 วิธีจับยึดจากฐานเครื่องทดสอบถึงปลายของก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนล่าง

ขั้นตอนที่ 3 เลือกวัสดุ :

วัสดุที่ใช้ทำตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ ก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนล่าง และอุปกรณ์ปรับระยะคือเหล็กกล้าสเตนเลส 310S (เหมือนสแตนเลส) สำหรับตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะ ใช้วัสดุ AISI 4340 steel

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณมิติหน้าตัดของก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (ด้านชิ้นงานทดสอบ) :

เลือกใช้ขนาดหน้าตัดเท่ากับก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนบน ดังนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดึงชิ้นงานทดสอบท่อนล่างคือ $d_{r,n} = 24$ มม. (สมการที่ 4.24)² และปลายด้านที่ยึดกับตัวจับชิ้นงานทดสอบจะทำเกลียวยาว $L_{Tr} = 30$ มม. (สมการที่ 4.25)

² ในส่วนที่ไม่ได้ทำเกลียวจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25.4 มม.

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณมิติหน้าตัดของก้านดึงชิ้นงานทดสอบ (ด้านอุปกรณ์ปรับระยะ) :

ในขั้นตอนนี้จะรวมการคำนวณมิติของตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะด้วย อย่างไรก็ตาม มิติที่ต้องการนั้นส่วนใหญ่สามารถหาโดยการเทียบกับผลการคำนวณก่อนหน้าได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

$$h_{11} = w' = 32 \text{ มม.} \quad (4.59)$$

$$h_{12} = 2.25h_{11} = 72 \text{ มม.} \quad (4.60)$$

$$h_{13} = w_2 = 22 \text{ มม.} \quad (4.61)$$

$$h_{14} = 2.25h_9 = 50 \text{ มม.} \quad (4.62)$$

$$t_2 = t_1 = 9 \text{ มม.} \quad (4.63)$$

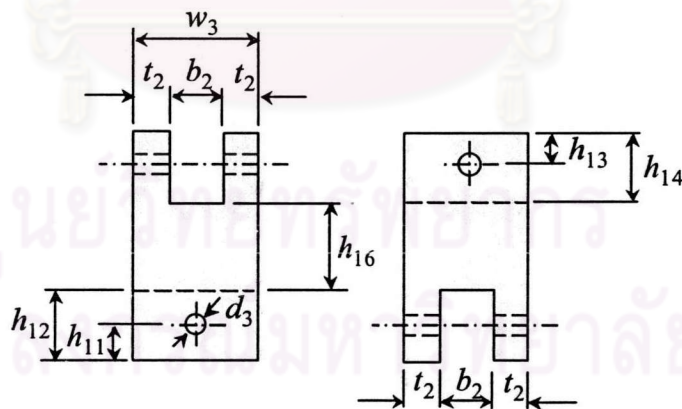
$$b_2 = b_1 = 14 \text{ มม.} \quad (4.64)$$

$$w_3 = w' = 32 \text{ มม.} \quad (4.65)$$

$$d_3 = d_1 = 10 \text{ มม.} \quad (4.66)$$

มิติที่ต้องกำหนดเพิ่มเติมคือ ระยะระหว่างร่องที่ปลายทั้งสองด้าน h_{16} ในที่นี้เลือก

$$h_{16} = 10 \text{ มม.} \quad (4.67)$$



รูปที่ 4.9 ตัวจับยึดอุปกรณ์ปรับระยะตามแนวแกน

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณมิติของอุปกรณ์ปรับระยะ :

รูปที่ 4.10 แสดงรูปร่าง และตัวแปรบอกมิติของอุปกรณ์ปรับระยะ จากผลการคำนวณก่อนหน้า สามารถระบุขนาดต่อไปนี้ได้

$$h_9 = w_2 = 22 \text{ มม.} \quad (4.68)$$

$$h_{10} \approx 2.75h_9 = 62 \text{ มม.} \quad (4.69)$$

นอกจากนี้กำหนดให้

$$h_{15} = 20 \text{ มม.} \quad (4.70)$$

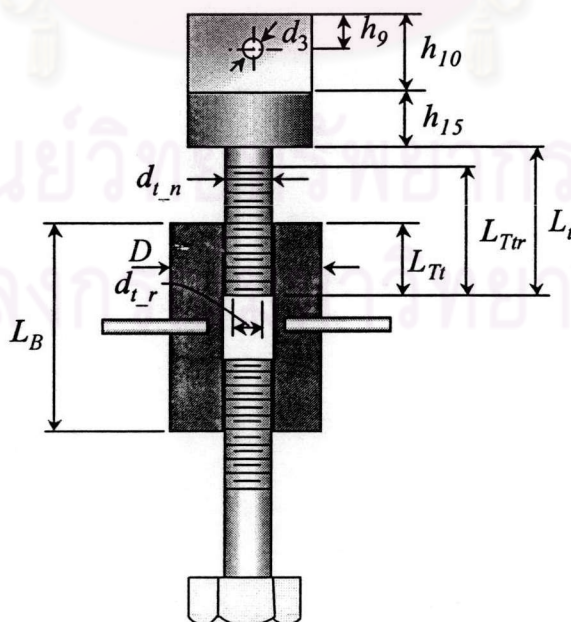
อย่างไรก็ดี จะต้องคำนวณหามิติที่ยังไม่ทราบค่า เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านของอุปกรณ์ปรับระยะชั้นบน และชั้นล่าง d_{r_n} และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของปลอก D

วัสดุทำก้านปรับระยะและปลอก คือ เหล็กกล้าสเตนเลส 310S ดังนั้น

$$\sigma_{y2} = 290 \text{ MPa} \quad \text{และ} \quad \tau_{y2} \approx 145 \text{ MPa}$$

โหมดของความเสียหายของก้านปรับระยะที่เป็นไปได้คือ

- 1) ก้านปรับระยะขาดเนื่องจากความเค้นดึง
- 2) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์ปรับระยะ และตัวแปรบอกมิติ

1) กำหนดปรับระยะขาดเนื่องจากความเค้นดึง

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_{\max}}{\frac{\pi}{4}d_{t-r}^2} = \frac{\sigma_{y2}}{SF}$$

โดย d_{t-r} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมรากของเกลียว

SF คือ ตัวประกอบความปลอดภัย ในที่นี้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 3

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการออกแบบ จะได้ $d_{t-r} = 10.27$ มม. ขนาดระบุของสลักเกลียวมาตรฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมรากของเกลียวมากกว่าหรือเท่ากับค่าตอบข้างต้นคือ 16 มม. ดังนั้น ขนาดระบุของกำหนดปรับระยะ d_{t-n} คือ

$$d_{t-n} = 16 \text{ มม.} \quad (4.71)$$

ระยะพิตซ์มาตรฐาน $p = 2$ มม. ดังนั้น $d_{t-r} = 13.835$ มม.

2) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง

พื้นที่เกลียวที่รับแรงเฉือน คือ

$$A = \pi d_{t-r} b n$$

โดย n คือ จำนวนเกลียว

เลือกใช้เกลียวที่มีขนาดระบุ 16 มม. (สมการที่ 4.71) ดังนั้นความกว้างของฐานเกลียว b คือ

$$b = p - 2\frac{p}{8} = 1.5 \text{ มม.}$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{3}{2} \frac{P_{\max}}{A} = \frac{\tau_{y2}}{SF}$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการออกแบบ จะได้

$$n = 4 \text{ เกลียว (ปัดเศษขึ้น)}$$

และความยาวเกลียวน้อยที่สุดที่เพียงพอสำหรับรับแรง L_T คือ $np = 4 \times 2 = 8$ มม.

ความยาวเกลียวควรอยู่ที่ประมาณ 1 ถึง 1.5 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของกำหนดปรับระยะ^[12] ดังนั้นเลือกใช้

$$L_{Tr} = 1.25 \times 16 = 20 \text{ มม.} \quad (4.72)$$

กำหนดระยะใช้งานในแนวแกน ที่อุปกรณ์ปรับระยะสามารถปรับได้ L_{adj} ดังต่อไปนี้

$$L_{adj} = 64 \text{ มม. (2.5 นิ้ว)} \quad (4.73)$$

ดังนั้น ก้านปรับระยะ (ทั้งด้านบนและด้านล่าง) จะต้องเคลื่อนได้เป็นระยะ 32 มม. ดังนั้นความยาวเกลียวบนก้านปรับระยะตัวบน L_{Tr} (รูปที่ 4.10) คือ

$$\begin{aligned} L_{Tr} &= L_{Tr} + 0.5L_{adj} \\ L_{Tr} &= 20 + 32 = 52 \text{ มม.} \end{aligned}$$

เพื่อความไม่สมบูรณ์ของเกลียว 3 มม. จะได้

$$L_{Tr} = 55 \text{ มม.} \quad (4.74)$$

จากรูปที่ 4.10 เพื่อระยะส่วนที่ไม่มีเกลียวเท่ากับ 10 มม. ดังนั้นความยาวของก้านปรับระยะตัวบน

$$L_t = 55 + 10 = 65 \text{ มม.} \quad (4.75)$$

3) ความเสียหายของปลอก

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของปลอก เท่ากับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของก้านปรับระยะ $d_{t-n} = 16$ มม. ความเสียหายที่เป็นไปได้ของปลอกคือ เกิดการครากบนหน้าตัดรับแรง ดังนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก D สามารถคำนวณจากสมการออกแบบต่อไปนี้

$$\frac{P_{max}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d_{t-n}^2)} = \frac{\sigma_{y2}}{SF}$$

แทนผลลัพธ์ (4.7) และ (4.71) ลงในสมการออกแบบจะได้

$$D = 19.01 \text{ มม.}$$

เนื่องจาก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกควรเท่ากับ 1.5 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ^[12] ซึ่งเท่ากับ 1.5×16 มม. ดังนั้น $D = 24$ มม. หรือความหนาของปลอกคือ 4 มม. แต่เนื่องจากต้องเจาะรูทำเกลียวสำหรับติดตั้งก้านหมุนปรับระยะ จึงปรับความหนาเป็น 10 มม. ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของปลอก D คือ

$$D = 36 \text{ มม.} \quad (4.76)$$

ความยาวของปลอก L_B (ดูรูปที่ 4.10) จะเท่ากับระยะใช้งาน L_{adj} บวกกับระยะเกลียว น้อยที่สุด L_{Tl} (ผลลัพธ์ (4.72))

$$L_B = L_{adj} + 2L_{Tl}$$

$$L_B = 64 + 2 \times 20 = 104 \text{ มม.}$$

เมื่อระหว่างปลายก้านปรับระยะ (ด้านที่ยึดกับปลอก) ขณะปรับ turnbuckle หดสั้นที่สุด ประมาณ 5 มม. ดังนั้น ความยาวของปลอก คือ

$$L_{TB} = 104 + 5 = 109 \text{ มม.} \quad (4.77)$$

4.4 ผลการออกแบบเตาความร้อน

4.4.1 การเลือกชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป

รายละเอียดการเลือกรุ่นของชุดให้ความร้อน ตามขั้นตอนในรูปที่ 3.11 มีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดลักษณะเนื้อที่ภายในเตา :

เนื่องจากใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม ดังนั้นจึงเลือกชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปทรงกระบอก เพื่อให้การกระจายอุณหภูมิที่ผิวชิ้นงานในแนวเส้นรอบวงสม่ำเสมอ

ขั้นตอนที่ 2 ประมาณเนื้อที่ว่างภายในเตา :

ขั้นตอนที่ 2.1 การประมาณความกว้างของเนื้อที่ว่างภายในเตา

เกณฑ์ที่ใช้ประมาณก็คือ จะต้องกว้างพอที่จะติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัว จากผลลัพธ์ (4.58) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของตัวจับยึดชิ้นงาน เท่ากับ 36 มม. จากแคตตาล็อกของสินค้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่เล็กที่สุดของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปทรงกระบอก คือ 100 มม. ในกรณีนี้จะมีช่องว่างสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวประมาณ 32 มม. (ในแนวรัศมี) เมื่อพิจารณา (คร่าว ๆ) ถึงการออกแบบอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนตัวพบว่าสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กกว่าเนื้อที่ที่มีได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้ชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่มีความกว้าง (หรือพูดให้เฉพาะลงไปคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) เท่ากับ 100 มม.

ขั้นตอนที่ 2.2 การประมาณความสูงของเนื้อที่ว่างภายในเตา

โดยพิจารณาจากความยาวสุทธิ ของชิ้นงานทดสอบเมื่อประกอบเข้ากับตัวจับยึด ชิ้นงานแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จะได้ความยาวสุทธิของชิ้นงานทดสอบที่ประกอบกับตัวจับยึด ชิ้นงาน คือ

$$L_{sg} = 35 + 146 + 35 = 216 \text{ มม.} \quad (4.78)$$

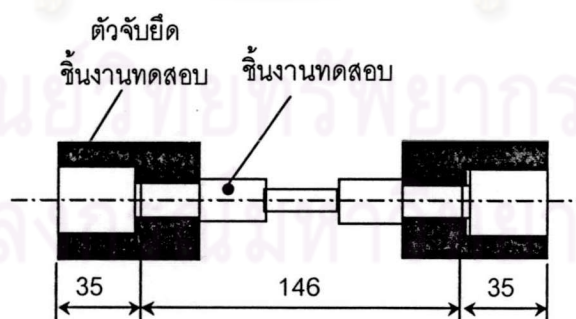
จากแคตตาล็อกสินค้าของผู้ผลิต เลือกชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปสูง 250 มม. (ความสูงน้อยที่สุด)

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดวิธีติดตั้งชิ้นงานทดสอบกับเครื่องทดสอบ :

กำหนดวิธีเปิด-ปิดเตาเป็นแบบเปิดด้านข้าง ดังนั้นชุดให้ความร้อนที่เลือกจึงเป็นครึ่งทรงกระบอก (half cylinder) 2 อันประกบกัน

ขั้นตอนที่ 4 เลือกรุ่นของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป:

นอกจากมิติของชุดให้ความร้อน จะต้องพิจารณากำลังความร้อนที่สร้างได้ด้วย ในที่นี้ เลือกชุดให้ความร้อนยี่ห้อ Kantal รุ่น HAS 100/250/57.5 ซึ่งมีกำลังเท่ากับ 650 วัตต์ (ต่อ 1 ซีก) หรือเมื่อประกอบเป็นเตา (2 ซีกประกบกัน) แล้วมีกำลังความร้อนเท่ากับ 1350 วัตต์ อย่างไรก็ตามจะ มีตรวจสอบว่ากำลังความร้อนดังกล่าวเพียงพอกับความต้องการหรือไม่ในขั้นตอนการออกแบบ เตาความร้อน



รูปที่ 4.11 ชิ้นงานทดสอบที่ติดตั้งกับตัวจับยึดชิ้นงานทดสอบ

4.4.2 ผลการออกแบบเตาความร้อน

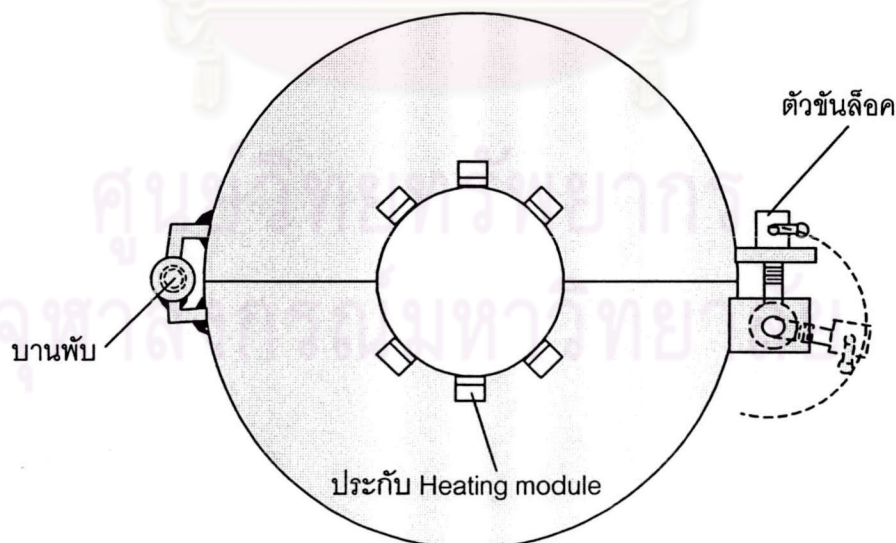
ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบเปลือกเตาสำหรับติดตั้งชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป

เนื่องจากชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่ใช้ทำจากวัสดุที่อ่อน จึงไม่สามารถติดตั้งกับเครื่องทดสอบได้โดยตรง ทำให้ต้องออกแบบเปลือกเตาทำด้วยโลหะ การออกแบบที่จะกล่าวถึงต่อไปประกอบด้วย การออกแบบ กลไกเปิด-ปิดเตา และกลไกสำหรับพองชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน

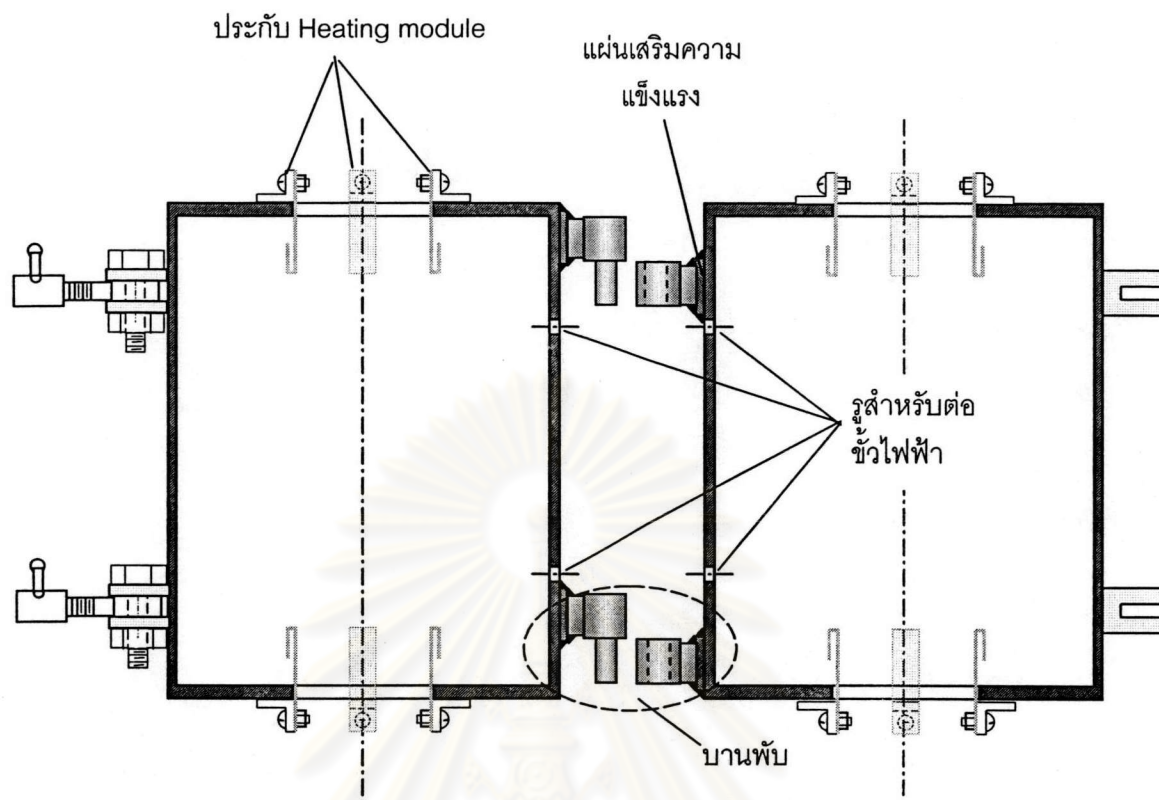
ชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่เลือกมีลักษณะเป็นเครื่องทรงกระบอก 2 อัน จึงออกแบบเปลือกเตาเป็นรูปครึ่งทรงกระบอก (2 อัน) เช่นกัน เปลือกเตาทั้งสองจะยึดต่อกันด้วยบานพับ (รูปที่ 4.12 และ 4.13) การปิดล็อกเตาใช้วิธีขันสลักซึ่งทำหน้าที่รั้งเปลือกทั้งสองซีกเข้าหากัน (รูปที่ 4.12)

กลไกสำหรับพองชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน มีลักษณะเป็นแผ่นประกบพับปลาย (รูปที่ 4.13) ติดตั้งโดยรอบ ทั้งด้านบน และด้านล่าง แผ่นประกบนี้จะเป็นเหมือนสปริงคอยดันชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปให้อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน

นอกจากกลไกที่กล่าวมาแล้ว จะต้องพิจารณาเรื่องตำแหน่งของรูเจาะเพื่อให้ขั้วไฟฟ้าของชุดให้ความร้อนโผล่ออกมานอกเตาได้



รูปที่ 4.12 ภาพด้านบนเปลือกเตาขณะที่ประกบกัน



รูปที่ 4.13 ภาพตัดวิวด้านข้างของเปลือกเตาแต่ละซีก

วัสดุที่ใช้ทำเปลือกเตา ในที่นี้เลือก เหล็กกล้าสเตนเลส เบอร์ 304S ความหนาของเปลือกเตาคือ 3 มม. ซึ่งจากประสบการณ์พบว่ามีความแข็งแรงเพียงพอ และสามารถเชื่อมชิ้นส่วนต่างๆ ได้สะดวก และไม่บิดเบี้ยวมาก อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อชิ้นส่วนใด ๆ กับเปลือกเตาด้านข้างจะต้องมีแผ่นเสริมเพื่อช่วยกระจายแรงด้วย

ขั้นตอนที่ 2 เลือกชนิดของฉนวนความร้อน และวัสดุทำเปลือกเตา :

วัสดุที่ทำเปลือกเตาคือ เหล็กกล้าสเตนเลส 304SS เพื่อไม่ให้เป็นสนิม ฉนวนด้านข้างทำด้วย Alumina-Silica fiber ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) เพราะเป็นเส้นใยทอ จึงสามารถม้วนพันรอบชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปได้ง่าย มีน้ำหนักเบา และมีความเป็นฉนวนความร้อนดี ฉนวนด้านบน (และล่าง) คือวัสดุชนิดเดียวกับชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดความหนาของฉนวนความร้อน และความหนาของเปลือกเตา :

กำหนดความหนาของเปลือกเตาคือ 3 มม ความหนาของฉนวนด้านข้างคือ 35 มม. และความหนาของฉนวนด้านบน (และล่าง) คือ 25 มม.

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณอุณหภูมิที่ผิวนอกของเตา :

จากแคตตาล็อกของผู้ผลิตชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป อุณหภูมิสูงสุดของขดลวดคือ 1150 องศาเซลเซียสโดยประมาณ (ขึ้นกับกำลังความร้อนที่สร้างขณะนั้น) ในที่นี้กำหนดอุณหภูมิที่ผิวด้านในของเตา T_1 เท่ากับ 1000 องศาเซลเซียส

การคำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของเตา ในที่นี้พิจารณาเฉพาะกรณีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านข้างของเตาความร้อนเนื่องจากมีพื้นที่ (สูญเสียความร้อน) มากที่สุด รูปที่ 4.14 แสดงภาพตัดของเตาความร้อน (ชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่หุ้มฉนวนและติดตั้งในเปลือกเตา)

จากรูปที่ 4.14 ปริมาณความร้อนสูญเสียที่ผิว (เนื่องจากการพา และการแผ่รังสี) Q_s คือ

$$Q_s = hA_o(T_4 - T_\infty) + \varepsilon\sigma A_o [T_4^4 - T_\infty^4] \quad (4.79)$$

โดย $A_o = 2\pi r_4 H$

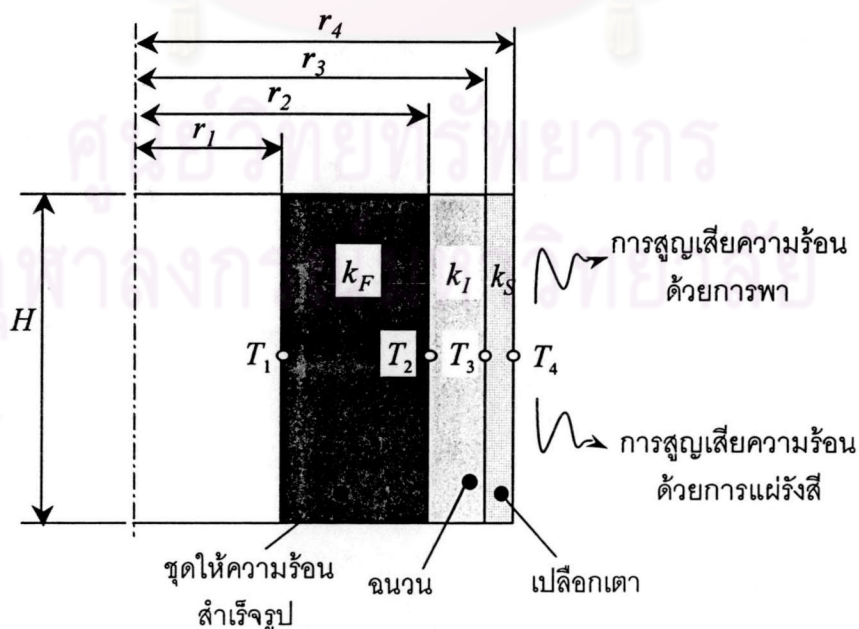
H คือ ความสูงของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป

ε คือ Emissivity สำหรับสแตนเลส เท่ากับ 0.28^[4]

σ คือ ค่าคงตัวของ Boltzman มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $h = Nu \frac{k}{L}$

T_∞ คือ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม เท่ากับ 30 °C



รูปที่ 4.14 ภาพตัดด้านข้างของเตาความร้อนและโหมดการสูญเสียความร้อน

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (4.80)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.81)$$

$$Ra = \frac{g(T - T_{\infty})L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (4.82)$$

โดย Nu คือ Nusselt number

Pr คือ Prandtl number

Ra คือ Rayleigh number

L คือ ความยาวคุณลักษณะ (characteristic length)

ν คือ kinematic viscosity ของอากาศ

k คือ thermal conductivity ของอากาศ

α คือ thermal diffusivity ของอากาศ

สมบัติกายภาพทางความร้อน (thermophysical properties) ของอากาศจะขึ้นกับอุณหภูมิ T ซึ่งเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ต่อไปนี้ได้^[4]

$$\nu = 10^{-9} \cdot T^{1.6994} \frac{m^2}{s} \quad (4.83)$$

$$k = 3.231 \times 10^{-4} T^{0.7744} \frac{W}{m \cdot K} \quad (4.84)$$

$$\alpha = (8 \times 10^{-5} T^2 + 0.1011T - 14.817) \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad (4.85)$$

ปริมาณความร้อนจากการนำ Q_{cond} คือ

$$Q_{cond} = A_i U (T_1 - T_4) \quad (4.86)$$

และ

$$U = \frac{1}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_F/r_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_I/r_1} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_S/r_1}} \quad (4.87)$$

จากสมมูลของพลังงาน จะได้

$$Q_s = Q_{cond} \quad (4.88)$$

แทนค่าตัวแปรที่ทราบค่าแล้ว ซึ่งประกอบด้วย

มิติของเตาความร้อน

ความสูง $H = 250$ มม.

รัศมีในของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป $r_1 = 50$ มม.

รัศมีในของฉนวน $r_2 = 125$ มม.

รัศมีในของเปลือกเตา $r_3 = 160$ มม.

รัศมีนอกของเปลือกเตา $r_4 = 163$ มม.

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน $k_F = 0.170 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (ประมาณที่ 900 K)

$k_I = 0.105 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (ประมาณที่ 645 K)^[11]

$k_S = 15.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (ประมาณที่ 400 K)

จากสมการที่ (4.79) ถึง (4.88) จะได้อุณหภูมิที่ผิวนอกของเตาคือ

$$T_s = 118.85 \text{ }^\circ\text{C} \quad (4.89)$$

นอกจากนี้จะคำนวณอุณหภูมิที่จุดต่อตำแหน่งต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$T_2 = 386.6 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{หรือ} \quad 659.6 \text{ K}$$

$$T_3 = 119 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{หรือ} \quad 392 \text{ K}$$

จะเห็นว่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการหาสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ ดังนั้นจึงไม่ต้องคำนวณซ้ำ

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบอุณหภูมิที่ผิวนอกของเตาจากการคำนวณกับค่าที่ยอมรับ

ในที่นี้กำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวนอกของเตาที่ยอมรับคือ มีค่าน้อยกว่า 150 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าอุณหภูมิที่ผิวที่คำนวณได้ (4.89) ดังนั้นมิติของฉนวน และเปลือกเตาที่กำหนดจึงยอมรับได้

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณปริมาณความร้อนสูญเสียจากเตา :

ในที่นี้พิจารณาโหมดของการสูญเสียความร้อนของเตาความร้อน ดังต่อไปนี้

- 1) การสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านข้างเตา Q_1
- 2) การสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านบนของเตา Q_2
- 3) การสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านล่างของเตา Q_3
- 4) การสูญเสียความร้อนผ่านก้านตั้งชิ้นงานที่นอนบน และที่นอนล่าง Q_4

รายละเอียดจะแสดงในหัวข้อย่อยต่อไปนี้

- 1) การสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านข้างของเตา

แทนสมการที่ (4.89) ลงในสมการที่ (4.79) จะได้

$$Q_1 = 179 \text{ วัตต์} \quad (4.84)$$

- 2) การสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านบนของเตา

พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (รูปที่ 4.15) คือพื้นที่รูปวงแหวน A_u ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

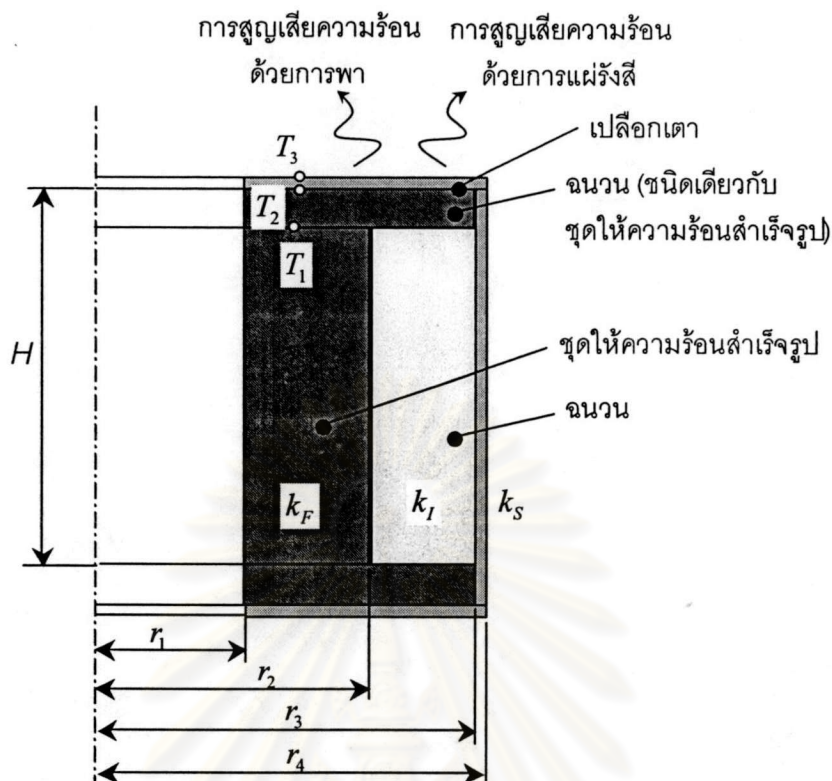
$$A_u = \frac{\pi}{4} (r_4^2 - r_1^2) = 0.075 \text{ ตารางเมตร} \quad (4.85)$$

ในกรณีนี้ ความยาวคุณลักษณะ L คือ

$$L = A_u / P$$

โดย P คือ เส้นรอบวง (ซึ่งเท่ากับ $2\pi r_4$)

ดังนั้น $L = 0.074$ เมตร



รูปที่ 4.15 ภาพตัดด้านข้างของเตาความร้อน เพื่อแสดงการสูญเสียความร้อน ที่ผิวด้านบนของเตาความร้อน

เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวในของผนังด้านบน T_1 จะมีค่าแปรเปลี่ยนตามระยะในแนวรัศมี ทำให้การคำนวณความร้อนสูญเสียยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นจึงกำหนดให้ผิวด้านในของผนังด้านบน (และด้านล่าง) มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ เท่ากับ $T_1 = 1000^\circ\text{C}$ (กรณีที่รุนแรงที่สุด)

การสูญเสียกำลังความร้อนเนื่องจากการนำ

$$Q_{cond} = A_u U (T_1 - T_3) \quad (4.86)$$

และ

$$U = \frac{1}{\frac{t_F}{k_F} + \frac{t_S}{k_S}} \quad (4.87)$$

โดย t_F คือ ความหนาของแผ่นปิด (ในที่นี้เลือก 25 มม.)

t_S คือ ความหนาของเปลือกเตา (ในที่นี้เลือก 3 มม.)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นปิด k_F และของเปลือกสแตนเลส k_S

$$k_F = 0.170 \text{ W/m}\cdot\text{K} \quad (\text{ประมาณที่ } 900 \text{ K})$$

$$k_S = 15.2 \text{ W/m}\cdot\text{K} \quad (\text{ประมาณที่ } 400 \text{ K})$$

กำลังความร้อนสูญเสียที่ผิว Q_s คือ

$$Q_s = hA_o(T_3 - T_\infty) + \varepsilon\sigma A_o [T_3^4 - T_\infty^4] \quad (4.88)$$

สำหรับแผ่นแบนวางในแนวระดับ และมีการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาแบบอิสระ ตัวเลข Nusselt Nu คือ ^[4]

$$Nu = \begin{cases} 0.54Ra^{1/4} & 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \\ 0.15Ra^{1/3} & 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \end{cases} \quad (4.89)$$

จากเงื่อนไขสมมูลของพลังงาน และสมการที่ (4.86) และ (4.88) จะได้ปริมาณความร้อนสูญเสีย คือ

$$Q_2 = 137 \text{ วัตต์} \quad (4.90)$$

3) การสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านล่างของเตา

กรณีนี้เหมือนกับกรณีการสูญเสียความร้อนผ่านผนังด้านบน แต่ Nusselt number จะเปลี่ยนเป็น

$$Nu = 0.27Ra^{1/4}$$

เมื่อแก้สมการสมมูลของพลังงานจะได้กำลังความร้อนสูญเสีย คือ

$$Q_3 = 130 \text{ วัตต์} \quad (4.91)$$

4) การสูญเสียความร้อนผ่านก้านตั้งชิ้นงานที่นอนบนและที่นอนล่าง

กรณีนี้จำลองก้านตั้งชิ้นงานที่ยื่นออกมาภายนอกเตาว่าเป็นครีบกลมที่ยื่นออกจากเตา และมีความยาวมาก (รูปที่ 4.16) ปริมาณความร้อนที่สูญเสีย สามารถหาได้จาก ^[4]

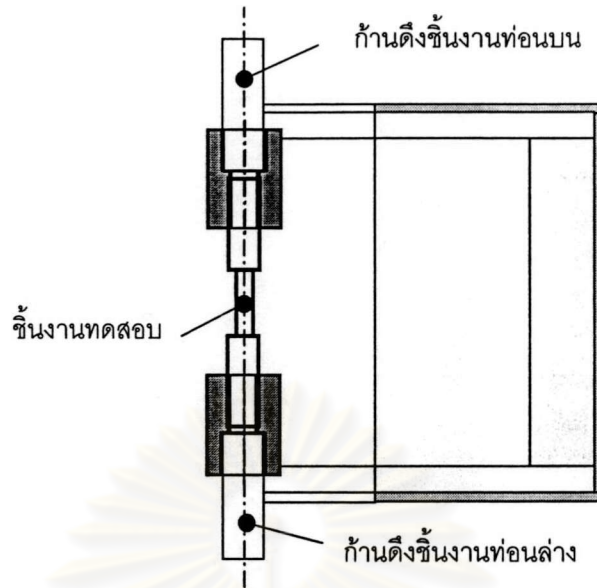
$$Q_4(x) = \sqrt{hPk_r A_r} (T_b - T_\infty) \tanh\left(\sqrt{\frac{hP}{k_r A_r}} x\right) \quad (4.92)$$

โดย P คือ เส้นรอบวงของก้านตั้งชิ้นงาน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านตั้งชิ้นงาน เท่ากับ 25 มม.)

k_r คือ สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อน มีค่าเท่ากับ 15.2 W/m².K

A_r คือ พื้นที่หน้าตัดของก้านตั้งชิ้นงาน

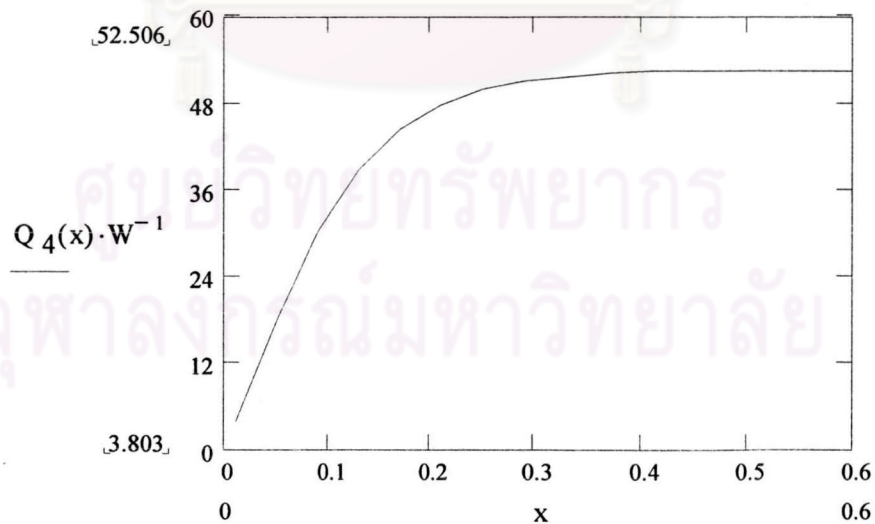
x คือ ความยาวของก้านตั้งชิ้นงาน



รูปที่ 4.16 การสูญเสียความร้อนผ่านก้านดึงชั้นงาน

เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวของก้านดึงชั้นงานลดลงเมื่อห่างจากเตามากขึ้น ทำให้การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน h ซับซ้อน ดังนั้นจึงสมมติให้ h เป็นค่าคงที่เท่ากับ $5 \text{ W/m}^2\text{K}^3$

จากการคำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสีย (รูปที่ 4.17) พบว่าเมื่อก้านดึงชั้นงานมีความยาวตั้งแต่ 50 ซม. ขึ้นไปปริมาณความร้อนสูญเสียมีค่าค่อนข้างคงที่ (เพราะอุณหภูมิที่ผิวเข้าใกล้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม) ดังนั้นการออกแบบจะใช้ก้านดึงชั้นงานที่มีความยาว 50 ซม. ขึ้นไป



รูปที่ 4.17 ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านก้านดึงชั้นงาน

³ สำหรับการพาอิสระ ค่า h จะอยู่ในช่วง $2 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ^[5]

แทนค่าตัวแปรที่ทราบแล้วลงสมการที่ (4.92) จะได้ปริมาณความร้อนสูญเสียสูงสุดผ่าน ก้านดึงชิ้นงาน เท่ากับ 52.5 วัตต์ ถ้าประมาณว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียเท่ากันทั้งก้านดึง ชิ้นงานท่อนบน และล่างเพราะมีรูปร่างเหมือนกัน และอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน แล้ว

$$Q_4 = 2 \times 52.5 = 105 \text{ วัตต์} \quad (4.93)$$

กำลังความร้อนสูญเสียจากเตา Q_{Loss} คือ

$$Q_{Loss} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

แทนผลลัพธ์ (4.84), (4.90), (4.91) และ (4.93) ลงในสมการข้างต้นจะได้

$$Q_{Loss} = 551 \text{ วัตต์} \quad (4.94)$$

ผลลัพธ์ (4.94) คือ กำลังความร้อนสูญเสียจากเตาความร้อนในสถานะคงตัว (steady state)

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณกำลังที่ต้องการของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป:

ในขั้นตอนนี้จะปรับแก้กำลังความร้อนที่คำนวณในขั้นตอนที่แล้ว โดยคิดผลของอัตราการ เพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งจะได้กำลังความร้อนที่ต้องการ P คือ ^[11]

$$P = \left(\frac{Q_{Abs}}{t_s} + \frac{2}{3} Q_{Loss} \right) \frac{SF}{\eta} \quad (4.95)$$

โดย Q_{Abs} คือ ปริมาณความร้อนที่วัสดุเก็บสะสมตั้งแต่เริ่มต้น

t_s คือ ช่วงเวลาทำอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ

Q_{Loss} คือ กำลังความร้อนที่สูญเสีย (ในสถานะคงตัว) ณ อุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ

SF คือ ตัวประกอบความปลอดภัย สำหรับระบบขนาดเล็กมีคำแนะนำให้เผื่อไว้ 10 เปอร์เซ็นต์ (หรือ $SF = 1.1$) ^[11]

η คือ ประสิทธิภาพของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป (จากแคตตาล็อกผลิตภัณฑ์ ^[15] แนะนำค่า 70 เปอร์เซ็นต์)

ถัดไปจะกล่าวถึงการคำนวณค่าตัวแปรแต่ละตัว (ที่ยังไม่ทราบค่า) ในสมการที่ 4.95 ปริมาณความร้อนที่วัตถุมวล m เก็บสะสม แทนด้วยสัญลักษณ์ Q สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = mC_p(T_f - T_i) \quad (4.96)$$

หรือ

$$Q = \rho VC_p(T_f - T_i) \quad (4.97)$$

โดย C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะวัสดุ

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

V คือ ปริมาตรของวัตถุ

T_i คือ อุณหภูมิ เริ่มต้น ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 30°C ทั้งหมด

T_f คือ อุณหภูมิสิ้นสุดของวัตถุ ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของวัตถุ

1) ความร้อนที่ชุดให้ความร้อน และฉนวนด้านบน-ล่างเก็บสะสม Q_{Abs1}

อุณหภูมิสิ้นสุด $T_f = 0.5(1000+386.6)$ (จากหัวข้อที่ 4.4.2 ขั้นตอนที่3)
 $= 693.3^\circ\text{C}$

ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho = 200\text{ kg/m}^3$

ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 900\text{ J/kg-K}$

มวลของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูป (2 ซีก) $m = 2.4\text{ kg}$. (จากแคตตาล็อกสินค้า)

ปริมาตรของแผ่นปิดบน-ล่าง $V = 2\pi(r_3^2 - r_1^2)t = 0.00369\text{ m}^3$ ($t = 1$ นิ้ว)

ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสม คือ

$$Q_{Abs1} = mC_p(T_f - T_i) + \rho VC_p(T_f - T_i)$$

$$Q_{Abs1} = 1873.1\text{ kJ} \quad (4.98)$$

2) ความร้อนที่ฉนวนความร้อนด้านข้างเก็บสะสม

อุณหภูมิสิ้นสุด $T_f = 0.5(386.6+119)$ (จากหัวข้อที่ 4.4.2 ขั้นตอนที่3)
 $= 252.8^\circ\text{C}$

ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho = 48\text{ kg/m}^3$

ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 0.037\text{ J/kg-K}$

ปริมาตรของฉนวน $V = \pi(r_3^2 - r_2^2)H = 0.00784\text{ m}^3$

ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสม คือ

$$Q_{Abs2} = \rho VC_p(T_f - T_i)$$

$$Q_{Abs2} = 3.098\text{ J} \quad (4.99)$$

3) ความร้อนที่เปลือกเตาเก็บสะสม

อุณหภูมิสิ้นสุด $T_f = 0.5(119+118.85)$ (จากหัวข้อที่ 4.4.2 ขั้นตอนที่ 3)

$$= 118.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho = 8238 \text{ kg/m}^3$

ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 504 \text{ J/kg-K}$

ปริมาตรของเปลือกเตาด้านข้าง $V_1 = \pi(r_4^2 - r_3^2)H = 0.00063 \text{ m}^3$

ปริมาตรของเปลือกเตาด้านบน-ล่าง $V_2 = 2\pi(r_1^2 - r_4^2)t = 0.00023 \text{ m}^3$ ($t = 3 \text{ มม.}$)

ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสม คือ

$$Q_{Abs3} = \rho(V_1 + V_2)C_p(T_f - T_i)$$

$$Q_{Abs3} = 399.4 \text{ kJ} \quad (4.100)$$

4) ความร้อนที่ก่อกำเนิดขึ้นงาน ตัวจับยึดขึ้นงาน และขึ้นงานทดสอบ เก็บสะสม

เพื่อให้การคำนวณง่ายขึ้น จะแทนระบบนี้ด้วยทรงกระบอกกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับก่อกำเนิดขึ้นงานทดสอบ (25 มม.)

อุณหภูมิสิ้นสุด $T_f = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$

ความหนาแน่นของวัสดุ $\rho = 8238 \text{ kg/m}^3$

ความจุความร้อนจำเพาะ $C_p = 504 \text{ J/kg-K}$

ปริมาตรของระบบนี้ $V = \frac{\pi}{4}d_{r-n}^2H = 0.00013 \text{ m}^3$

ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสม คือ

$$Q_{Abs4} = 510.38 \text{ kJ} \quad (4.101)$$

ปริมาณความร้อนที่เตาความร้อนเก็บสะสม

$$\begin{aligned} Q_{Abs} &= Q_{Abs1} + Q_{Abs2} + Q_{Abs3} + Q_{Abs4} \\ &= 2782 \text{ kJ} \end{aligned} \quad (4.102)$$

แทนสมการที่ (4.94) และสมการที่ (4.102) ลงในสมการที่ (4.95) จะได้ กำลังความร้อนที่ชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปต้องการ เมื่อกำหนดช่วงเวลาตั้งแต่ต้น 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาในการทำอุณหภูมิให้ถึงค่าที่ต้องการ และกำลังความร้อนที่ต้องการ

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	กำลังความร้อนที่ต้องการ (วัตต์)
1	1792
2	1184
3	982
4	881

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบกำลังของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่เลือก

จากหัวข้อที่ 4.4.1 ขั้นตอนที่ 4 กำลังของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่เลือกคือ 1300 วัตต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังความร้อนที่ต้องการในตารางที่ 4.2 จะพบว่าชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปสามารถสร้างอุณหภูมิถึง 1000 องศาได้ในเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง ซึ่งถือว่าเป็นอัตราที่สูงกว่าความต้องการทั่วไป (4-6 ชั่วโมง) ดังนั้น จึงสรุปว่ารุ่นของชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปที่เลือกนั้นเหมาะสม

4.5 ผลการออกแบบโครงของเครื่องทดสอบ

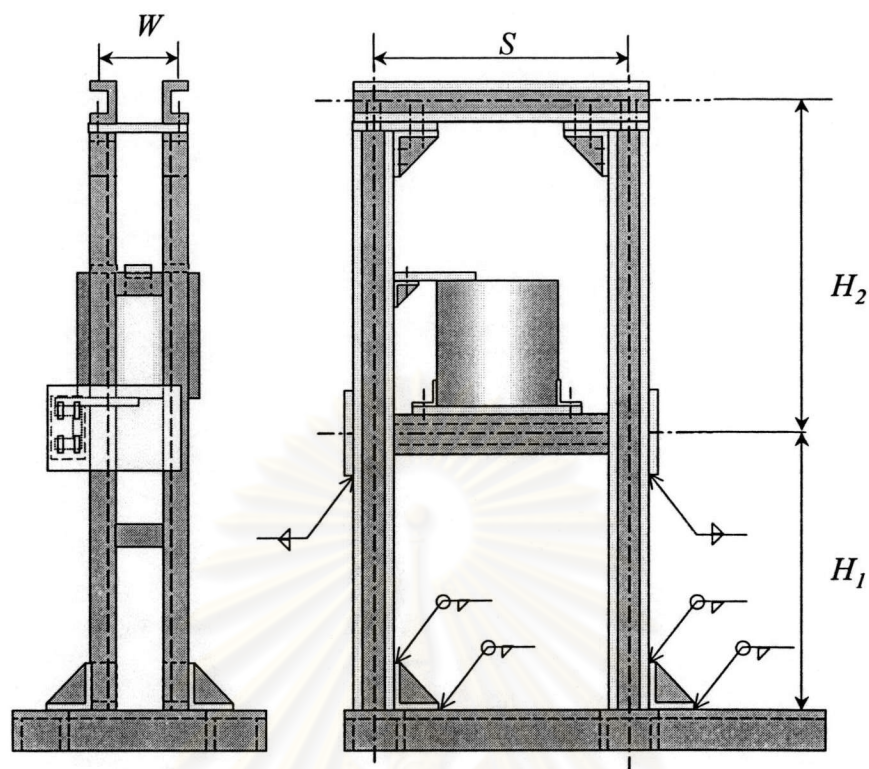
ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบรูปร่างของโครงเครื่องทดสอบ :

โครงสร้างของเครื่องทดสอบกำหนดว่าจะสร้างจากเหล็กทรงยู เพราะหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก และนำมาทำเป็นโครงสร้างได้สะดวก รูปที่ 4.18 แสดงลักษณะของโครงสร้างคร่าว ๆ ที่ออกแบบ เครื่องทดสอบประกอบด้วยฐาน เสา 4 ต้น คานบน และคานกลาง บริเวณจุดต่อต่าง ๆ จะเสริมจากมีคียบเสริมความแข็งแรงของจุดต่อ คานกลางยึดกับเสาคู่หลังของเครื่องทดสอบซึ่งเชื่อมแผ่นเหล็กเซาะร่องไว้เพื่อให้สามารถปรับระดับของคานกลางได้

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหน้ากว้างของโครงเครื่องทดสอบ S :

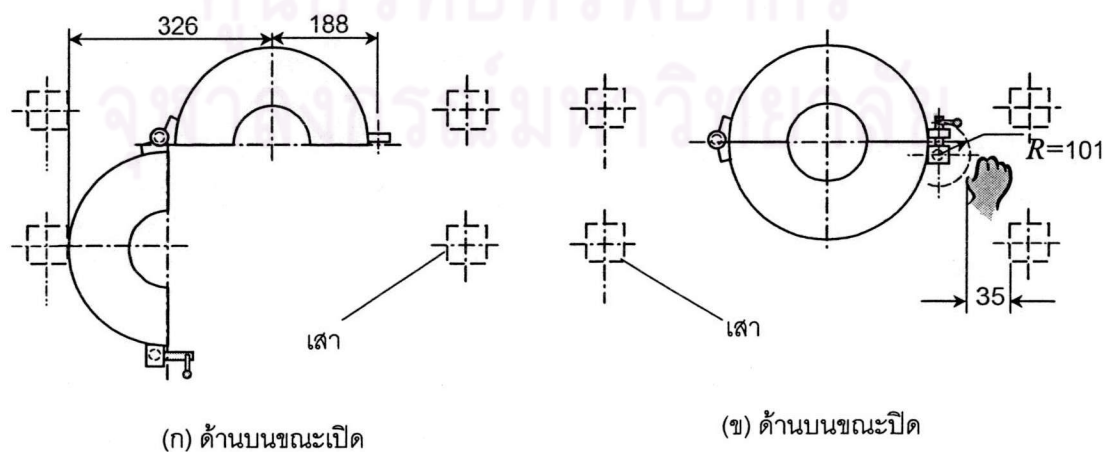
ความกว้างของเครื่องทดสอบ (span) คือ ระยะวัดจากกึ่งกลางเสาด้านหนึ่ง ไปยังกึ่งกลางเสาดีกด้านหนึ่ง ช่องว่างระหว่างเสาทั้งสอง กำหนดจากการพิจารณาต่อไปนี้

- ระยะห่างจากกึ่งกลางเตาถึงเสาดันซ้ายมือจะต้องเพียงพอสำหรับการเปิดเตาไว้ 90 องศา (รูปที่ 4.19ก) จากหัวข้อที่ 4.4 ทราบว่ารัศมีนอกของเตาคือ 163 มม. ดังนั้นระยะห่างจะเป็นสองเท่าของรัศมี ซึ่งเท่ากับ 326 มม.



รูปที่ 4.18 แสดงแบบร่างโครงของเครื่องทดสอบ

- ระยะห่างจากกึ่งกลางเตาถึงเสาดันขวามือจะต้องเพียงพอสำหรับให้มือสอดเข้าไปปลดตัวขั้วล๊อคได้ (รูปที่ 4.19ข) ซึ่งตัวขั้วล๊อคเองก็สามารถหมุนรอบจุดหมุนได้ (รูปที่ 4.12) ในที่นี้กำหนดระยะสำหรับสอดมือ 35 มม. ความยาวของตัวขั้วล๊อค คือ 101 มม. และระยะจากจุดหมุนของก้านล๊อคถึงกึ่งกลางเตาคือ 188 มม. ดังระยะห่างจากเสาดันขวามือ คือ $188+101+35 = 324$ มม.



รูปที่ 4.19 ภาพด้านบนของเปลือกเตาสำหรับประกอบการหาเนื้อที่ใช้สอยด้านกว้าง

ดังนั้นช่องว่างระหว่างเสามีขนาดเท่ากับ $326+324 = 650$ มม. ถ้าสมมุติเสาเป็นเหล็กทรงยู ขนาด 75×37.5 มม. แล้วจะได้ความกว้างของเครื่องทดสอบ S (รูปที่ 4.18) คือ

$$S = 650 + (75/2) + (75/2) = 725 \text{ มม.} \quad (4.103)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณความลึกของโครงเครื่องทดสอบ W :

ความลึกของเครื่องทดสอบ ในที่นี้หมายถึงระยะจากกึ่งกลางเสาด้านหน้าเครื่องทดสอบ ถึงกึ่งกลางเสาด้านหลังเครื่องทดสอบ สิ่งที่สำคัญในการพิจารณา คือ ช่องว่างระหว่างเสาทั้งสองต้น W จะต้องเพียงพอสำหรับติดตั้งคานทอดแรง (รูปที่ 4.20)

จากรูปที่ 4.20 ช่องว่างระหว่างคานทอดแรง w_L จะเท่ากับผลบวกของความกว้างของตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) w' และเคลือบแรนซ์ระหว่างตัวจับยึดกับช่องว่างระหว่างคานทอดแรง $2C_1$ ดังนั้น

$$w_L = w' + 2C_1$$

แทนผลลัพธ์ (4.45) และกำหนด C_1 เท่ากับ 2 มม. จะได้

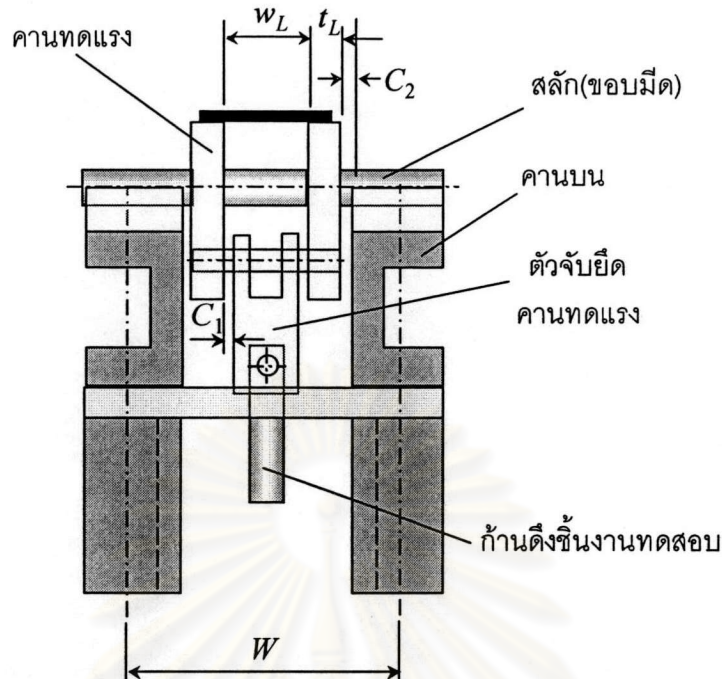
$$w_L = 32 + 4 = 36 \text{ มม.} \quad (4.104)$$

กำหนดความหนาของแผ่นข้างของคานทอดแรง t_L ดังนี้

$$t_L = 9 \quad (4.105)$$

ดังนั้น ความกว้างของคานทอดแรง (จากขอบนอกถึงขอบนอก) คือ $w_L + 2t_L = 52$ มม. ถ้ากำหนดระยะเผื่อ C_2 เท่ากับ 2 มม. แล้วจะได้ว่า ความกว้างของช่องที่เว้นไว้เพื่อติดตั้งคานทอดแรง คือ $w_L + 2t_L + 2C_2 = 58$ มม. ถ้าเสาที่ใช้มีขนาดหน้าตัด 75×37.5 มม. ความลึกของเครื่องทดสอบ W คือ

$$W = w_L + 2t_L + 2C_2 + 2\left(\frac{37.5}{2}\right) = 95.5 \text{ มม.} \quad (4.106)$$



รูปที่ 4.20 ภาพวิซ้างของเครื่องทดสอบ แสดงตำแหน่งของคานทดสอบ เพื่อประกอบการหาความลึกของเครื่องทดสอบ

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณความสูงของโครงเครื่องทดสอบ W :

ความสูงของเครื่องทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ จากขอบบนของฐานถึงกึ่งกลางของคานกลาง H_1 และจากกึ่งกลางของคานกลางถึงกึ่งกลางของคานบน H_2 รูปที่ (4.18)

จากผลการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนโดยการนำผ่านก้านตั้งขึ้นงาน (หัวข้อที่ 4.4.2) เลือกก้านตั้งขึ้นงานยาว 600 มม. จากรูปที่ (4.10) และผลลัพธ์ (4.60), (4.62), (4.67), (4.69), (4.70), (4.75) และ (4.77) จะได้ความสูงของอุปกรณ์ปรับระยะรวมกับตัวจับยึด ประมาณ 300 มม. ดังนั้น $H_2 = 900$ มม.

ระยะ H_1 ควรจะมากกว่าความสูงของเตา และเนื้อที่ว่างจะต้องเพียงพอสำหรับ ตัวจับยึดและก้านตั้งขึ้นงาน ในกรณีนี้ ความสูงของเตาที่ออกแบบคือ 306 มม. และความยาวก้านตั้งรวมกันกับตัวจับยึด ประมาณ 550 มม. จะได้ H_1 ประมาณ 850 มม. ดังนั้น ความสูงรวมของเครื่องทดสอบ H คือ

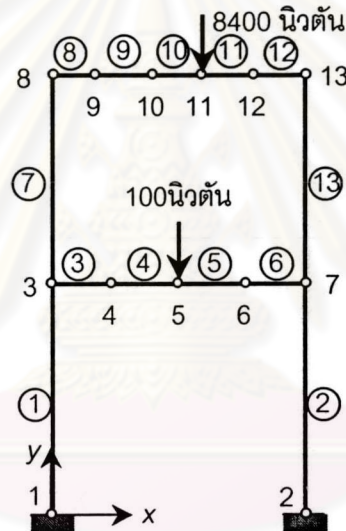
$$H = H_1 + H_2 = 850 + 900 \text{ มม.}$$

$$H = 1750 \text{ มม.} \quad (4.107)$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนของโครงเครื่องทดสอบ :

ในขั้นตอนที่ผ่านมา เราได้กำหนดขนาดหน้าตัดรูปตัวยูของโครงเครื่องทดสอบ เท่ากับ 75×37.5 มม. (3"x1.5") เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ระยะแอ่นตัวได้ ในขั้นตอนนี้จะวิเคราะห์ระยะแอ่นตัว ณ ตำแหน่งที่รองรับคานทอดแรง ระยะแอ่นตัวที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับ ถ้ามากกว่าค่าที่ยอมรับก็จะเพิ่มขนาดหน้าตัด แต่ถ้าไม่เกินก็จะยอมรับขนาดหน้าตัดนั้น

วิธีคำนวณระยะแอ่นตัวของคาน คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงเครื่องทดสอบ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.21 ประกอบด้วย 13 จุดต่อ (node) และ 13 เอลิเมนต์ (element) รายละเอียดโคออร์ดิเนตของจุดต่อ พื้นที่หน้าตัดและโมเมนต์ความเฉื่อยของแต่ละเอลิเมนต์ แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3



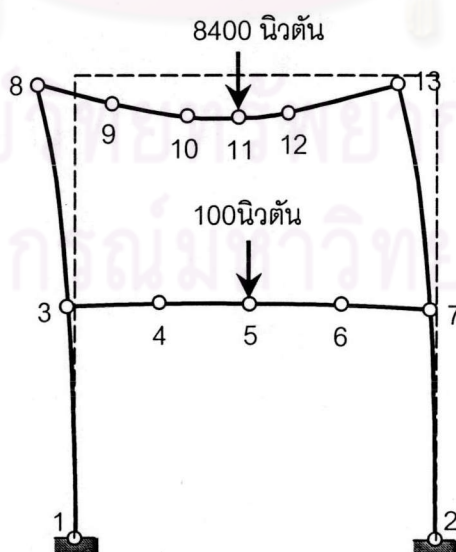
รูปที่ 4.21 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงเครื่องทดสอบ

ระยะแอ่นตัวในแนวตั้งที่จุดรองรับคานทอดแรง (จุดต่อหมายเลข 11) เท่ากับ 0.167 มม. หรือคิดเป็นระยะแอ่นตัวต่อหน่วยความยาวของคานได้เท่ากับ $0.16/720$ มม./มม. = 2.32×10^{-4} มม./มม.

สำหรับการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรที่มีความแม่นยำปานกลาง (moderate perdision) ระยะแอ่นตัวต่อหน่วยความยาวของคานควรอยู่ในช่วง $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$ นิ้ว/นิ้ว^[21] ดังนั้น ขนาดหน้าตัดที่ใช้จึงมีความเหมาะสม

ตารางที่ 4.3 พิกัดของจุดต่อ และสมบัติของหน้าตัดของเอลิเมนต์ต่าง ๆ

จุดต่อ	พิกัด		เอลิเมนต์	จุดต่อ		พื้นที่หน้าตัด (m^2)	โมเมนต์ความ เฉื่อย (m^4)
	x (m)	y (m)					
1	0.00	0.00	1	1	3	8.82×10^{-4}	7.53×10^{-7}
2	0.72	0.00	2	2	7	8.82×10^{-4}	7.53×10^{-7}
3	0.00	0.90	3	3	4	8.82×10^{-4}	7.53×10^{-7}
4	0.18	0.90	4	4	5	8.82×10^{-4}	7.53×10^{-7}
5	0.36	0.90	5	5	6	8.82×10^{-4}	7.53×10^{-7}
6	0.54	0.90	6	6	7	8.82×10^{-4}	7.53×10^{-7}
7	0.72	0.90	7	3	8	8.82×10^{-4}	7.53×10^{-7}
8	0.00	1.75	8	8	9	1.64×10^{-3}	1.50×10^{-6}
9	0.15	1.75	9	9	10	1.64×10^{-3}	1.50×10^{-6}
10	0.30	1.75	10	10	11	1.64×10^{-3}	1.50×10^{-6}
11	0.40	1.75	11	11	12	1.64×10^{-3}	1.50×10^{-6}
12	0.50	1.75	12	12	13	1.64×10^{-3}	1.50×10^{-6}
13	0.72	1.75	13	7	13	1.64×10^{-3}	1.50×10^{-6}



รูปที่ 4.22 ลักษณะการเสียรูปของโครงสร้าง

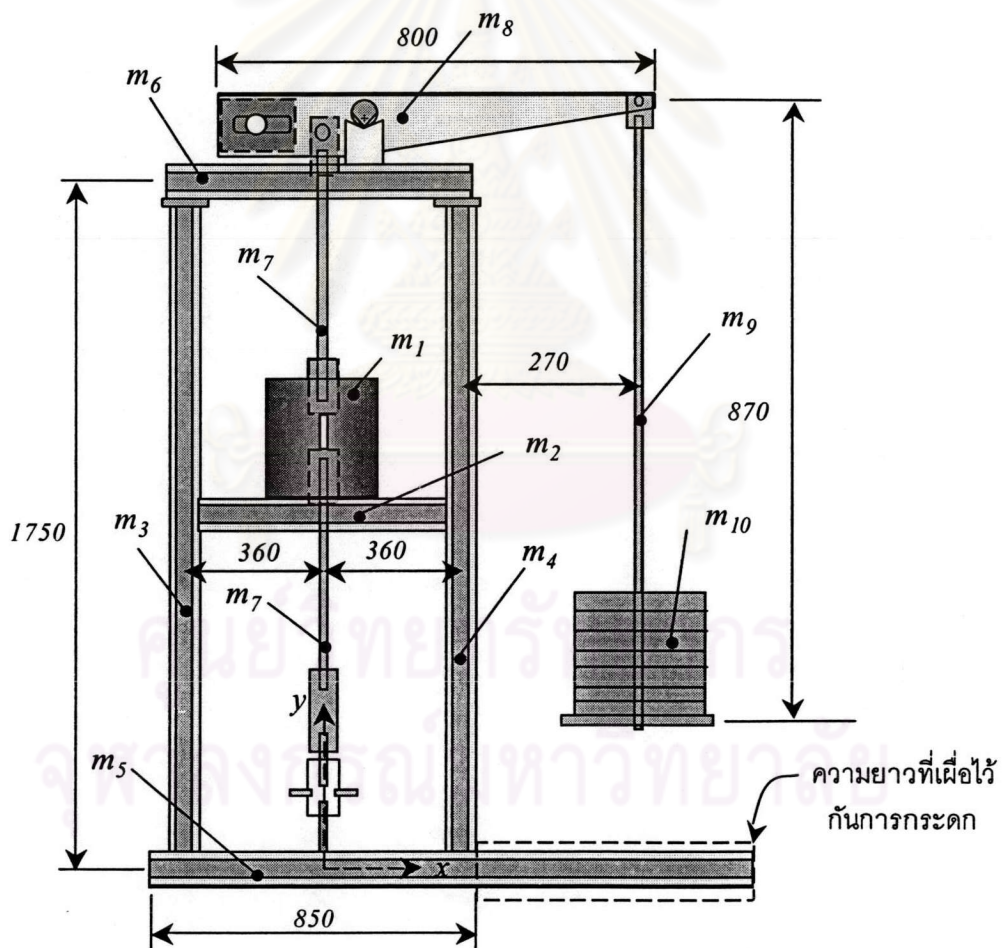
ขั้นตอนที่ 6 คำนวณตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของเครื่องทดสอบ :

จากรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักและความยาวของชิ้นส่วนต่างๆเพื่อหาจุดศูนย์กลางถ่วงของเครื่องทดสอบ ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{12} m_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{12} m_i} \quad (4.108)$$

โดย m_i คือ น้ำหนักของโครงสร้าง ชั้นที่ i

\bar{x}_i คือ จุดศูนย์กลางถ่วงของโครงสร้าง ชั้นที่ i



รูปที่ 4.23 แสดงน้ำหนักของส่วนต่างๆ เพื่อหาจุดศูนย์กลางถ่วงของโครงสร้าง

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดของชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อหาจุดศูนย์ถ่วง

ชิ้นส่วนลำดับที่	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	ความยาว (m)	น้ำหนัก m_i (kg)	จุดศูนย์ถ่วง \bar{x}_i ⁿ (m)
1	0.082000	0.306	10.00	0.00
2	0.000882	0.720	4.98	0.00
3	0.001764	1.750	12.11	-0.36
4	0.001764	1.750	12.11	0.36
5	0.002384	1.420	13.29	0.00
6	0.000707	1.420	9.83	0.00
7	0.000176	2.000	12.37	0.00
8	0.000750	1.500	4.92	0.75
9	0.000028	9.400	2.33	1.47
10	0.071000	0.350	40.00	1.47

ⁿ กำหนดจุดกำเนิดอยู่ที่กึ่งกลางฐาน

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ (4.108) จะได้

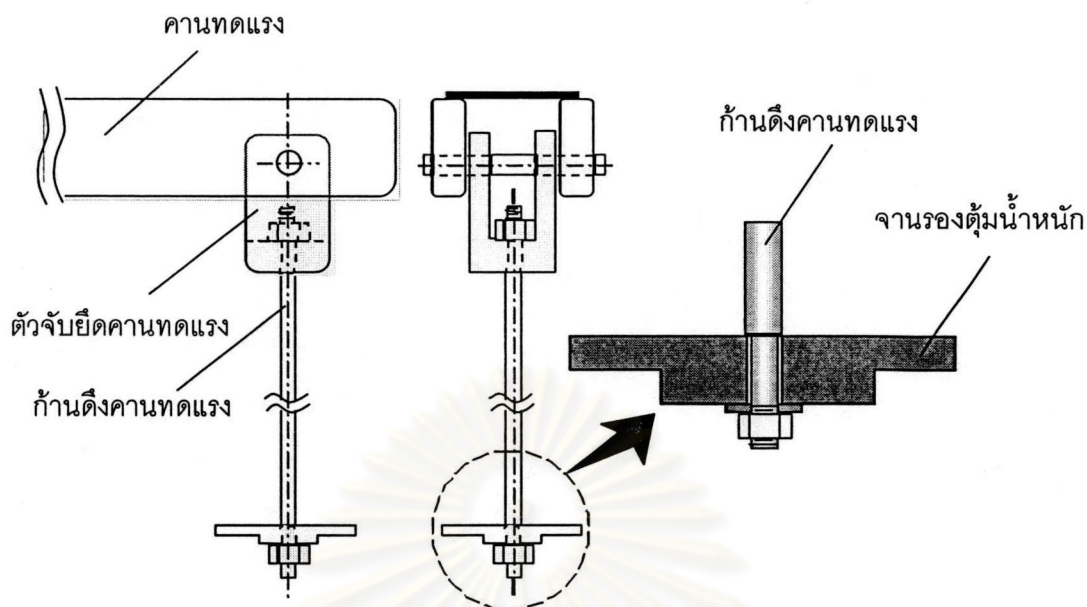
$$\bar{x} = 0.54 \text{ เมตร} \quad (4.109)$$

เนื่องจากจุดศูนย์ถ่วงอยู่ด้านขวามือของเสาด้านขวา ดังนั้นจึงเพิ่มความยาวของฐานไปทางด้านขวามือให้มากขึ้น ในที่นี้กำหนดว่าจะเพิ่มความยาวให้เลยตุ่มน้ำหนักไปเล็กน้อย ดังแสดงให้เห็นเป็นเส้นประในรูปที่ 4.23 ในที่นี้กำหนดความยาวที่เพิ่มขึ้น คือ 500 มม.

4.6 ผลการออกแบบก้านดึงคานทอดแรงและตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหน้า)

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบวิธีจับยึดระหว่างก้านดึงคานทอดแรง (ส่วนหน้า) กับคานทอดแรง :

ที่ระหว่างก้านดึงคานทอดแรงกับคานทอดแรงจะมีตัวจับยึดซึ่ง ระหว่างก้านดึงคานทอดแรงกับตัวจับยึดนี้จะใช้การล๊อคด้วยเกลียว และระหว่างคานทอดแรงกับตัวจับยึดจะใช้สลัก (รูปที่ 4.24)



รูปที่ 4.24 การจับยึดระหว่างก้านดิ่งคานาทดแรงกับคานาทดแรงและจานรองตุ้มน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบวิธีจับยึดระหว่างก้านดิ่งคานาทดแรงกับจานรองตุ้มน้ำหนัก :

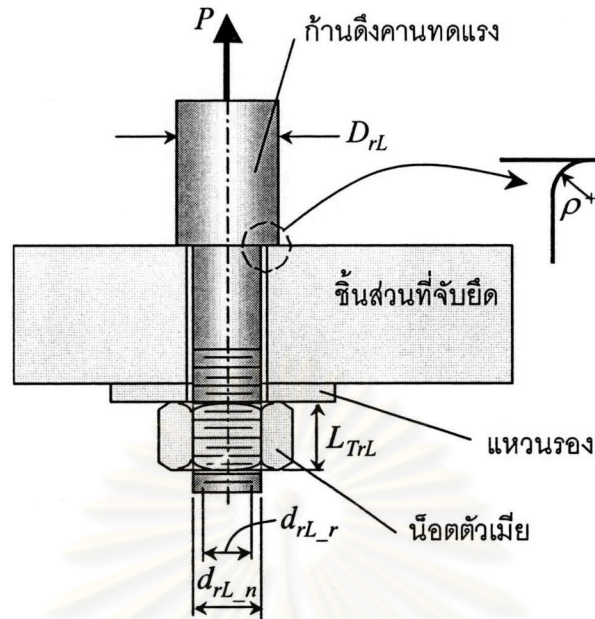
ในที่นี้ออกแบบจานรองตุ้มน้ำหนักเป็นรูปแผ่นแบนกลม การจับยึดระหว่างจานรองกับก้านดิ่งคานาทดแรงจะใช้วิธีล็อกด้วยเกลียว โดยที่จานรองจะมีรูตรงกลางให้ปลายของก้านดิ่งคานาทดแรงสอดผ่าน โดยปลายที่โผล่ออกมาจะทำเกลียวไว้เพื่อให้ขันเกลียวอัดแน่นได้ (รูปที่ 4.24)

ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบตัวจับยึดระหว่างก้านดิ่งคานาทดแรงกับคานาทดแรง:

ขนาดหน้าตัดของก้านดิ่งคานาทดแรงที่เหมาะสมคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายที่จุดจับยึด ระหว่างก้านดิ่งคานาทดแรงกับตัวจับยึดคานาทดแรง และระหว่างก้านดิ่งคานาทดแรงกับจานรองตุ้มน้ำหนัก ดังนั้นจะแยกการคำนวณออกเป็นสองส่วนอิสระกันโดยผลการคำนวณใดที่ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าจะเป็นคำตอบที่ต้องการ

1) การจับยึดระหว่างก้านดิ่งคานาทดแรงกับจานรองตุ้มน้ำหนัก

กำหนด D_{rL_n} แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดิ่งคานาทดแรง ปลายด้านที่ยึดกับจานรองตุ้มน้ำหนักจะลดขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ d_{rL_n} เพื่อสอดผ่านรูเจาะบนจานรอง โดยจะมีเกลียวที่ปลายเพื่อให้ขันอัดด้วยเกลียวได้ (รูปที่ 4.25)



รูปที่ 4.25 การจับยึดระหว่างก้านดึงคานทอดแรงกับจานรองตึมน้ำหนัก

1.1) เลือกวัสดุ

เลือกวัสดุที่ทำก้านดึงชิ้นงานทดสอบคือ เหล็กกล้าสเตนเลส 310S ดังนั้น ความต้านแรงดึงครากที่อุณหภูมิห้อง $\sigma_y = 290 \text{ MPa}$ และความต้านแรงเฉือนครากที่อุณหภูมิห้อง $\tau_y \approx 0.5\sigma_y = 145 \text{ MPa}$

1.2) การออกแบบภายใต้โหมดความเสียหายต่าง ๆ

เนื่องจากก้านดึงคานทอดแรงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงที่ปลาย ทำให้บริเวณนี้เป็นบริเวณที่วิกฤติ โหมดความเสียหายที่เป็นไปได้ประกอบด้วย

- ปลายก้านดึงที่รากลึยวขาดเนื่องจากความเค้นดึง
- ปลายก้านดึงที่บ่ขาดเนื่องจากความเค้นดึง
- กลึยวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง
- กลึยวครากเนื่องจากความเค้นอัด

1.2.1) ปลายก้านดึงที่รากลึยวขาดเนื่องจากความเค้นดึง

พื้นที่ ที่รับความเค้นดึงในกรณีนี้คือ พื้นที่วงกลมของฐานกลึยว ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$A = \frac{\pi}{4} d_{rL_r}^2$$

โดย d_{rL_r} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรากที่ปลายก้านดึงคานทอดแรง

กำหนดภาระที่กระทำต่อก้านดึงคานทอดแรง (ภาระออกแบบ) P_w เท่ากับ

$$P_w = 400 \text{ นิวตัน} \quad (4.110)$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_w}{A} = \frac{\sigma_y}{SF}$$

ในที่นี้เลือกใช้ตัวประกอบความปลอดภัย SF เท่ากับ 4 เพื่อสำหรับกรณีเกิดความเสียหายตรงบริเวณป่าซึ่งมีความเค้นหนาแน่น (จะต้องคำนวณซ้ำอีกครั้ง)

จัดรูปสมการออกแบบจะได้

$$d_{rL_r} = \sqrt{\frac{4 P_w \cdot SF}{\pi \sigma_y}}$$

แทนค่าในสมการออกแบบแล้วแก้สมการจะได้

$$d_{rL_r} = 2.65 \text{ มม.}$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ หาได้จากสมการ

$$d_{rL_n} = d_{rL_r} + \frac{5\sqrt{3}}{8} p \quad (4.111)$$

สมมุติระยะพิตช์ p เท่ากับ 0.5 มม. (สำหรับขนาดระบุ d_{rL_n} 3 มม.) จะได้

$$d_{rL_n} = 3.192 \text{ มม.}$$

มีค่ามากกว่าขนาดระบุ ดังนั้นไม่สอดคล้อง

สมมุติระยะพิตช์ p เท่ากับ 0.7 มม. (สำหรับขนาดระบุ d_{rL_n} 4 มม.) จะได้

$$d_{rL_n} = 3.408 \text{ มม.}$$

มีค่าน้อยกว่าขนาดระบุ ดังนั้นสอดคล้อง

ดังนั้นขนาดระบุของเกลียว

$$d_{rL_n} = 4 \text{ มม.} \quad (4.112)$$

1.2.2) ปลายก้านดิ่งที่บ่าขาดเนื่องจากความเค้นดิ่ง

สมมุติขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D_{rL} = 6$ มม. และให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ระบุ) ของปลาย d_{rL_n} คือ 4 มม. (ผลลัพธ์ที่ (4.112)) ดังนั้น $D_{rL}/d_{rL_n} = 1.5$ ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น K_t ในกรณีนี้คือ^[9]

$$K_t = 0.99957 \left(\frac{\rho}{d_{rL_n}} \right)^{-0.28221} \quad (4.113)$$

โดย ρ คือ รัศมีมีความโค้งของฟิลเลตของบ่าเพลลา

สมมุติ ρ มีค่าเท่ากับ 0.3 มม. ดังนั้นจาก (4.113) จะได้

$$K_t = 2.076$$

จะได้ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บ่าเพลลา σ_{max} มีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{max} = K_t \left(\frac{4 P_w}{\pi d_{rL_n}^2} \right)$$

แทนค่าจะได้

$$\sigma_{max} = 66.1 \text{ MPa}$$

ซึ่งยังน้อยกว่าความเค้นที่ยอมรับได้ (σ_y/SF) คือ 72.5 MPa

ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้านดิ่งคานทอดแรง คือ

$$D_{rL} = 6 \text{ มม.} \quad (4.114)$$

1.2.3) เกลียวขาดเนื่องจากความเค้นเฉือนตามขวาง

พื้นที่ที่รับความเค้นเฉือนในกรณีนี้คือ พื้นฐานของเกลียว A

$$A = \pi d_{rL_r} b n$$

โดย b คือ ความสูงของฐานเกลียว มีค่าเท่ากับ $\frac{3}{4} p$

n คือ จำนวนเกลียว

สมการออกแบบคือ

$$\frac{3 P_w}{2 A} = \frac{\tau_y}{SF}$$

เลือกใช้ $SF = 3$ แทนค่า แล้วแก้สมการจะได้ จำนวนเกลียว n เท่ากับ 3 เกลียว

1.2.4) เกลียวเสียหายแบบครากเนื่องจากความเค้นอัด

พื้นที่ที่รับความเค้นอัดในกรณีนี้ คือ พื้นที่ของหน้าเกลียว ซึ่งประมาณได้จาก

$$A = \frac{\pi}{4} (d_{rL_n}^2 - d_{rL_r}^2) n$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_w}{A} = \frac{\sigma_y}{SF}$$

เลือกใช้ $SF = 3$

แทนค่าแล้วแก้สมการจะได้จำนวนเกลียว n เท่ากับ 1 เกลียว

จากผลการคำนวณในหัวข้อ 1.2.3) และ 1.2.4) จำนวนเกลียวที่ต้องการคือ อย่างน้อย 3 เกลียว เมื่อคูณกับระยะพิทช์ (0.7 มม.) แล้วจะได้ความยาวเกลียวบนก้านดึงคานทอดแรง L_{TrL} เท่ากับ

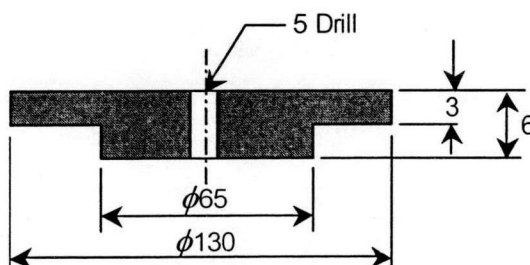
$$L_{TrL} = np = 3 \times 0.7 = 2.1 \text{ มม.}$$

เนื่องจากเกลียวที่ปลายก้านดึงคานทอดแรงจะขึ้นอยู่กับเนื้อตัวเมีย ดังนั้นความยาวเกลียวที่รับแรงจะเท่ากับความสูงของเนื้อตัวเมีย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะมีความสูงประมาณ $7/8$ เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ หรือในกรณีนี้คือ $7/8 \times 4 = 3.5$ มม. จะเห็นว่ามีความมากกว่าความยาวเกลียวที่ต้องการ (2.1 มม.) ดังนั้นจึงใช้เนื้อตัวเมียที่ขายทั่วไปได้ ดังนั้น

$$L_{TrL} = 3.5 \text{ มม.} \quad (4.114)$$

1.3) มิติของจานรองตุ่มน้ำหนัก

มิติของจานรองตุ่มน้ำหนักในที่นี้กำหนดขึ้นโดยใช้ดุลพินิจ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของจานรองตุ่มน้ำหนักเท่ากับ 130 มม. ความหนาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มม. มีความหนา 6 มม. และส่วนรอบนอก (ที่เหลือ) มีความหนา 3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ภาพหน้าตัดของจานรองตุ่มน้ำหนัก และขนาด

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณมิติของตัวจับยึดระหว่างก้านดึงคานทอดแรงกับคานทอดแรง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณขนาดของตัวจับยึดคานทอดแรง จากรูปที่ 4.27 แสดงวิธีจับยึด และตัวแปรบอกขนาด ซึ่งประกอบด้วย 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก d_3 , 2) หน้ากว้างของแขนด้านข้างของตัวจับยึดคานทอดแรง w_3 3) ความหนาของแขนด้านข้างของตัวจับยึดคานทอดแรง t_5 และ 4) ความหนาของพื้นล่างตัวจับยึดคานทอดแรง t_6

1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก

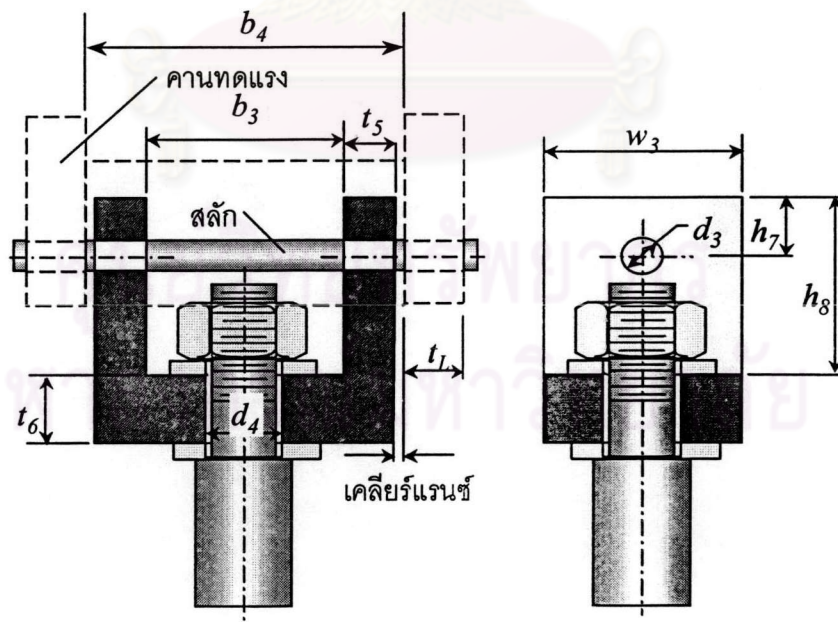
โหมดความเสียหายของสลักที่ตัวจับยึดคานทอดแรงกับคานทอดแรง ประกอบด้วย

- เสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน
- เสียหายเนื่องจากความเค้นดัด

1.1) สลักเสียหายเนื่องจากความเค้นเฉือน

สมการออกแบบในกรณีนี้คือ

$$\frac{P_w}{2\left(\frac{\pi}{4}d_3^2\right)} = \frac{\tau_{y3}}{SF}$$



รูปที่ 4.27 รูปร่าง และตัวแปรบอกขนาดของ ตัวจับยึดคานทอดแรง (ด้านที่แขวนตุ้มน้ำหนัก)

ดังนั้น

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 P_w SF}{\pi 2 \tau_{y3}}}$$

แทนค่า $P_w = 400$ นิวตัน , $SF = 3$ และ $\tau_{y3} = 448.16 \text{ MPa}$ (วัสดุ AISI 4340)

$$d_3 = 2.295 \text{ มม.}$$

1.2) สลักเสียหายเนื่องจากความเค้นดัด

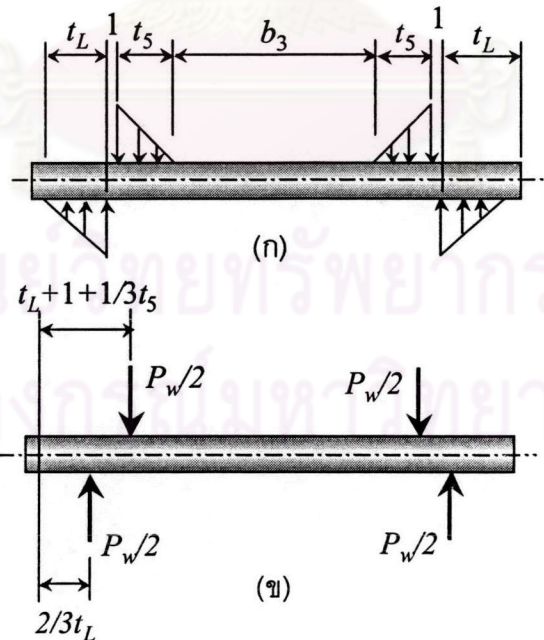
รูปที่ 4.28ก จำลองภาระที่กระทำต่อสลักเมื่อแขวนตุ้มน้ำหนักและรูปที่ 4.28ข แสดงภาระสมมูลซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ จากรูปโมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดที่กึ่งกลางความยาวสลัก และมีค่าเท่ากับ

$$M_{\max} = \frac{P_w}{2} \left(\frac{t_L}{3} + \frac{t_5}{3} + 1 \right)$$

สมการออกแบบในกรณีนี้คือ

$$\frac{32M_{\max}}{\pi d_3^2} = \frac{\sigma_{y3}}{SF}$$

จากผลลัพธ์ (4.105), (4.110) และสมมติ $t_5 = 5$ มม. เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงไปจะได้ $d_3 = 4.924$ มม.



รูปที่ 4.28 ภาระที่กระทำต่อสลักยึดก้านดึงคานทอดแรงกับตัวจับยึดคานทอดแรง

เลือกขนาดสลักที่ใหญ่กว่า ดังนั้น

$$d_3 = 5 \text{ มม. (ปัดเศษขึ้น)} \quad (4.115)$$

2) ความกว้างของแขนด้านข้างของตัวจับยึดคานทอดแรง w_3

ขนาดของ w_3 หาจากเงื่อนไขความเค้นหนาแน่นที่รูเจาะมีค่าน้อยที่สุด จากสมการที่ (4.32) ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นมีค่าน้อยที่สุดเมื่อ

$$w_3/d_3 = 0.44$$

แทนผลลัพธ์ (4.115)

$$\text{ดังนั้น} \quad w_3 = d_3 / 0.44 = 11.50 \text{ มม.} \quad (4.116)$$

ในทำนองเดียวกัน เพื่อให้ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นน้อยที่สุดมีค่าน้อยที่สุด ระยะ h_7 จะต้องเท่ากับความกว้างของแขนด้านข้าง w_3 ดังนั้น

$$h_7 = 11.5 \text{ มม.} \quad (4.117)$$

3) ความหนาของแขนด้านข้างของตัวจับยึดคานทอดแรง t_5

ความเค้นแรงดึงสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวด้านในของตัวจับยึดโดยมีค่าเท่ากับ

$$\sigma_{\max} = K_{IB} \frac{\left(\frac{P_w}{2} \frac{b_3 + t_5}{2}\right) \frac{t_5}{2}}{\frac{1}{12} w_3 t_5^3} + K_{IT} \frac{\frac{P_w}{2}}{w_3 t_5} \quad (4.118)$$

และ

$$K_{IT} = 3.0039 - 3.573 \frac{d_3}{w_3} + 7.9735 \left(\frac{d_3}{w_3}\right)^2 - 9.2659 \left(\frac{d_3}{w_3}\right)^3 + 1.8145 \left(\frac{d_3}{w_3}\right)^4 + 2.9684 \left(\frac{d_3}{w_3}\right)^5 \quad (4.119)$$

$$K_{IB} = 2.24000e^{-0.78739 \left(\frac{d_3}{w_3}\right)} \quad \text{สำหรับ } d_3/t_5 = 1.00 \quad (4.120ก)$$

$$= 2.02430e^{-0.80821 \left(\frac{d_3}{w_3}\right)} \quad \text{สำหรับ } d_3/t_5 = 1.50 \quad (4.120ข)$$

โดย K_{IB} และ K_{IT} คือ ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นภายใต้ภาระดัด และภาระดึง ของแผ่นแบนมีรูเจาะกลม ตามลำดับ ^[24]

สมการออกแบบคือ
$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_{y3}}{SF} \quad (4.121)$$

ในขณะนี้ $d_3/w_3 = 0.435$ และ $d_3/t_5 = 1$ ดังนั้น

$$K_{IT} = 2.307 \text{ และ } K_{IB} = 1.591$$

แทนค่าลงในสมการออกแบบ ($SF = 3$) จะได้ $t_5 = 5.126$ มม.

ดังนั้นค่า $d_3/t_5 = 0.975$ จึงต้องมีการคำนวณซ้ำ

การทำซ้ำครั้งที่ 1

โดยการใช้การประมาณค่าเชิงเส้นกับสมการที่ (4.127) จะได้ $K_{IB} = 1.599$ แทนค่าลงในสมการออกแบบ ($SF = 3$) จะได้ $t_5 = 5.141$ มม. ดังนั้น ค่า $d_3/t_5 = 0.973$

การทำซ้ำครั้งที่ 2

โดยการใช้การประมาณค่าเชิงเส้นกับสมการที่ (4.127) จะได้ $K_{IB} = 1.600$ แทนค่าลงในสมการออกแบบ ($SF = 3$) ดังนั้น $t_5 = 5.142$ มม. ดังนั้น $d_3/t_5 = 0.972$ ซึ่งถือว่าลู่เข้าแล้ว จึงไม่ต้องคำนวณซ้ำ เพื่อความสะดวก เลือกใช้

$$t_5 = 5.5 \text{ มม.} \quad (4.122)$$

นำค่า t_5 ที่ได้นี้กลับไปคำนวณหาขนาดสลัก ในข้อย่อย 2.1.2) อีกครั้งจะได้ $d_3 = 4.972$ มม. หรือปัดขึ้นเป็น 5 มม. ซึ่งตรงกับที่คำนวณไว้ตอนแรก จึงไม่ต้องมีการทำซ้ำทั้งหมดอีก

ความหนาของตัวจับยึดคานทอดแรงส่วนหน้า b_4 เท่ากับ

$$b_4 = b_3 + 2t_5$$

สมมุติระยะ b_3 (รูปที่ 4.27) ดังนี้

$$b_3 = 23 \text{ มม.} \quad (4.123)$$

แทนผลลัพธ์ (4.123) จะได้

$$b_4 = 23 + 2(5.5) = 34 \text{ มม.} \quad (4.124)$$

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ (4.104) จะพบว่าตัวจับยึดคานทอดแรงส่วนหน้า สามารถติดตั้งระหว่างคานทอดแรงได้โดยมีเคลียแรนซ์เท่ากับ 2 มม. ดังนั้นค่า b_3 ที่กำหนดจึงยอมรับได้

4) การหาขนาดของพื้นด้านล่างของตัวจับยึดคานทอดแรง

โมเมนต์ดัดสูงสุดเกิดขึ้น ณ จุดที่ต่อกับแขนด้านข้าง โดยมีค่าเท่ากับ

$$M_{\max} = \frac{P_w}{2} \left(\frac{b_3 + t_5}{2} \right)$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{M_{\max} \frac{t_6}{2}}{\frac{1}{12} w_3 t_6^3} = \frac{\sigma_{y3}}{SF}$$

เนื่องจากไม่ทราบค่าของตัวประกอบความเค้นหนาแน่นที่รอยต่อ จึงเพิ่มตัวประกอบความปลอดภัยเป็น 5 แทนค่าผลลัพธ์ (4.110), (4.116), (4.122) และ (4.123) ลงในสมการออกแบบจะได้

$$t_6 = 4 \text{ มม. (ปัดเศษขึ้น)}$$

ในกรณีของ knuckle joint เอกสารอ้างอิงหมายเลข [12] แนะนำค่าต่อไปนี้

$$t_6 = 0.6b_3 = 9.6 \text{ มม.}$$

หรือปัดเศษเป็น

$$t_6 = 10 \text{ มม.} \quad (4.125)$$

ขั้นตอนที่ 5 การประมาณความยาวของก้านดึงคานทอดแรง

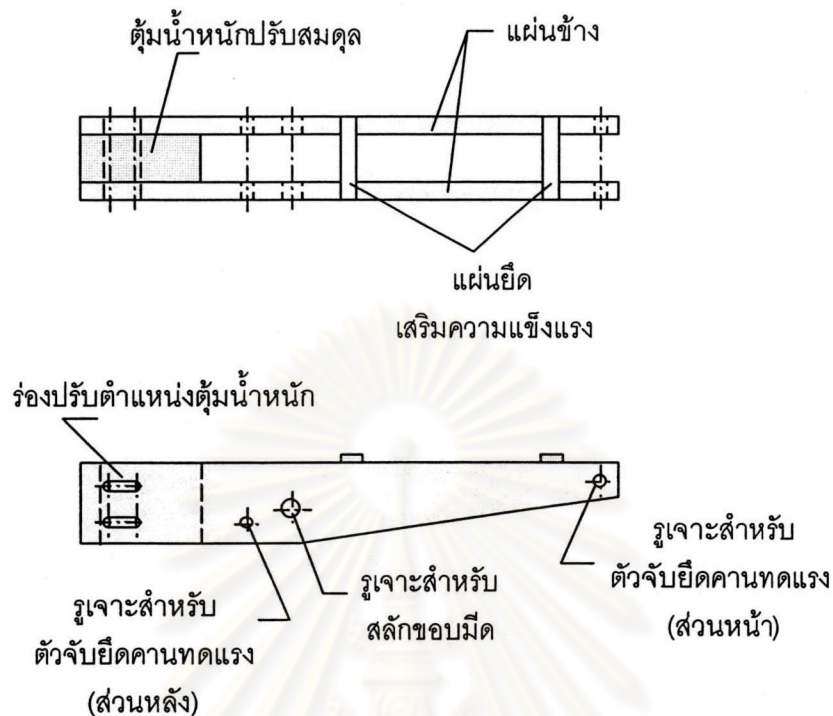
ความยาวของก้านดึงคานทอดแรงกำหนดจากเงื่อนไขว่า ปลายต้องไม่แตะพื้นเมื่อคานทอดแรงหมุนอยู่ในตำแหน่งที่ขึ้นงานทดสอบยึดตัวมากที่สุด จากความสูงของเครื่องทดสอบ 1750 มม. กำหนดความยาวของก้านดึงคานทอดแรงเท่ากับ 1400 มม.

4.7 ผลการออกแบบคานทอดแรงและตุ้มน้ำหนักปรับสมดุล

ขั้นตอนที่ 1 ออกแบบรูปร่างของคานทอดแรง :

รูปร่างของคานทอดแรงที่ออกแบบไว้ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.29 จากรูปคานทอดแรงมีลักษณะเรียวไปทางด้านแขนตุ้มน้ำหนัก ทั้งนี้เพื่อให้จุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดหมุนของคานทอดแรง และเพื่อให้พิสัยการเคลื่อนที่ (แบบหมุน) ของคานทอดแรงมากขึ้น

ตำแหน่งของรูเจาะบนคานทอดแรงมี 3 จุด คือ สำหรับตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหน้า), ตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) และสำหรับสลักคมมีด (knife edge) นอกจากนี้ปลายด้านซ้ายของคานทอดแรง จะมีร่องเพื่อใช้เปลี่ยนตำแหน่งของตุ้มน้ำหนักปรับสมดุล



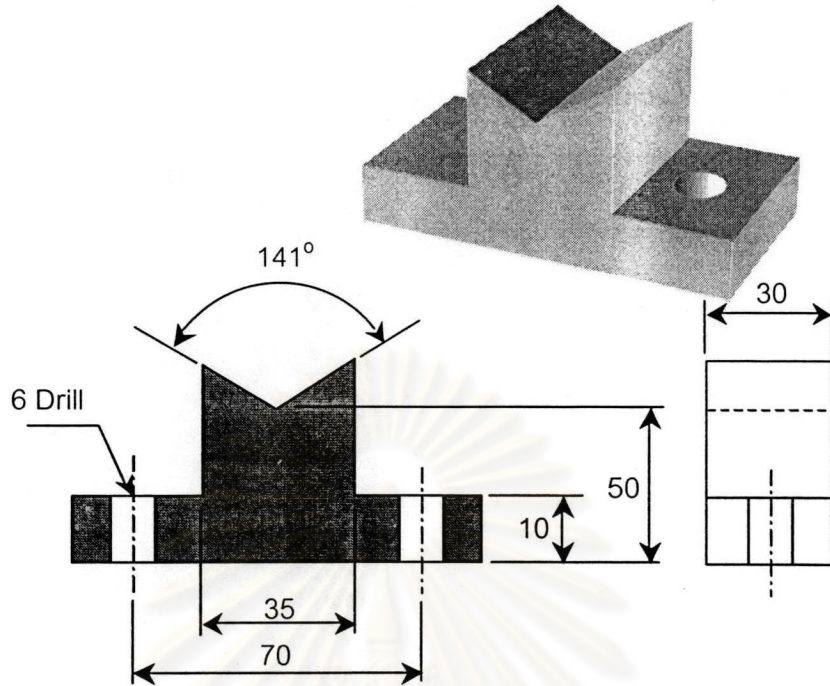
รูปที่ 4.29 คานทอดแรง

ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบแท่นรองรับคานทอดแรง และสลักคมมิด :

แท่นรองรับคานทอดแรงที่ออกแบบมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.30 ส่วนบนมีลักษณะเป็นร่องรูปตัววีเพื่อรองรับกับสลักคมมิด ที่ฐานเจาะรูเพื่อยึดกับโครงของเครื่องทดสอบ มิติของแท่นกำหนดโดยใช้ดุลพินิจ

มุมยอดของร่องรูปตัววี ในรูปที่ 4.30 มาจากการพิจารณาให้คานทอดแรงสามารถแกว่งได้จนถึงพิสัยที่ต้องการโดยไม่ชนกับผิวข้างของร่อง มุมยอดที่ได้คือ 141 องศา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.30 แท่นรองรับคานทดแรง

ถัดไปจะคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก (คมมีด) d_4 ที่เสียบผ่านคานทดแรง และปลายวางอยู่บนจุดรองรับเป็นร่องตัววี (รูปที่ 4.31) รูปที่ 4.32ก และรูปที่ 4.32ข แสดงตำแหน่งของสลักที่ร้อยผ่านคานทดแรง และวิธีการรองรับสลัก ขั้นตอนการออกแบบประกอบด้วย 1) การวิเคราะห์แรง 2) การเลือกวัสดุ และ 3) การประยุกต์เกณฑ์ความเสียหาย

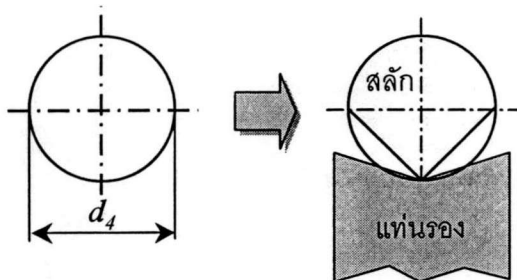
1) การวิเคราะห์แรง

แรงที่กระทำต่อสลัก หาได้จากการวิเคราะห์ผังวัตถุอิสระของคานทดแรง (รูปที่ 4.33) จากรูปจะได้แรงแนวตั้งที่กระทำต่อสลัก คือ

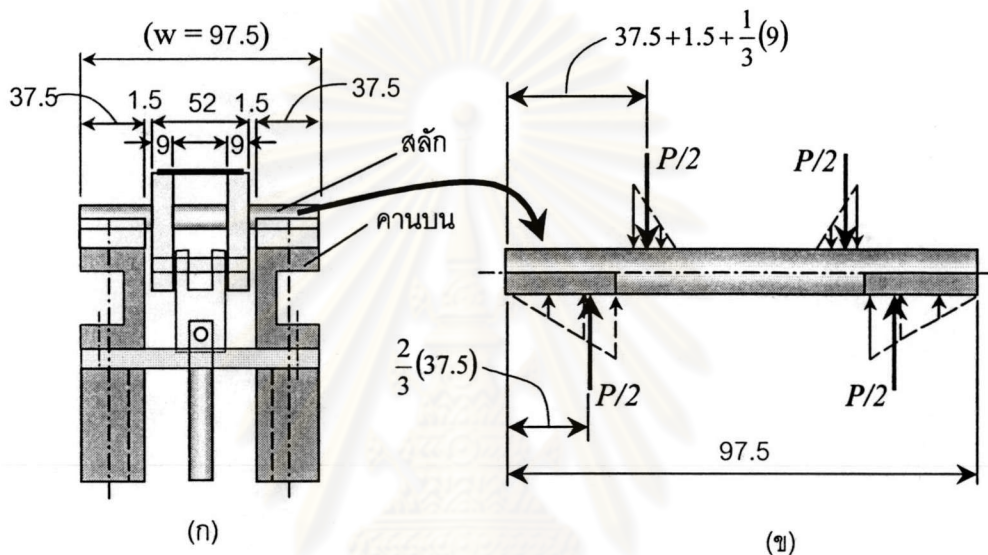
$$P_{knife} = \text{แรงดึงขึ้นงาน} + \text{น้ำหนักคานทดแรง} + \text{น้ำหนักตุ้มน้ำหนัก}$$

สมมติให้ น้ำหนักคานทดแรง เท่ากับ 30 กิโลกรัม (ตรวจสอบอีกครั้งหลังจากได้มิติของคานทดแรงที่ละเอียดแล้ว)

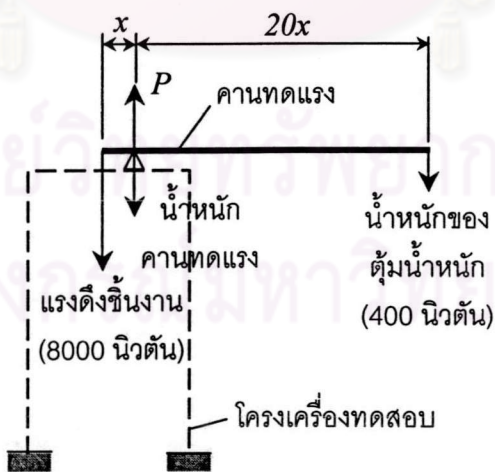
$$P_{knife} = (8000 + 300 + 400) \text{ นิวตัน} = 8700 \text{ นิวตัน}$$



รูปที่ 4.31 ลักษณะหน้าตัดของสลักคมมีด



รูปที่ 4.32 ตำแหน่งของสลักคมมีดและภาวะที่กระทำต่อสลัก



รูปที่ 4.33 ผังวัตถุอิสระของคานทอดแรง

2) การเลือกวัสดุ

โดยสามัญสำนึกทั่วไป สลักคมมีดควรจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ เพราะมีความยาว (ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางที่รองรับ) เท่ากับ 95.5 มม. (จากผลลัพธ์ (4.106)) รับน้ำหนักถึง 8,700 นิวตัน และต้องไม่มีระยะแอ่นตัวมากเกินไป จึงควรทำด้วยเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เช่น AISI 4340 แต่เนื่องจากใช้ปริมาณน้อยการสั่งซื้อไม่สะดวก จึงต้องเปลี่ยนไปใช้เหล็กเพลลาที่ขายทั่วไป โดยประมาณความต้านแรงดึงคราก σ_y ของวัสดุไว้ที่ 300 MPa และ $E = 200 \text{ GPa}$

3) การประยุกต์เกณฑ์ความเสียหาย

โหมดความเสียหายของสลัก ที่พิจารณาประกอบด้วย

- สลักขาดเนื่องจากความเค้นเฉือน
- สลักหักเนื่องจากความเค้นดัด
- ระยะแอ่นสูงสุดมากเกินไป

3.1) สลักขาดเนื่องจากความเค้นเฉือน

สมการออกแบบคือ

$$\frac{P_{knife}}{2\left(\frac{\pi}{4}d_4^2\right)} = \frac{\tau_y}{SF}$$

โดย d_4 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลัก

τ_y คือ ความต้านแรงเฉือนคราก ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ $0.5\sigma_y$

ดังนั้น

$$d_4 = \sqrt{\frac{P_{knife}}{2\left(\frac{\pi}{4}\right)} \frac{SF}{\tau_y}}$$

เลือกใช้ตัวประกอบความปลอดภัย SF เท่ากับ 3 จะได้ $d_4 = 10.53$ มม.

3.2) สลักหักเนื่องจากความเค้นดัด

จากรูปที่ 4.32x โมเมนต์ดัดสูงสุดบนสลัก คือ

$$M_{\max} = \frac{P_{knife}}{2} \left(\frac{1}{3}(9) + 1.5 + \frac{1}{3}(37.5) \right) = 73.95 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

สมการออกแบบคือ

$$\frac{32M_{\max}}{\pi d_4^3} = \frac{\sigma_y}{SF}$$

แทนค่าต่าง ๆ จะได้ $d_4 = 19.60$ มม. หรือปัดเศษเป็น 20 มม.

3.3) ระยะแอนตัวมากเกินไป

ระยะแอนตัวสูงสุดของคานในรูปที่ 4.34 คือ ^[20]

$$v_{\max} = \frac{Fa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (4.126)$$

ในที่นี้ $F = P_{\text{knife}} / 2 = 4350$ นิวตัน

$$a = \frac{1}{3}(9) + 1.5 + \frac{1}{3}(37.5) = 17 \text{ มม.}$$

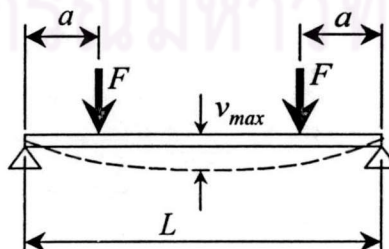
$$L = 97.5 - \frac{2}{3}(37.5) - \frac{2}{3}(37.5) = 42.5 \text{ มม.}$$

และ $I = \frac{\pi}{64} d_4^4$

โดยการแทนค่า d_4 เท่ากับ 20 มม. และ 25 มม. (ขนาดเพลามาตรฐาน) ลงในสมการที่ (4.126) แล้วจะได้ค่าของ v_{\max} / L เท่ากับ 1.97×10^{-4} และ 8.06×10^{-5} มม./มม. ตามลำดับ ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตระยะแอนตัวต่อหน่วยความยาวของคานในโครงสร้างเครื่องจักรที่มีความแม่นยำปานกลาง ^[21] ดังนั้น $d_4 = 20$ มม.

การวิเคราะห์ข้างต้นสมมติให้หน้าตัดของสลัก เป็นรูปร่างกลมตลอดความยาว ดังนั้น v_{\max} / L ที่ได้จึงเป็นค่าขอบเขตล่าง (lower bound) ถัดไปพิจารณากรณีที่หน้าตัดของสลักส่วนบนเป็นรูปครึ่งวงกลมและส่วนล่างเป็นรูปตัววีตลอดความยาว ในกรณีนี้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดคือ

$$I = \frac{\pi}{128} d_4^4 + \frac{1}{12} d_L \left(\frac{d_L}{2} \right)^3$$



รูปที่ 4.34 คานแบบ Simply suport ที่รับแรงแบบจุด 2 แรง ห่างจากปลายเท่า ๆ กัน

ถ้าแทนค่า d_4 เท่ากับ 20 มม. และ 25 มม. (ขนาดมาตรฐาน) ลงในสมการที่ (4.126) จะได้ค่าของ v_{\max}/L เท่ากับ 2.762×10^{-4} และ 1.132×10^{-4} มม./มม. ตามลำดับ ดังนั้น $d_4 = 20$ มม. เพียงพอที่จะทำให้ได้ค่า v_{\max}/L อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับ จึงสรุปว่า

$$d_4 = 20 \text{ มม.} \quad (4.127)$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดมิติของคานทอดแรง

ในขั้นตอนนี้จะคำนวณหาตำแหน่งของรูเจาะบนคานทอดแรง ซึ่งมีทั้งสิ้น 3 รูคือ 1) รูเจาะสำหรับตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหน้า) , 2) รูเจาะสำหรับตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) และ 3) รูเจาะสำหรับสลักคมมีด

รูเจาะสำหรับตัวจับยึดคานทอดแรงส่วนหลัง กำหนดให้อยู่สูงจากขอบล่างของคานทอดแรงเท่ากับระยะ h_2 ซึ่งเท่ากับ 22 มม. (สมการที่ (4.38)) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกำหนดให้เท่ากับ 11 มม. เพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักที่สอดผ่านตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) d_2 คือ 10.5 มม. (สมการที่ (4.55))

รูเจาะสำหรับตัวจับยึดคานทอดแรงส่วนหน้า กำหนดให้อยู่สูงจากขอบล่างของคานทอดแรงเท่ากับระยะ h_7 ซึ่งเท่ากับ 11.5 มม (สมการที่ (4.117)) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะกำหนดให้เท่ากับ 5.5 มม. เพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักที่สอดผ่านตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) d_3 คือ 5 มม. (สมการที่ (4.115))

รูเจาะสำหรับสลักคมมีด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 20.5 มม. เพราะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสลักที่สอดผ่าน d_4 คือ 20 มม. ตำแหน่งของรูเจาะนี้ในแนวตั้งขึ้นอยู่กับมุมที่ผู้ออกแบบกำหนดให้คานทอดแรงกว้างได้

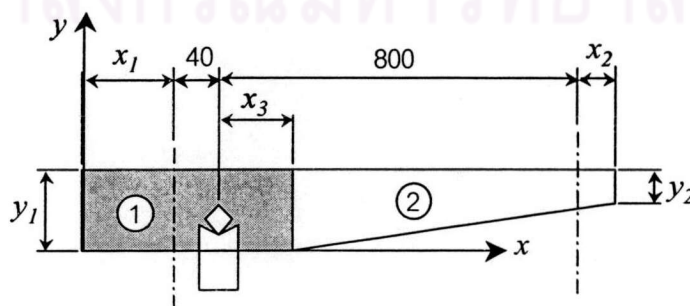
ระยะแนวระดับระหว่างศูนย์กลางของรูเจาะทั้งสามสามารถกำหนดได้อย่างอิสระ ในที่นี้กำหนดระยะระหว่างตัวจับยึดคานทอดแรงส่วนหลัง กับศูนย์กลางของสลักคมมีด เท่ากับ 40 มม. (ดูรูปที่ 4.35 ประกอบ) ดังนั้นระยะแนวระดับระหว่างจุดนี้ถึงจุดศูนย์กลางของตัวจับยึดคานทอดแรงส่วนหน้า จะเท่ากับ 20×40 เท่ากับ 800 มม. อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งของคมมีด (ซึ่งเทียบเท่ากับจุดหมุนของคานทอดแรง) จะต้องอยู่ที่จุดศูนย์กลางถ่วงของคานทอดแรง เพื่อให้ภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบเกิดจากการทอดแรงเนื่องจากน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักอย่างเดียวเท่านั้น (คานทอดแรงมีสมดุลของโมเมนต์ขณะไม่มีภาระกระทำต่อชิ้นงาน

รูปที่ 4.35 แสดงรูปร่างของคานทอดแรง และตัวแปรบอกมิติที่กำหนดเพิ่ม จากรูปจะเห็นว่า จุดศูนย์กลางของคานทอดแรงจะอยู่ก่อนไปทางขวามือของจุดรองรับเพราะความยาวคานจากจุดรองรับถึงปลายคานด้านขวามือมีความยาวมาก ดังนั้นเพื่อให้จุดศูนย์กลางคานมาทางซ้ายมือมากขึ้นระยะ x_2 , x_3 และ y_2 ควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วน y_1 ควรมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้ระยะ x_1 มีค่าเหมาะสม (ในที่นี้กำหนดว่าไม่เกินครึ่งหนึ่งของหน้ากว้างเครื่องทดสอบ $S/2 \approx 362.5$ มม. ผลลัพธ์ที่ (4.103)) อย่างไรก็ตาม จะถ่วงตุ้มน้ำหนักที่ปลายด้านซ้ายมือของคานทอดแรงเพิ่มด้วย เพื่อให้ระยะ x_1 ไม่มากเกินไป

การวิเคราะห์ที่กล่าวต่อไปนี้จะไม่ได้นำน้ำหนักของก้านดึงขึ้นงาน ก้านดึงคานทอดตัวจับยึด คานทอดแรง และจานรองตุ้มน้ำหนัก มาพิจารณา ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ตุ้มน้ำหนักปรับสมดุลสามารถเลื่อนตำแหน่งได้

ในขั้นต้นจะกำหนดค่าของตัวแปรบอกมิติในรูปที่ 4.35 ดังต่อไปนี้

- ระยะ $y_1 = 150$ มม.
- ระยะ $y_2 = 2h_7 = 23$ มม.
- ระยะ $x_2 = 15$ มม.
- ระยะ $x_3 = 15$ มม.
- ความกว้างของตุ้มน้ำหนักปรับสมดุล เท่ากับ ขนาดของช่องว่างระหว่างแผ่นด้านข้างของคานทอดแรง (36 มม. จากผลลัพธ์ (4.104))
- ความสูงของตุ้มน้ำหนักปรับสมดุล เท่ากับระยะ y_1 (150 มม.)
- ความยาวของตุ้มน้ำหนักเท่ากับ $3/4$ เท่าของความยาว x_1 เพื่อให้ไม่ให้ออกของตุ้มน้ำหนักชนกับ ตัวจับยึดคานทอดแรง



รูปที่ 4.35 คานทอดแรงและตัวแปรบอกมิติ

กำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ที่มุมซ้ายล่างของคานทอดแรง (รูปที่ 4.35) ดังนั้น จุดศูนย์กลางถ่วงของคานทอดแรงจะอยู่ที่

$$\bar{x} = \frac{m_1\bar{x}_1 + m_2\bar{x}_2 + m_w\bar{x}_3}{m_1 + m_2 + m_w} \quad (4.128)$$

โดย \bar{x}_1 คือ ระยะแนวระดับจากจุดศูนย์กลางถ่วงของส่วนที่ 1 ถึงจุดกำเนิด

\bar{x}_2 คือ ระยะแนวระดับจากจุดศูนย์กลางถ่วงของส่วนที่ 2 ถึงจุดกำเนิด

\bar{x}_3 คือ ระยะแนวระดับจากจุดศูนย์กลางถ่วงของตุ้มน้ำหนักถ่วงสมดุล ถึงจุดกำเนิด

m_1 คือ มวลของส่วนที่ 1

m_2 คือ มวลของส่วนที่ 2

m_w คือ มวลของตุ้มน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.35 จะได้

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{2}(x_1 + 40 + x_3)$$

$$\bar{x}_2 = \frac{(800 + x_2 - x_3)(y_1 + 2y_2)}{3(y_1 + y_2)} + (x_1 + 40 + x_3)$$

$$\bar{x}_3 = \frac{1}{2}\left(\frac{3}{4}x_1\right)$$

$$m_1 = 2[\rho(y_1)(x_1 + 40 + x_3)]t_4 \quad (t_4 = 9 \text{ มม.})$$

$$m_2 = 2\left[\rho\left(\frac{1}{2}(y_1 + y_2)(800 + x_2 - x_3)\right)\right]36$$

$$m_w = \rho\left(36 \times y_1 \times \frac{3}{4}x_1\right)$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (4.128) และกำหนดตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงที่ต้องการที่ $\bar{x} = x_1 + 40$ แล้วแก้สมการหาค่า x_1 จะได้

$$x_1 = 285.4 \text{ มม.} \quad (4.129)$$

$$m_w = 8.78 \text{ kg} \quad (4.130)$$

$$\bar{x}_3 = 107.03 \text{ มม.} \quad (4.131)$$

ดังนั้นช่องว่างระหว่างตุ้มน้ำหนักกับตัวจับยึดคานทอดแรง (ส่วนหลัง) เท่ากับ $x_1 - \frac{3}{4}x_1$ เท่ากับ 71.35 มม. ตัวจับยึดคานทอดแรงมีความกว้าง 32 มม. (ผลลัพธ์ที่ (4.45)) ดังนั้นจะมีช่องว่างเท่ากับ 71.4 - 16 เท่ากับ 55.4 มม. สรุปว่าชิ้นส่วนทั้งสองไม่ชนกัน

จากรูปที่ 4.36 แสดงการหมุนของคานทอดแรงรอบจุดหมุน A เนื่องจากการยืดของชิ้นงาน ขณะที่ชิ้นงานยืดออกเนื่องจากความคืบ ตำแหน่งเริ่มต้นของคานอยู่ที่แนวเส้นตรง AB ตำแหน่งสิ้นสุดอยู่ที่แนวเส้นตรง AC ถ้ากำหนดให้ความเครียดแตกหักของชิ้นงานทดสอบเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ และความยาวเกจของชิ้นงานทดสอบคือ 30 มม. ดังนั้นระยะ BC คือ 15 มม.

กำหนดให้จุด E คือ จุดที่ขอบล่างของคานทอดแรง และอยู่ในแนวขอบนอกของเสา ดังนั้นจุด E ห่างจากจุดหมุน A ในแนวระดับเป็นระยะ $320+37.5=357.5$ มม. เมื่อจุด E เคลื่อนที่ตามแนวส่วนโค้งของวงกลม (เส้นประ) โดยกฎของสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ระยะแนวตั้งที่จุด E เคลื่อนที่ไปยังจุด D เท่ากับ $15 \times (357.5/40) = 134.1$ มม. จากรูปจะเห็นว่าถ้าความสูงของตัวรองรับ h_s มีค่าไม่เพียงพอแล้ว จุด E จะเคลื่อนไปชนกับแผ่นเหล็กที่รับคานบนของเครื่องทดสอบ (จุด F) เนื่องจากในรูปแสดงกรณีที่ไม่มีการชนเกิดขึ้น และระยะ δ คือระยะจากจุด D ถึงขอบบนของคานบน ดังนั้นการชนจะเกิดขึ้นเมื่อ δ มีค่าเท่ากับ -75 มม. และความสูงของจุดรองรับจากขอบบนของคานบน h_s คือ 59.1 มม. หรือปัดขึ้นเป็น

$$h_s = 60 \text{ มม.} \quad (4.132)$$

ถัดไปเป็นการหาตำแหน่งของรูเจาะสำหรับใส่สลักคมมิด จากกฎของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{y_1 - 2h_7}{800 - x_3 + x_2} = \frac{\Delta}{(800 - x_3 + x_2) - (320 - x_3)} \quad (4.133)$$

แทนค่าและแก้สมการจะได้

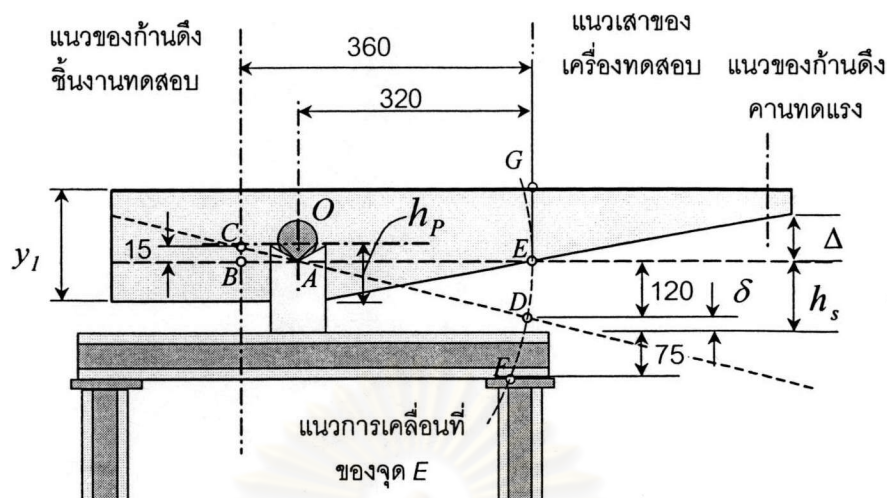
$$\Delta = 67.89 \text{ มม.}$$

ดังนั้นในระยะ GE คือ $\Delta + 2h_7$ เท่ากับ 90.89 มม. ถ้ากำหนดให้จุดหมุน A อยู่ในระดับเดียวกับจุด E แล้วจะได้ว่าระยะห่างจากจุดศูนย์กลางรูเจาะสำหรับร้อยสลักคมมิด (จุด O) ถึงขอบล่างของคานทอดแรง เป็นระยะเท่ากับ

$$h_p = y_1 - (\Delta + 2h_7) + \frac{d_4}{2}$$

แทนค่าจะได้

$$h_p = 69.11 \text{ มม.} \quad (4.134)$$



รูปที่ 4.36 แสดงการหมุนของคานทดสอบรอบจุดหมุน A

4.8 ผลการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณแรงดันไฟโหลด :

ชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปรุ่นที่เลือกเป็นแบบครึ่งทรงกระบอกจำนวน 2 ชั้น แต่ละอันจะมีขนาดพอดีกับขนาดความต้านทานตัวหนึ่งในวงจรไฟฟ้า โดยชุดให้ความร้อนทั้ง 2 ชั้นจะต่ออนุกรมกัน (ดูรูปที่ 4.37) จากข้อมูลของสินค้า ชุดให้ความร้อนสำเร็จรูปแต่ละชั้นทนแรงดันตกคร่อมได้ 57.5 โวลต์ ดังนั้นเมื่อต่ออนุกรมกันจะทนแรงดันตกคร่อมได้เท่ากับ 115 โวลต์ งานวิจัยนี้เลือกแหล่งจ่ายไฟ AC ขนาด 110 โวลต์ เพราะมีขายในท้องตลาด

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณกระแสโหลด :

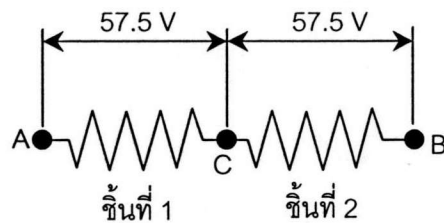
กระแสโหลดสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = IV$$

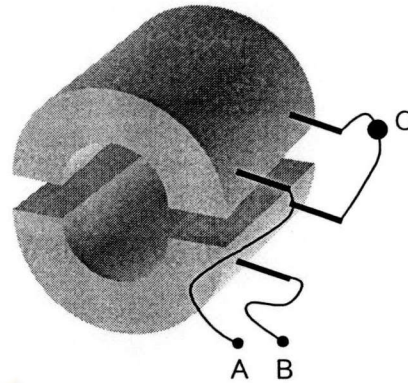
ในที่นี้ $P = 650$ วัตต์ และ $V = 57.5$ โวลต์

ดังนั้นกระแสโหลดสูงสุด I คือ

$$I = 650/57.5 = 11.3 \text{ แอมแปร์} \quad (4.135)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.37 แสดงการต่ออนุกรมของขดลวดความร้อนใน ชุดให้ความร้อน 2 ชั้น

ขั้นตอนที่ 3 เลือกขนาดแหล่งจ่ายแรงดัน :

จากชั้นที่ 1 และ 2 เลือกแหล่งจ่ายแรงดันไฟขนาด 110 โวลต์ และทนกระแสได้ 20 แอมแปร์

ขั้นตอนที่ 4 เลือกชนิดและรูปแบบของเทอร์โมคัปเปิล :

การเลือกชนิดของเทอร์โมคัปเปิล พิจารณาจากอุณหภูมิทดสอบสูงสุด ในที่นี้คือ 600°C หรือ ไม่เกิน 650°C ดังนั้นเทอร์โมคัปเปิลที่เหมาะสมมี 2 ชนิด คือชนิด J (อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 760°C ^[19]) หรือชนิด K (อุณหภูมิใช้งานสูงสุด 1260°C ^[19]) ในที่นี้เลือกชนิด K เนื่องจากหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด และเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในงานอื่นได้อีก

ขั้นตอนที่ 5 เลือกอุปกรณ์ควบคุม :

ในการวิจัยนี้ได้เลือกอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ โดยเริ่มจาก การพิจารณาคุณสมบัติของ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของหลายยี่ห้อ เช่น Omron , Yagava, และ Fenwal ในที่นี้เลือกผลิตภัณฑ์ของบริษัท Omron เมื่อพิจารณาตาม รายละเอียดแสดงสินค้า ^[19] พบว่ารุ่น E5CN มีความเหมาะสมเพราะ

- มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับรุ่นอื่นๆ ($48 \times 48 \times 78$ มม.³) ทำให้ขนาดของกล่องควบคุมเล็กลงได้
- มีความแม่นยำในการควบคุม และควบคุมได้ทั้งแบบ เปิด-ปิด และแบบ PID
- มีจำนวนช่องสัญญาณในจำนวนที่เหมาะสม (2 ช่องสัญญาณ)

- สามารถเลือกช่องสัญญาณขาออก เป็นรีเลย์, เป็นแรงดันไฟฟ้า หรือเป็นกระแส

เมื่อเลือกรุ่นที่ต้องการได้แล้ว ต่อไปจะเป็นการเลือกรายละเอียดของอุปกรณ์ควบคุม รุ่นนี้ โดยพิจารณาจากรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- 1) **วิธีควบคุม** ในที่นี้ต้องการวิธีควบคุมแบบ PID ซึ่งรุ่น E5CN สามารถควบคุมได้ทั้งแบบ เปิด-ปิด และแบบ PID จึงไม่มีปัญหาในเรื่องวิธีควบคุม
- 2) **แรงดันไฟป้อน** ในที่นี้พิจารณารุ่นที่รับไฟป้อนได้ในช่วง 100-240 VAC และรุ่น E5CN สามารถเลือกไฟป้อนได้หลายขนาด ในที่นี้จึงเลือกไฟป้อนเป็นแบบกระแสสลับ 220 V
- 3) **ชนิดของสัญญาณขาออก** ในที่นี้เลือกเป็นแบบ แรงดันไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์ตัดต่อวงจรโหลด (วงจรของเตา) รับสัญญาณควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้า
- 4) **ชนิดของสัญญาณขาเข้า** เนื่องจากต้องการควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้นสัญญาณขาเข้าของอุปกรณ์ควบคุมจึงมาจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ซึ่งเป็นเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K อย่างไรก็ตามก็ดี อุปกรณ์ควบคุมรุ่นนี้สามารถรับสัญญาณได้ทั้งแบบ เทอร์โมคัปเปิล Platinum resistance thermometer , Non-contact temperature sensor ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาในเรื่องของสัญญาณขาเข้า
- 5) **ช่วงใช้งานของอุณหภูมิ** ในที่นี้พิจารณาจากช่วงใช้งานของจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 600°C แต่จากการใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ทำให้อุปกรณ์ควบคุมรุ่นนี้ใช้งานได้ในช่วง $-200 - 1300^{\circ}\text{C}$

จากรายละเอียดในการพิจารณา จะได้รุ่นของอุปกรณ์ควบคุมที่สั่งซื้อคือ Omron Temperature Controller Model E5CN-Q2MTC-500

ขั้นตอนที่ 6 เลือกหม้อแปลงกระแส :

การเลือกรุ่นของหม้อแปลงกระแสทำตามคำแนะนำในแคตตาล็อก สำหรับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิรุ่นที่เลือกจะได้ รุ่นของหม้อแปลงกระแสที่เหมาะสมคือ E54-CT1

ขั้นตอนที่ 7 เลือกโซลิดสเตตรีเลย์ :

การเลือกโซลิดสเตตรีเลย์ พิจารณาจากหัวข้อต่อไปนี้

- 1) แรงดันไฟป้อน หมายถึง แรงดันที่รับจากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ในที่นี้คือ 12 VDC
- 2) แรงดันไฟโหลด จากขั้นที่ 1 คือ 110 โวลต์

3) กระแสไหลต จากชั้นที่ 2 คือ 11.3 แอมแปร์

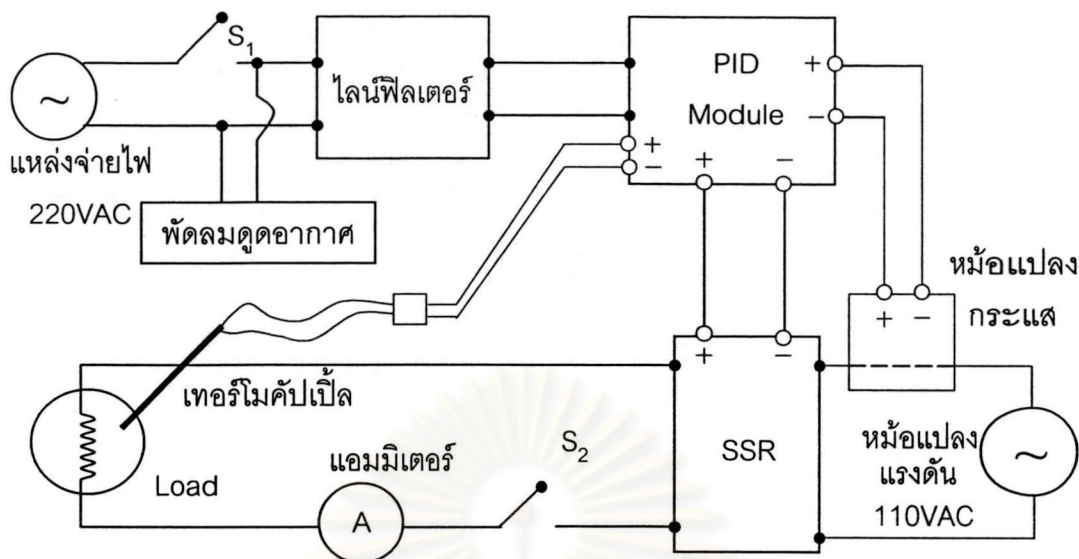
จากข้อมูลขั้นต้น รุ่นของโซลิดสเตตรีเลย์ที่เลือกคือ G3ND-220B ซึ่งรับแรงดันไฟป้อน 5-24 VDC รับแรงดันไฟไหลตได้ 24-240 VAC และทนกระแสได้ 20 A (ถ้ามี Heat sink)

อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เลือก จะถูกนำมาประกอบเป็นระบบทำความร้อนให้กับชิ้นงานทดสอบ โดยใช้แนวคิดของการทำงานตามที่แสดงในรูปที่ 4.38 การเดินสายไฟระหว่างอุปกรณ์เหล่านี้ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.39 จากรูปมีอุปกรณ์เพิ่มขึ้นอีก 4 ชิ้น คือ

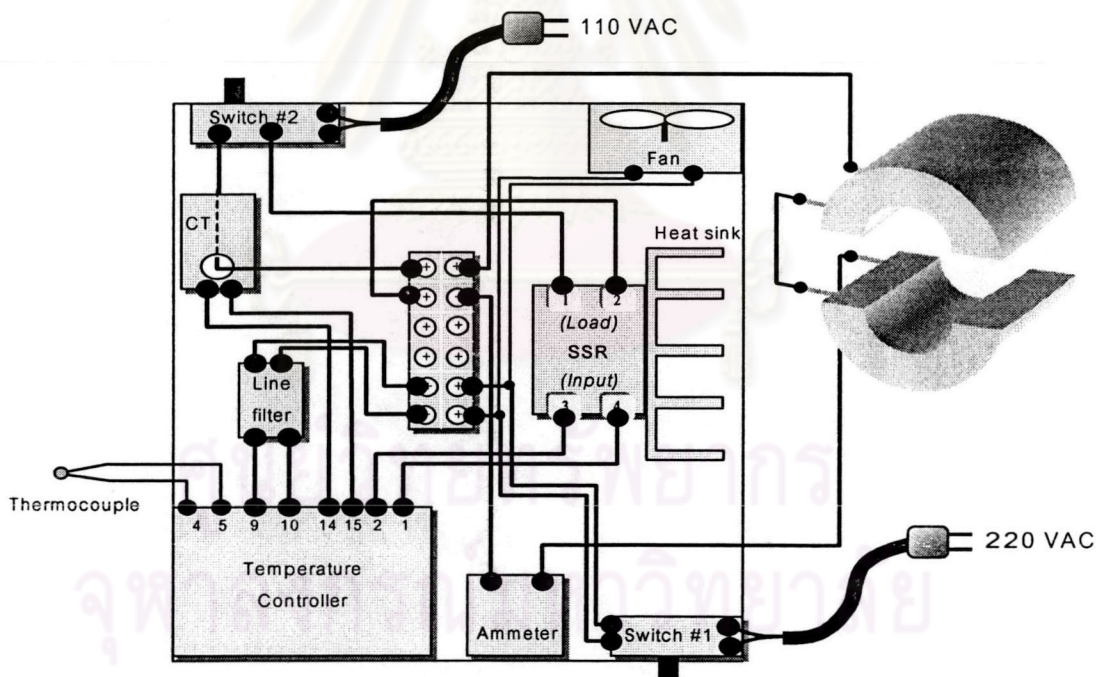
- 1) Heat sink เพื่อช่วยระบายความร้อนจาก SSR ซึ่งจะช่วยให้ SSR ทนกระแสได้สูงขึ้น
- 2) พัดลม ทำหน้าที่หมุนเวียนระบายความร้อนในกล่องอุปกรณ์
- 3) แอมมิเตอร์ ทำหน้าที่วัดกระแสในวงจรไหลต
- 4) Line filter ทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนที่ปะปนมากับกระแสไฟฟ้า เพื่อให้การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

วงจรในรูปที่ 4.38 สามารถอธิบายได้ดังนี้ สายไฟที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกขนาด 110 โวลต์สำหรับเตาความร้อน และชุดที่สองขนาด 220 โวลต์สำหรับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ หม้อแปลงกระแส และโซลิดสเตตรีเลย์ ดังนั้นสวิตช์ เปิด-ปิด จึงมี 2 ชุดเช่นกัน เนื่องจากการทำงานของพัดลมไม่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิ จึงออกแบบให้พัดลมทำงานตลอดเวลา แอมมิเตอร์ทำหน้าที่แสดงผลการวัดกระแสไฟฟ้าในวงจรไหลต เพื่อให้ผู้ใช้ทราบสถานะของการทำงานว่าปกติหรือไม่ สำหรับหม้อแปลงกระแสทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสในวงจรไหลตและส่งสัญญาณในรูปของกระแสไฟฟ้าให้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิทราบสถานะการทำงานว่าปกติหรือไม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.38 บล็อกไดอะแกรมการเดินสายไฟฟ้าในกล่องควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 4.39 แสดงรายละเอียดการเดินสายไฟฟ้าในกล่องควบคุมอุณหภูมิ