

MTE 461 & MET 441

การประลอง

ความเค้นในภาชนะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายใน
(Stress in Thin-walled Cylindrical Vessel under Internal Pressure)

พิเชษฐ์ พินิจ

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

19 มกราคม 2560



(Cerbos, 2017)

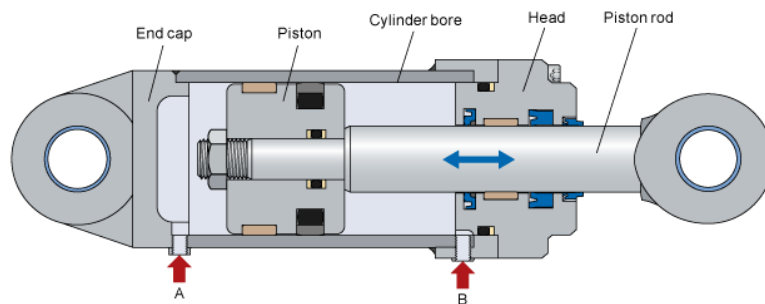
สาระสำคัญและแนวทางการทดลอง (Content and Orientation of experiment)

ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถความเค้นได้โดยตรง การทดลองนี้มีเป้าหมายประสงค์ที่จะให้ผู้เรียนได้เรียนรู้เกี่ยวกับการหาค่าความเค้น (σ) ในทางปฏิบัติโดยคำนวณจากค่าความเครียด (ϵ) และค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (E) ตามแบบจำลองวัสดุ (material model) ในช่วงยืดหยุ่นที่เป็นไปตามกฎของฮุก ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนเป็นสมการได้ว่า $\sigma = E\epsilon$ การทดลองครั้งนี้จะแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ข้างต้นเพื่อหาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในภาชนะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายในซึ่งมีลักษณะเป็นปัญหาความเค้นระนาบ (plane stress) โดยการวัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงที่ผิวของภาชนะทรงกระบอกนั้นด้วยมาตรวัดความเครียด (strain gauge) รวมถึงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าความเค้นที่ได้กับค่าความเค้นที่คำนวณได้จากสูตรโดยตรง

The purpose of this laboratory is for you to explore finding stresses (σ) - in practice - resulting from strains (ϵ) and Young's modulus (E) as an elastic material constant according to Hooke's Law represented by the relation of $\sigma = E\epsilon$. This experiment demonstrates the application of the mentioned relation to determine the stresses in the thin-walled cylindrical vessel under internal pressure being considered to be the plane stress problem. The strains are determined using the strain gauge being attached on the surface of the cylinder. Also, the obtained stresses from strain measurement are compares with those calculated from the direct formula.

ความเค้นในภาชนะทรงกระบอกภายใต้ความดันภายใน (Cylindrical Vessel under Internal Pressure)

การประยุกต์ใช้งานของภาชนะทรงกระบอกภายใต้ความดันในงานวิศวกรรมนั้นมีอยู่อย่างมากมาย เช่น กระบอกไฮดรอลิก กระบอกนิวเมติกส์ ถังอากาศอัด ท่อน้ำมัน ฯ ซึ่งการประยุกต์ใช้งานนั้น ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในภาชนะทรงกระบอกก็จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป (รูปที่ 1) ภาชนะทรงกระบอกรับภาระความดันภายในแบ่งออกได้สองประเภทหลัก ๆ ที่มีผลต่อสมการที่เราจะต้องใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นอย่างง่าย คือ ภาชนะความดันผนังบาง (thin-walled cylinder) และผนังหนา (thick-walled cylinder)



รูปที่ 1 ภาชนะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายในโดยที่เอลิเมนต์ความเค้นมีองค์ประกอบความเค้นในแนวแกน x และ y เท่านั้น ปัญหานี้จึงถูกกำหนดให้เป็นปัญหาระนาบ (SKF, n.d.)

การแบ่งแยกว่าภาชนะภายใต้ความดันใดเป็นผนังบางหรือผนังหนานั้นกำหนดได้โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d_i) ต่อความหนาของผนัง (t) ดังนี้ (รูปที่ 2)

$$\begin{aligned} \text{ผนังบาง :} & \quad \frac{d_i}{t} > 20 \\ \text{ผนังหนา :} & \quad \frac{d_i}{t} \leq 20 \end{aligned} \quad (1)$$

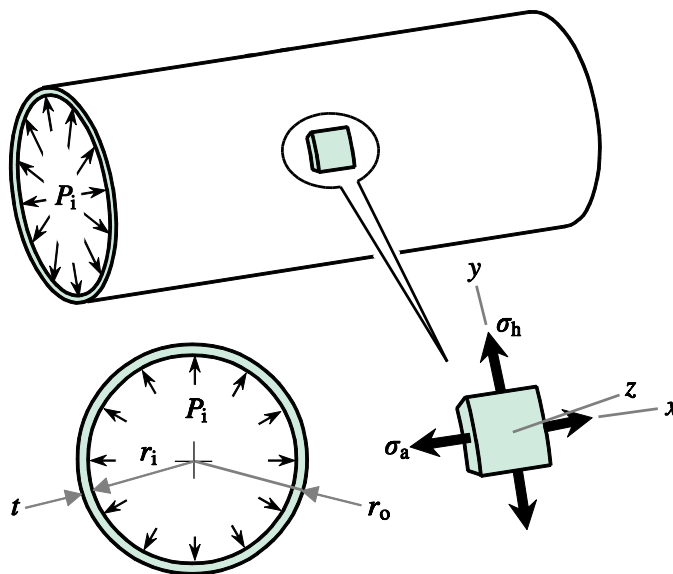
ในทางปฏิบัติแล้วเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นว่า ภาชนะดังกล่าวจะมีความปลอดภัยในการใช้งาน วิศวกรผู้ชำนาญจึงเพิ่มค่าอัตราส่วนดังกล่าวอีกสองเท่า กล่าวคือ จาก 20 เป็น 40

ภาชนะทรงกระบอกผนังบาง

ใน ‘ทฤษฎีผนังบาง’ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในภาชนะภายใต้ความดันทรงกระบอกผนังบางจะเป็นไปตามลักษณะของปัญหาความเค้นระนาบ (รูปที่ 1) สามารถคำนวณหาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \sigma_h &= \frac{P_i d_i}{2t} \\ \sigma_a &= \frac{P_i d_i}{4t} \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ P_i , σ_h และ σ_a คือ ความดันภายในภาชนะ (internal pressure) ความเค้นในแนวเส้นรอบวง (hoop stress) และความเค้นในแนวแกน (axial or longitudinal stress) ตามลำดับ จากสมการเราจะพบว่า $\sigma_h > \sigma_a$ สำหรับการพิสูจน์ทราบที่มาของสมการ (2) นั้นผู้เรียนสามารถค้นคว้าได้ในหนังสือกลศาสตร์ของวัสดุ



รูปที่ 2 ภาพขณะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายใน โดยที่เอลิเมนต์ความเค้นมีองค์ประกอบความเค้นเฉพาะในแนวแกน x และ y เท่านั้น ปัญหานี้จึงถูกกำหนดให้เป็นปัญหาระนาบ (plane stress problem)

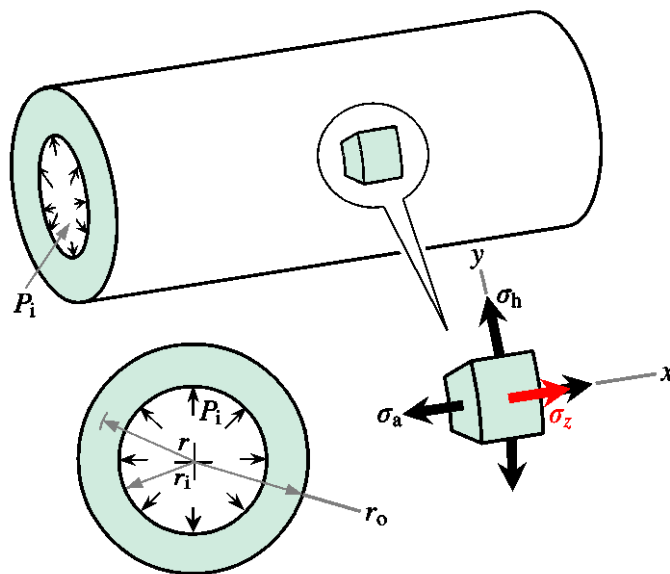
ภาพขณะทรงกระบอกผนังหนา

แม้ว่าสมการ (2) จะใช้ออกแบบภาพขณะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันได้ในเบื้องต้นก็ตาม แต่ก็อาจมีความคลาดเคลื่อนสูง แนวคิดการวิเคราะห์ปัญหาจึงพิจารณาตามความหนาของผนังซึ่งไม่สามารถกำหนดให้เป็นปัญหาระนาบ คือ มีค่าความเค้นในแนวแกน z และแปรเปลี่ยนค่าตามความหนาของผนังภาพขณะ (รูปที่ 3) ซึ่งเรียกว่า ‘ทฤษฎีผนังหนา’ ความเค้นทั้งสามองค์ประกอบหาได้จากสูตรดังนี้ (Budynas & Nisbett, 2008)

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \frac{P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \\ \sigma_z &= \frac{P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \\ \sigma_a &= \frac{P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\end{aligned}\quad (3)$$

การได้มาซึ่งสมการ (3) นั้นต้องอาศัยทฤษฎีสถาพยืดหยุ่น (theory of elasticity) ที่มีความซับซ้อนพอควรและยังต้องใช้องค์ความรู้ทางด้านคณิตศาสตร์ชั้นสูง อย่างไรก็ตามผู้เรียนสามารถค้นคว้าหาอ่านได้เพิ่มเติม สมการ (3) ในรูปแบบดั้งเดิมนั้นจะประกอบด้วยพจน์ต่าง ๆ ที่คำนึงถึงผลของความดันภายใน และความดันภายนอก (P_o) ซึ่งตัวอย่างของกรณีนี้ที่เห็นได้อย่างชัดเจนคือ การวางท่อผนังหนาใต้ดินหรือใต้น้ำ สำหรับกรณีที่ไม่มีค่าความดันภายนอกจะทำต่อภาพขณะทรงกระบอก พจน์หนึ่งในสมการ (3) ที่แสดงถึงผลที่เกิดจากความดันภายนอกก็จะหายไปตามหลักคณิตศาสตร์

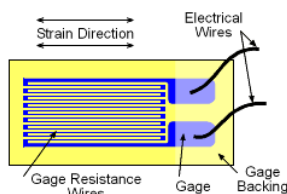
นอกจากนี้พึงสังเกตว่า ความเค้น σ_z ในสมการ (3) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ (0) ที่ผิวด้านนอกของภาพขณะทรงกระบอก ขณะที่ความเค้น σ_h จะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (0) และความเค้น σ_a จะมีค่าเท่ากับตลอดความยาวของภาพขณะทรงกระบอกนั้น



รูปที่ 3 ภาพทรงกระบอกผนังหนาภายใต้ความดันภายในโดยที่เอลิเมนต์ความเค้นมีองค์ประกอบความเค้นทั้งสามแนวแกน x - y - z

มาตรวัดความเครียดและสมการความเค้นที่เกี่ยวข้อง (Strain Gauge and Related Equations)

มาตรวัดความเครียด (รูปที่ 4) ทำมาจากเส้นลวดที่สามารถยืดหรือหดตัวได้โดยการยืดหรือหดตัวนี้จะทำให้สมบัติทางไฟฟ้ากล่าวคือ ความต้านทานทางไฟฟ้า (electrical resistance) เปลี่ยนแปลงไป ผลของการเปลี่ยนแปลงนี้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และความเครียดที่เกิดขึ้นในวัตถุนั้น ดังนั้นหากนำมาตรวัดความเครียดนี้ไปแปะติดกับผิวของวัตถุใด ๆ เราก็สามารถหาค่าความเครียดได้โดยอาศัยการตรวจวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปนี้

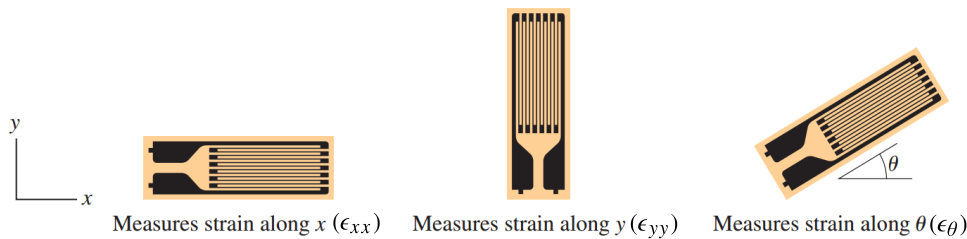


รูปที่ 4 มาตรวัดความเครียด (Gramoll, n.d.)

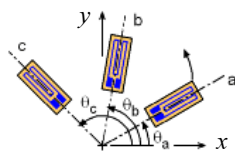
เนื่องด้วยมาตรวัดความเครียดสามารถวัดค่าความเครียดได้แนวแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้น (รูปที่ 5) และเพียงตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเท่านั้น เราจึงสามารถหาค่าความเครียดจาก ϵ_{xx} และ ϵ_{yy} ได้ด้วยมาตรวัดค่าความเครียดสองอัน อย่างไรก็ตามเราไม่สามารถใช้มาตรวัดความเครียดในรูปที่ 1 เพื่อหาค่าความเครียดเฉือน γ_{xy} ได้โดยตรง ซึ่งทำให้เราไม่สามารถวิเคราะห์ปัญหาความเค้นระนาบได้ เนื่องจากต้องอาศัยองค์ประกอบความเครียดสามตัว คือ ϵ_{xx} , ϵ_{yy} และ γ_{xy} ดังนั้นเราจึงต้องหาวิธีการอื่น ๆ ที่จะช่วยให้เราหาค่าความเครียดเฉือน

หากย้อนกลับไปพิจารณาเรื่องที่ผู้เรียนได้เรียนรู้มาแล้วเกี่ยวกับเรื่องการแปลงความเครียด (strain transformation) ก็จะพบว่า ความเครียดที่มุมใด ๆ ก็ตามในแกนพิกัด x - y กล่าวคือ ϵ_θ จะมีค่าขึ้นอยู่กับ ϵ_{xx} , ϵ_{yy} และ γ_{xy} ด้วยเหตุนี้หากเราใช้มาตรวัดความเครียดสามอันที่ถูกจัดให้อยู่ในชุดเดียวกันแปะติดลงบนผิววัตถุในตำแหน่งเดียวกันแต่ทิศทางต่างกัน เราจะสามารถหาค่าความเครียด ϵ_{xx} , ϵ_{yy}

และ γ_{xy} ได้ ซึ่งชุดของมาตรวัดความเครียดสามอันดังกล่าวเรียกว่า ชุดมาตรวัดความเครียด (strain gauge rosettes) (รูปที่ 6) หากกล่าวตามหลักคณิตศาสตร์ก็คือว่า วัดค่าความเค้นจริงอย่างน้อยสามค่า เนื่องด้วยตัวแปรที่เราไม่ทราบค่ามีทั้งหมดสามตัวแปร



รูปที่ 5 ทิศทางการวัดความเครียด (Steif, 2012)



รูปที่ 6 ชุดมาตรวัดความเครียดที่วางทำมุมต่างกันเทียบกับแกน x (Gramoll, n.d.)

จากรูปที่ 6 ความเครียดที่แต่ละมาตรวัดจะวัดได้คือ

$$\begin{aligned}\epsilon_a &= \epsilon_{xx} \cos^2 \theta_a + \epsilon_{yy} \sin^2 \theta_a + \gamma_{xy} \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \epsilon_b &= \epsilon_{xx} \cos^2 \theta_b + \epsilon_{yy} \sin^2 \theta_b + \gamma_{xy} \sin \theta_b \cos \theta_b \\ \epsilon_c &= \epsilon_{xx} \cos^2 \theta_c + \epsilon_{yy} \sin^2 \theta_c + \gamma_{xy} \sin \theta_c \cos \theta_c\end{aligned}\quad (4)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้น หากเราทราบค่า ϵ_a , ϵ_b และ ϵ_c และมุม θ_a , θ_b และ θ_c เราก็สามารถหาค่าความเครียด ϵ_{xx} , ϵ_{yy} และ γ_{xy} ได้ทันที นอกจากนี้สมการ (4) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_a \\ \epsilon_b \\ \epsilon_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_a & \sin^2 \theta_a & \sin \theta_a \cos \theta_a \\ \cos^2 \theta_b & \sin^2 \theta_b & \sin \theta_b \cos \theta_b \\ \cos^2 \theta_c & \sin^2 \theta_c & \sin \theta_c \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}\quad (5)$$

ซึ่งอาจใช้วิธีการเมทริกซ์หรือการคำนวณด้วยมือได้เช่นกัน พึงสังเกตว่า หากเราเลือกค่ามุมของมาตรวัดตามลำดับเป็น $\theta_a = 0^\circ$, $\theta_b = 45^\circ$ และ $\theta_c = 90^\circ$ ก็จะเรียกว่า ชุดมาตรวัดความเครียดแบบมุมฉาก (rectangular rosettes) และหากเลือกค่ามุมเป็น $\theta_a = 0^\circ$, $\theta_b = 60^\circ$ และ $\theta_c = 120^\circ$ ก็จะเรียกว่า ชุดมาตรวัดความเครียดแบบเดลตา (delta rosettes)

หลังจากนั้นเราสามารถคำนวณหาความเครียดหลัก (principal strains) ϵ_1 และ ϵ_2 ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2}\quad (6)$$

และค่าความเค้นหลัก (principal stresses) σ_1 และ σ_2 ดังนี้

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1-\nu^2} (\nu\epsilon_1 + \epsilon_2)\end{aligned}\quad (7)$$

โดยที่ ν คือค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ทั้งนี้พึงระลึกว่า $\sigma_1 \geq \sigma_2$ และในกรณีความเค้นสามแนวแกน $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$

งานมอบหมาย (Assignment)

ผู้เรียนแต่ละกลุ่มจะได้ทดลองหาค่าความเค้นหลักในภาชนะทรงกระบอกผนังภายใต้ความดันภายใน การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) เพื่ออธิบายสภาพปัญหาความเค้นระนาบในภาชนะทรงกระบอกผนังบางภายใต้ความดันภายใน
- 2) เพื่อคำนวณหาความเค้นหลักจากความเครียดหลักที่ได้จากมาตรวัดความเครียด
- 3) เพื่อเปรียบเทียบความเค้นหลักที่คำนวณจากสมการความเค้น โดยอาศัยทฤษฎีผนังบางและทฤษฎีผนังหนากับความเค้นหลักที่คำนวณจากความเครียดหลักซึ่งได้มาจากมาตรวัดความเครียด

ชุดทดลองประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ คือ ชุดภาชนะทรงกระบอกผนังบางที่มีปั๊มสร้างความดันภายใน ตัวปรับสภาพการเป็นท่อหรือถัง และมาตรวัดความดัน และชุดอ่านค่าข้อมูลความเครียดมาตรวัดความเครียดทั้งหมด 10 อัน (เชื่อมต่อกับ 5 ช่องสัญญาณของชุดอ่านค่าข้อมูลความเครียดซึ่งทำให้ได้ค่าความเครียดทั้งหมด 5 ค่า) ถูกติดตั้งที่ผิวภาชนะทรงกระบอกผนังบางตามมุมต่าง ๆ ในแนวเส้นรอบวงเดียวกัน

สำหรับภาพรวมการทดลอง ผู้เรียนสร้างแรงดันภายในภาชนะทรงกระบอกตามที่กำหนดจนเกิดความเครียด จากนั้นบันทึกค่าความเครียดที่ได้ ในการคำนวณผู้เรียนสามารถเลือกใช้เพียง 3 ค่าโดยแทนในสมการเพื่อหาความเครียดในพิกัด $x-y$ (ดูหัวข้อการวิเคราะห์) และคำนวณหาความเครียดหลัก และความเค้นหลักต่อไป จากนั้นผู้เรียนเปรียบเทียบค่าความเค้นหลักที่ได้จากความเค้นเครียดหลักกับความเค้นในภาชนะทรงกระบอกผนังบางในหนังสือกลศาสตร์วัสดุ

ขั้นตอนการทดลองในภาพรวมเป็นดังนี้

- 1) ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับชุดอ่านค่าข้อมูลความเครียด และต่อสายส่งสัญญาณระหว่างชุดชุดอ่านค่าข้อมูลความเครียดกับชุดภาชนะทรงกระบอกผนังบาง
- 2) เปิดสวิทช์ให้ชุดอ่านค่าข้อมูลความเครียดทำงานและปรับตั้งตัวเองประมาณ 5-10 นาที จนกระทั่งตัวเลขที่แสดงบนหน้าจอของชุดอ่านค่าข้อมูลความเครียดหยุดนิ่ง ทั้งนี้ให้มั่นใจว่ามาตรวัดความดันแสดงค่าอยู่ที่ศูนย์ (0)
- 3) เลือกลักษณะของปัญหาที่ต้องการทดลอง คือ ท่อหรือถัง โดยการหมุนตัวปรับสภาพการเป็นท่อหรือถัง หากเลือกเป็นท่อก็ให้หมุนตัวปรับตามเข็มนาฬิกา แต่หากเลือกเป็นถังก็ให้หมุนตัวปรับนั้นในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

- 4) ปรับตั้งค่าศูนย์ (0) ของระดับความดันโดยอาศัยปั๊มสร้างความดันภายใน และปรับตั้งค่าศูนย์ (0) ของมาตรวัดความเครียดทั้ง 5 ช่องสัญญาณที่ชุดอ่านค่าข้อมูลความเครียดโดยอาศัยไขควงขนาดเล็กหมุนความต้านทานแบบปรับค่าได้ของแต่ละช่องจนหน้าปัดของชุดอ่านความเครียดอ่านค่าเป็นศูนย์ (0)
- 5) สร้างความดันภายในภาชนะทรงกระบอกด้วยปั๊มสร้างความดันภายในตามค่าความดันที่กำหนดให้ทั้งนี้ต้องไม่เกิน 35 bar
- 6) บันทึกค่าความเครียดในแต่ละช่องสัญญาณจนครบทั้ง 5 ช่อง
- 7) ลดความดันลงจนเหลือศูนย์ (0) และบันทึกค่าความเครียดในแต่ละช่องสัญญาณจนครบทั้ง 5 ช่องอีกครั้ง
- 8) นำค่าความเครียดที่ได้ในข้อ 6) ลบด้วยค่าความเครียดในข้อที่ 7) ตามหลักพีชคณิต
- 9) นำค่าความเครียดที่ได้ในข้อ 8) คูณด้วยค่าคงที่ 0.1666×10^{-6} ค่าความเครียดที่ได้นี้คือค่าความเครียดจริงที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้นต่อไป
- 10) เขียนรายงานการทดลอง

การวิเคราะห์ (Analysis)

ผู้เรียนเริ่มต้นการคำนวณโดยอาศัยสมการความเค้นที่วัดจริงด้วยมาตรวัดความเครียดและข้อมูลประกอบการทดลองดังตารางที่ 1 ทั้งนี้แต่ละกลุ่มผู้เรียนจะได้รับมอบหมายลักษณะของมาตรวัดความเครียดต่างกันตามความเหมาะสม

ตารางที่ 1 ข้อมูลประกอบการทดลอง

วัสดุที่ใช้ทำภาชนะทรงกระบอก	อะลูมิเนียม
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	76 mm
ความหนาของผนังภาชนะทรงกระบอก	3 mm
ค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น	72 GPa
ค่าอัตราส่วนปัวซอง	0.33

ผู้เรียนควรเริ่มต้นการวิเคราะห์ด้วยการคำนวณหาค่าองค์ประกอบความเครียด ϵ_{xx} , ϵ_{yy} และ γ_{xy} โดยอาศัยสมการ (4) หรือสมการ (5) รวมทั้งค่าความเครียดหลักโดยสมการ (6) และค่าความเค้นหลักโดยสมการ (7) ด้วยมือหรือด้วยคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามผู้เรียนต้องแสดงขั้นตอนการคำนวณ (steps of calculation) ให้เห็นได้อย่างชัดเจน จากนั้นเปรียบเทียบค่าความเค้นหลักที่ได้กับค่าความเค้นที่คำนวณได้จากทฤษฎีผนังบางโดยสมการ (2) และจากทฤษฎีผนังหนาโดยสมการ (3) ผู้เรียนอาจแสดงผลด้วยกราฟใด ๆ ก็ได้ตามความเหมาะสมในหลักของการนำเสนอข้อมูลเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจ และแสดงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างในค่าความเค้นเหล่านั้น

เนื้อหาที่ควรค้นคว้าและอ่านเพิ่มเติม (Additional Topics)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในสาระความรู้อย่างลึกซึ้ง ผู้เรียนควรทบทวนในเนื้อหาต่อไปนี้ คือ ปัญหาความเค้นระนาบ (plane stress problem) ปัญหาความเครียดระนาบ (plane strain problem) การแปลง

ความเค้น (stress transformation) การแปลงความเครียด (strain transformation) และชุดมาตรวัดความเครียด (strain gauge rosettes)

รายงาน (Report)

หลังจากการทดลองเสร็จสิ้น ผู้เรียนต้องจัดเตรียมรายงานการทดลองภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ เป้าประสงค์ (purpose) ของการเขียนรายงานคือ การสื่อสารสารสนเทศ (information) เกี่ยวกับสิ่งที่ผู้เรียนได้ลงมือทำในการทดลอง ซึ่งแสดงถึงสิ่งที่ได้เรียนรู้และทักษะที่ได้ฝึกปฏิบัติตามที่ได้กล่าว รายงานที่ดีเป็นอะไรที่มีความหมายมากกว่าหรือลึกซึ้งกว่าแค่การนำเสนอข้อมูล (data) เพียงอย่างเดียว รายงานช่วยหรือแสดงให้เห็นว่าผู้เขียนมีความเข้าใจอย่างลึกซึ้งมากขึ้นเพียงใดในแนวคิดรวบยอด (concept) ที่อยู่เบื้องหลังข้อมูลเหล่านั้น ด้วยเหตุนี้การเขียนรายงานจึงเป็นโอกาสที่ดียิ่งที่ผู้เรียนจะได้ฝึกการปฏิบัติการเขียนเพื่อเสริมวิธีการคิด และการเรียบเรียงเพื่อการสื่อสารอย่างมีประสิทธิภาพ การเขียนรายงานและส่งให้ผู้สอนเพียงหนึ่งครั้งอาจทำให้ผู้เรียนไม่ได้ใช้โอกาสแห่งการฝึกปฏิบัติอย่างเต็มที่ และเพื่อให้บรรลุเป้าประสงค์ข้างต้น ผู้เรียนอาจต้องเขียนรายงานการทดลองหลายครั้ง ทั้งนี้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้สอนเท่าที่จำเป็นและเป็นไปได้

รายงานประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ

- รายงานอย่างย่อ (brief report) คือ รายงานที่แสดงการสรุปความทั้งหมดจากรายงานฉบับเต็ม รวมทั้งตารางและรูปภาพ โดยมีเนื้อหาทั้งหมดไม่เกินหนึ่งหน้าครึ่งของกระดาษ A4 ทั้งนี้จุดมุ่งหมายของรายงานอย่างย่อก็เพื่อให้ผู้อ่านซึ่งมีเวลาน้อยสามารถอ่านและเข้าใจสิ่งที่เราได้ทำได้
- รายงานฉบับเต็ม (full report) คือ รายงานที่แสดงรายละเอียดทั้งหมดเกี่ยวกับการทดลอง ซึ่งมีองค์ประกอบตามที่กำหนดไว้ คือ
 - 1) ชื่อการทดลอง (Title)
 - 2) วัตถุประสงค์ (Objectives)
 - 3) บทคัดย่อ (Abstract)
 - 4) ทฤษฎี (Theory)
 - 5) อุปกรณ์การทดลอง (Apparatus)
 - 6) วิธีการทดลอง (Procedures)
 - 7) ผลการทดลอง (Data and results)
 - 8) สรุปผลการทดลอง (Conclusion)
 - 9) วิเคราะห์และข้อเสนอแนะ (Discussion)
 - 10) เอกสารอ้างอิง (Reference)

ในการเตรียมรายงานการทดลองให้ผู้เรียนเตรียมด้วยโปรแกรมประมวลผลคำ เช่น MS-Words และหากต้องแสดงกราฟ ก็ให้สร้างกราฟด้วยโปรแกรมที่เหมาะสม

รายละเอียดขององค์ประกอบของรายงานฉบับเต็ม

เพื่อช่วยให้ผู้เรียนได้จัดเตรียมรายงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้เรียนรู้ในเนื้อหาสาระและฝึกปฏิบัติในทักษะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง แต่ละส่วนต่อไปนี้จะนำเสนอรายละเอียดในแต่ละองค์ประกอบของรายงานฉบับเต็ม

- 1) **ชื่อการทดลอง** : ส่วนนี้บอกผู้อ่านเกี่ยวกับสาระของรายงานเพียงประโยคหรือวลีสั้น ๆ โดยใช้ภาษาที่เป็นทางการ ชัดเจนตรงไปตรงมา และครอบคลุมประเด็นของเรื่องและมีความหมาย กล่าวคือ อาจประกอบด้วยตัวแปรต้น หรือตัวแปรตามที่น่าสนใจ วิธีการที่ใช้ รวมทั้งเป้าหมาย เช่น ‘การออกแบบระบบการวัดและการแสดงผลอุณหภูมิโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น A123’ หรือ ‘การหาความเค้นในภาชนะทรงกระบอกผนังบางบนหลักการปัญหาความเค้นระนาบด้วยชุดมาตรวัดความเครียด’
- 2) **วัตถุประสงค์** : ส่วนนี้ระบุถึงเหตุผลของการทดลองว่าดำเนินการไปเพื่อสิ่งใด ทั้งนี้ผู้เรียนต้องมั่นใจว่า เมื่อดำเนินการทดลองแล้วการปฏิบัติกิจกรรมต่าง ๆ ในการทดลองจะช่วยให้ผู้เรียนตอบหรือพิสูจน์ทราบวัตถุประสงค์เหล่านั้นได้อย่างชัดเจน จำนวนวัตถุประสงค์ควรมีอยู่ประมาณ 3 – 4 ข้อ ซึ่งถือว่าไม่มากและไม่น้อยเกินไป การเขียนวัตถุประสงค์อาจใช้ข้อมูลจากชื่อเรื่อง (ดูหน้าที่ 7)
- 3) **บทคัดย่อ** : ส่วนนี้สรุปประเด็นหรือสาระสำคัญที่ทำให้เห็นภาพรวมทั้งหมดของงานผ่านองค์ประกอบสำคัญ คือ 1) เป้าประสงค์ของการทดลอง 2) ทฤษฎีและวิธีการทดลอง 3) ข้อค้นพบหรือผลการทดลองสำคัญ 4) จุดที่สำคัญที่สุดในการอภิปราย และ 5) บทสรุปสำคัญ โดยทั้งหมดนี้ควรสั้น กระชับ และมีความยาวไม่เกิน 15 บรรทัด นอกจากนี้ต้องใส่คำสำคัญ (Keyword) ซึ่งเป็นคำศัพท์เฉพาะทางที่เห็นแล้วเข้าใจได้ทันทีว่ารายงานนี้เกี่ยวกับเรื่องใดประมาณ 4 ถึง 5 คำ
- 4) **ทฤษฎี/บทนำ** : ส่วนนี้บอกเล่ารายละเอียดเกี่ยวกับเป้าหมายของการทดลอง รวมทั้งองค์ความรู้พื้นฐานที่สนับสนุนการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยหลักการ ทฤษฎี และสูตรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งแนวทางการทดลองอย่างย่อที่จะนำไปสู่การบรรลุวัตถุประสงค์
- 5) **อุปกรณ์การทดลอง** : ส่วนนี้ระบุรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ เครื่องมือ และวัสดุต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทดลอง ผู้เรียนอาจใช้รูปประกอบเพื่อให้ผู้อ่านเห็นภาพและเข้าใจมากยิ่งขึ้น
- 6) **วิธีการทดลอง** : ส่วนนี้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการทดลองโดยละเอียด และเป็นลำดับที่ถูกต้อง ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าหากผู้อ่านจะลองทำซ้ำก็จะสามารถทดลองได้ทันที
- 7) **ผลการทดลอง** : ส่วนนี้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับผลที่ได้จากการทดลองตามขั้นตอนที่แสดงไว้ในข้อ 6) รวมทั้งวิธีการคำนวณ ทั้งนี้หากวิธีการคำนวณนั้นมีความยาวมาก ผู้เรียนอาจยกตัวอย่างการคำนวณเพียงหนึ่งตัวอย่าง ส่วนที่เหลือให้นำไปใส่ไว้ในภาคผนวกท้ายรายงาน
- 8) **สรุปผลการทดลอง** : ส่วนนี้นำเสนอรายละเอียดผลการทดลองให้เป็นสารสนเทศในรูปแบบตัวเลข กราฟ ตาราง หรือรูปภาพแบบใดแบบหนึ่งหรือทั้งหมดรวมกัน ทั้งนี้เพื่อเป้าหมายแห่งการสื่อสารผลการทดลองให้ผู้อ่านได้เข้าใจ ทั้งนี้ผู้เรียนอาจระบุผลที่สำคัญซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์
- 9) **วิจารณ์และข้อเสนอแนะ** : ส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งที่แสดงถึงความเข้าใจของผู้เรียนในสาระความรู้เชิงลึกที่อยู่เหนือกว่าเพียงแค่การปฏิบัติการทดลองให้แล้วเสร็จ ผู้เรียนอาจใช้การอธิบาย การวิเคราะห์ และการแปลความ เป็นหลักในการเขียนส่วนนี้ ในการวิเคราะห์ผู้เรียนอาจตั้งคำถามแก่ตนเอง เช่น ผลการทดลอง

และข้อสรุปนั้นแสดงให้เห็นอะไรบ้างที่เด่นชัด? หรือ ผู้เรียนค้นพบอะไรที่สำคัญ? หรือในการแปลความผู้เรียนอาจตั้งคำถาม สิ่งที่คุณพบนั้นสำคัญกับอะไรอย่างไร? การอธิบายทั้งหมดนี้ให้เปรียบเทียบหรืออ้างถึงหลักการ ทฤษฎี และสูตรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 4) และวัตถุประสงค์ที่ได้ระบุไว้ในส่วนนี้ผู้เรียนต้องแสดงรายละเอียดการวิจารณ์เกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทดลอง (experimental error) ซึ่งแบ่งได้สองลักษณะ คือ ความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (random error) และความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (systematic error) ทั้งนี้ผู้เรียนต้องไม่เขียนหรือแสดงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตนเอง (human error) ในรายงานโดยเด็ดขาด ในกรณีที่มีคำถามท้ายการทดลอง ก็ให้ผู้เรียนเขียนตอบได้ในส่วนนี้

นโยบายเกี่ยวกับการคัดลอกผลงาน (Policy on Plagiarism)

ในการประลองเกี่ยวกับความคืบหน้าในภาระงานของนักเรียน ผู้สอนมุ่งมั่นที่จะให้ผู้เรียนได้เรียนรู้และฝึกปฏิบัติทักษะต่าง ๆ ที่สำคัญและจำเป็นต่อการทำงานและดำเนินชีวิตในอนาคต ดังนั้นจึงเชื่อเชิญให้ผู้เรียนเขียนรายงานการประลองด้วยตนเอง โดยอาศัยข้อมูลและรายละเอียดที่ได้อธิบายข้างต้นและแบบประเมินรูปрик (ที่เว็บไซต์) เป็นแนวทางและผู้เรียนสามารถทำซ้ำและรับการประเมินซ้ำได้ตามความเหมาะสม ทั้งนี้แนวทางที่กล่าวไว้นี้เป็นไปเพื่อการพัฒนาศักยภาพและความสามารถของตัวผู้เรียนเอง

อย่างไรก็ตามหากตรวจแล้วพบว่า มีการคัดลอกรายงานกันระหว่างผู้เรียนด้วยกัน ผู้สอนจะไม่ประเมินรายงานเหล่านั้น ทั้งนี้ผู้เรียนสามารถแก้ไขได้ภายในก่อนสิ้นภาคการศึกษาที่ 2/59 อย่างน้อย 1 สัปดาห์ สำหรับผู้เรียนที่คัดลอกรายงานกัน ผู้สอนจะมีมาตรการช่วยเหลืออื่นใดต่อไปเพื่อช่วยให้ผู้เรียนไม่กระทำเช่นนั้น เช่น การให้คำปรึกษาพิเศษหากพบสาเหตุของการคัดลอกรายงานมาจากเวลาไม่เพียงพอ หรือมีงานที่ต้องทำส่งจำนวนมาก ขอให้ผู้เรียนระลึกไว้เสมอว่า การเรียนรู้เป็นไปเพื่อการพัฒนา

นโยบายเกี่ยวกับการประเมิน (Policy on Assessment)

ในด้านสาระความรู้ (discipline) ของกลศาสตร์ประยุกต์ ผู้เรียนจะต้องพิสูจน์ตัวเองให้ได้ว่า ตนเองบรรลุผลการเรียนรู้รายวิชา (CLOs) ซึ่งได้ระบุไว้แล้วอย่างชัดเจนที่เว็บไซต์ จำนวนครั้งในการประเมินแต่ละผลการเรียนรู้รายวิชานั้นขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้เรียนกับผู้สอน ทั้งนี้ตามหลักการประเมินควรวัดอย่างน้อยสามครั้ง

อนึ่งหากมีการจัดสอบนอกเหนือจากตารางสอบปกติที่กำหนดไว้โดยมหาวิทยาลัย ผู้เรียนจะต้องเป็นผู้ดำเนินการสอบด้วยตนเอง กล่าวคือ ผู้เรียนต้องดูแลตนเองโดยตั้งอยู่บนหลักของการเป็นมนุษย์ที่ดี มีความซื่อสัตย์ สุจริต และทำในสิ่งที่ถูกต้อง ขอให้ผู้เรียนระลึกไว้เสมอว่า สถานการณ์เหล่านี้เป็นสถานการณ์จริงในชีวิตที่ผู้เรียนต้องเผชิญและรู้อยู่แก่ใจ อย่างไรก็ตามหากมีผู้ร้องเรียนเกี่ยวกับการทำในสิ่งที่ไม่ถูกต้องในการสอบ ผู้สอนจะให้การสอบนั้นเป็นโมฆะ แต่ผู้เรียนทุกคนยังมีโอกาสได้สอบใหม่ทั้งนี้ก่อนสิ้นภาคการศึกษา...ขอให้ผู้เรียนทุกคนจงใช้โอกาสนี้ในการฝึกและทำในสิ่งที่ถูกต้องทั้งต่อตนเอง ภาควิชา คณะ มหาวิทยาลัย และสังคมไทย

Bibliography

- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (8 ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Cerbos. (2017, Jan 19). *Aquasystem Pressure Tank*. Retrieved from Pressure Tank:
<http://www.cerbos.ee/en/pressure-tanks/530-pressure-tank-50-l-aquasystem-vao50.html>
- Gramoll, K. (n.d.). *MECHANICS - THEORY*. Retrieved Jan 16, 2017, from eCourses:
https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap_sec=08.3&page=theory
- SKF. (n.d.). *Hydraulic cylinders*. Retrieved Jan 19, 2017, from Product:
<http://www.skf.com/group/products/seals/industrial-seals/hydraulic-seals/general-technical-information/introduction-to-fluid-power/hydraulic-seals-and-guides/index.html>
- Steif, P. (2012). *Mechanics of Materials*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Higher Education.