

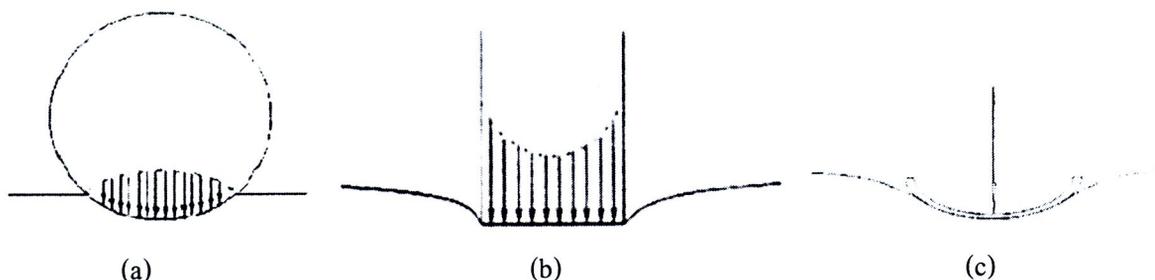
## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษากระบวนการขันแน่นของ ฝาปิด เบื้องต้นจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการขันแน่น ได้แก่ การสัมผัสกันระหว่างชิ้นงาน สมบัติของวัสดุแต่ละชนิด การขยายตัวเนื่องจากความร้อน แรงกระทำภายในสกรู รวมทั้งกระบวนการในการประกอบ ฝาปิด เข้ากับ ตัวฐาน เพื่อให้การวิเคราะห์ และการประมวลผลเป็นไปอย่างถูกต้อง

### 2.1 ทฤษฎีกลศาสตร์ของการสัมผัสแบบยืดหยุ่น (Mechanics of Elastic Contacts)

การจำลองขันสกรูเพื่อยึดฝาปิด กับฐานนั้น ในการวิเคราะห์ต้องใช้ทฤษฎีกลศาสตร์ของการสัมผัสแบบยืดหยุ่น โดยกำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างสกรูกับฝาปิด และฐาน เป็นพื้นที่ (Contact surfaces) และการแบ่งประเภทของการสัมผัสสามารถแบ่งได้หลายแบบโดยใช้เกณฑ์การแบ่งที่แตกต่างกันไป [7] เช่น การแบ่งตามลักษณะความเค้นที่เกิดขึ้น ซึ่งแบ่งได้เป็น

- Incomplete contact เมื่อวัตถุ 2 ชิ้นถูกกดเข้าด้วยกัน การสัมผัสเริ่มแรกจะเป็นแบบจุด พื้นที่การสัมผัสจะขยายกว้างเมื่อเพิ่มแรงกด ลักษณะความเค้นสัมผัสระหว่างผิวสัมผัสที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1(a) โดยที่ขนาดของความเค้นสัมผัสจะลดลงอย่างต่อเนื่องและมีค่าเป็นศูนย์ที่ขอบเขตของพื้นที่สัมผัส ตัวอย่างเช่น การสัมผัสระหว่างพื้นเกียร์ การสัมผัสระหว่างล้อกับราง เป็นต้น
- Complete contact ลักษณะของการสัมผัสที่เกิดขึ้นคือ พื้นที่ในการสัมผัสจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงกด ดังรูปที่ 2.1(b) กล่าวคือเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นหรือลดลงพื้นที่ในการรับแรงจะยังคงเท่าเดิม ตัวอย่างเช่น การกด Punch บนชิ้นงาน โดยสมมุติว่า Punch เป็นวัตถุแข็งเกร็ง ลักษณะความเค้นสัมผัสที่เกิดขึ้นจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่าสูงสุดที่ขอบของพื้นที่สัมผัส
- Receding contact การสัมผัสแบบนี้ไม่ค่อยพบกันมากนัก ลักษณะที่สำคัญคือพื้นที่ในการสัมผัส (Contact Area) ลดน้อยลงเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น เช่นการกดแผ่นเสียบบนพรม เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1(c)



รูปที่ 2.1 ลักษณะความดันสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการสัมผัสแบบ (a) Incomplete contact  
(b) Complete contact และ (c) Receding contact [7]

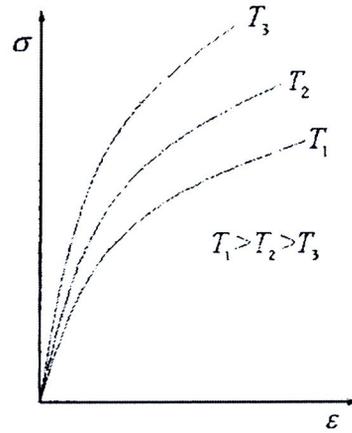
## 2.2 สมบัติวัสดุ

สมบัติที่สำคัญของวัสดุ เช่น Young's modulus ( $E$ ) หรือ Yield strength จะหาได้จากกราฟของความเค้นความเครียด หรือ Flow curve ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile test) หรือทดสอบแรงอัด (Compressive test) เป็นต้น จากการศึกษพบว่า Flow curve ของวัสดุจะเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการทดสอบที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate,  $\dot{\epsilon}$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ) ที่ต่างกัน โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

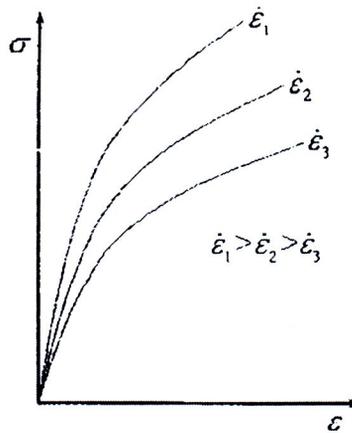
$$\sigma = \sigma^*(T, \dot{\epsilon}) + \sigma_G(G) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ ความเค้น  $\sigma^*$  คือ ความเค้นที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด  $\sigma_G$  คือ ความเค้นที่ขึ้นอยู่กับมอดูลัสเฉือน  $G$  คือ มอดูลัสเฉือนของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสมบัติการยืดหยุ่นของวัสดุ ( $E, G, \nu$ ) จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ผลกระทบของอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่มีผลต่อ Flow curve ของวัสดุจะเป็นดังนี้

- ผลของอุณหภูมิ จากการตรวจสอบเพื่อหา Flow curve ของวัสดุชนิดเดียวที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิสูงความแข็งแรงของวัสดุจะลดลง ดังรูปที่ 2.2 จากการศึกษพฤติกรรมในระดับอะตอมพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุจะทำให้ขนาดการสั่นของอะตอมสูงขึ้นโดยที่ความถี่ในการสั่นไม่เปลี่ยนแปลง (ประมาณ 10<sup>13</sup> ครั้งต่อวินาที) ซึ่งผลดังกล่าวทำให้ตำแหน่งสมดุลในการยึดเกาะของแต่ละอะตอมขยายออก
- ผลของการเปลี่ยนแปลงความเครียด เมื่อวัสดุมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดสูงขึ้น จะทำให้ Flow curve ของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงให้ความเค้นที่สูงขึ้นดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลง Flow curve [8]



รูปที่ 2.3 ผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อการเปลี่ยนแปลง Flow curve [8]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ของ Work hardening, อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain rate) และอุณหภูมิที่มีผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุ คือแบบจำลองพลาสติกของ Johnson-Cook ลักษณะความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sigma = (\sigma_0 + K\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ ความเค้นครากเริ่มต้น,  $T_r$ ,  $T_m$  และ  $T$  คืออุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว และอุณหภูมิ ณ ปัจจุบันตามลำดับ,  $\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$  คือ อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่ทดสอบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่อ้างอิง และ  $K, C, m, n$  คือ ค่าตัวแปรที่เป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุ

โดยสมการประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) ส่วนที่เป็นผลมาจาก Work hardening 2) ส่วนที่เป็นผลมาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียด และ 3) ส่วนเป็นผลมาจากอุณหภูมิ ซึ่งวัสดุแต่ละตัวจะมีการ

ตอบสนองต่อผลเหล่านี้ต่างกัน เช่น โลหะมีโครงสร้างเป็นแบบ BCC (Body-Centered Cubic) เช่น เหล็ก, Chromium, Molybdenum, Tungsten และวัสดุเป็น Ceramic จะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าโลหะที่มีโครงสร้างแบบ FCC (Face-Centered Cubic) เช่น อลูมิเนียม ทองแดง ทองคำ Nickel และ Stainless steel เป็นต้น

## 2.3 การขยายตัวของวัสดุ

วัสดุบางชนิดจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและจะหดตัวเมื่อคายความร้อน ขนาดของการขยายตัวเป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุ อัตราส่วนระหว่างขนาดของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปกับขนาดเดิมของวัสดุต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า "สัมประสิทธิ์ของการขยายตัว" วัสดุใดที่มีสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวมากจะขยายตัวได้มากกว่าวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวน้อย เช่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดันบรรยากาศเดียวกัน สังกะสี ตะกั่ว อะลูมิเนียม จะขยายตัวได้มากไปน้อยตามลำดับ ความรู้เรื่องการขยายตัวของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น การเว้นรอยต่อของรางรถไฟ การเว้นช่องว่างของหัวสะพาน การประดิษฐ์เทอร์โมมิเตอร์ และการติดตั้งเทอร์โมสแตตไฟฟ้า เพื่อใช้ควบคุมระดับอุณหภูมิของเครื่องใช้ไฟฟ้า

คำว่า สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ใช้ในสองลักษณะ

- เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน *เชิงปริมาตร*
- เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน *เชิงเส้น*

สมบัติเหล่านี้เกี่ยวข้องกันอย่างใกล้ชิด สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงปริมาตรสามารถวัดในทุกรัฐของ Condensed matter (สถานะของเหลวและของแข็ง) ส่วนการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงเส้นสามารถวัดได้ในสถานะของแข็งเท่านั้น

### สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงปริมาตร

สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงปริมาตร (บางครั้งเรียกง่าย ๆ ว่า สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อน,  $\beta$ ) คือ สมบัติทางเทอร์โมไดนามิก ของสารที่กำหนดโดย

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.3)$$

เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิ  $V$  คือ ปริมาตร  $\rho$  คือ ความหนาแน่น อนุพันธ์นี้หาที่ความดันคงที่  $P$  ดังนั้น  $\beta$  จึงเป็นการวัดอัตราของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ ความดันคงที่

สมการข้างต้นสามารถพิสูจน์ได้จาก

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{\rho}{m} \left( \frac{\partial V}{\partial \rho} \right)_P \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = \frac{\rho}{m} \left( -\frac{m}{\rho^2} \right) \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (2.3a)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของวัสดุ

การขยายตัวของ Crystalline material จะเกิดขึ้นเมื่อ สนามของแรงของผลึกแปลงมาจาก Perfect quadratic เท่านั้น ถ้าสนามของแรงเป็น Perfectly parabolic เองการขยายตัวจะไม่เกิดขึ้น

**สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงเส้น**

สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงเส้น ( $\alpha$ ) บอกความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด (Dimension) เชิงเส้นของวัสดุ หรือคือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของความยาว ( $L$ ) ต่อระดับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

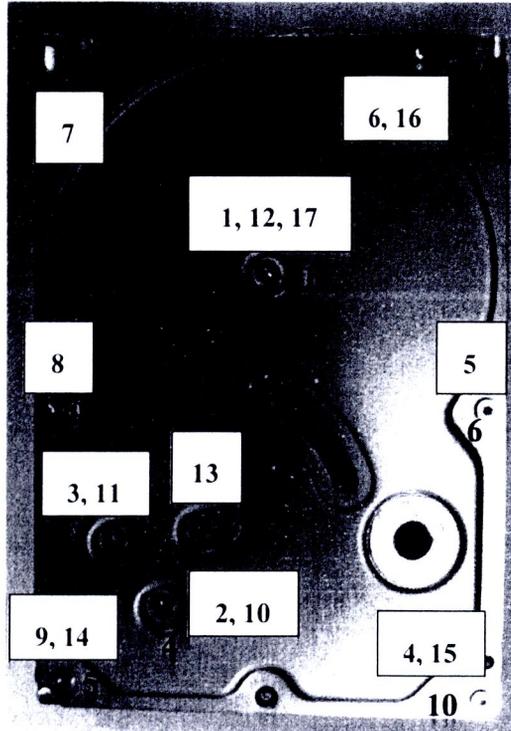
$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \quad (2.4)$$

## 2.4 กระบวนการขันเพื่อประกอบฟาสาร์ดิสก์กับฐาน

กระบวนการประกอบฝาปิด จะเริ่มจากการขันสกรู 10 ตัวที่แรงบิด 0.5 kgf.cm ด้วยไขควงไฟฟ้า หลังจากนั้นจะทำการขันแน่นด้วยค่าแรงบิด 6 kgf.cm ด้วย Automatic machine ตามลำดับ การขันที่กำหนดตามรูปที่ 2.4 ขั้นตอนที่สุดท้ายจะขันย้ำสกรูด้วยแรงบิด 8 kgf.cm ด้วย Manual driver ที่ตำแหน่ง 16 และ 17 ดังรูปที่ 2.4 รายละเอียดค่าแรงบิดที่ใช้ขันสกรูแสดงดังตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ลำดับ และค่าแรงบิดที่ใช้ในกระบวนการประกอบฝาปิด

ลำดับการขัน	ค่าแรงบิด(kgf.cm)	เครื่องมือที่ใช้ขัน	หมายเหตุ
1-10	0.5	Electric driver	หมายเลขสีดำ
1-15	6	Automatic machine	หมายเลขสีแดง
16	8	Manual driver	ขันย้ำโดยไม่ต้องคลายสกรู
17	8	Manual driver	คลายสกรูประมาณ 2 รอบ แล้วจึงขันย้ำ



รูปที่ 2.4 ลำดับการขันสกรู

## 2.5 แรงบิด และพรีโหลด (Preload) ที่ต้องการ

รอยต่อที่ยึดด้วยสลักเกลียวซึ่งต้องการพรีโหลดสูง ต้องพิจารณาถึงวิธีการที่ทำให้แน่ใจว่าเกิดพรีโหลดขึ้นจริง เมื่อประกอบชิ้นงาน ในกรณีที่สามารถวัดความยาวทั้งหมดของสลักเกลียวหลังจากการยึดประกอบกันด้วยไมโครมิเตอร์ หาส่วนยืดของสลักเกลียวที่เกิดจาก พรีโหลด ( $P$ ) ได้จากสูตร  $\delta = PL/AE$  เมื่อ  $L$  คือ ความยาว  $A$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวาง ดังนั้นเมื่อขันเป็นเกลียวจนกระทั่งสลักเกลียวยืดออกเท่ากับ  $\delta$  จะได้ค่าพรีโหลด ตามต้องการ

โดยทั่วไป ไม่สามารถวัดส่วนยืดของสกรูหรือหมุดเกลียวได้ ทั้งนี้เนื่องจากปลายของเกลียวมักจะอยู่ในรูตัน ในกรณีนี้ จึงต้องใช้ประแจวัดแรงบิด (Torque wrench) ขันสกรู แล้วอ่านค่าแรงบิดที่ทำให้เกิดพรีโหลดตามต้องการ ถึงแม้สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน อาจแปรผันอย่างมาก แต่ก็สามารถคาดคะเนแรงบิดที่ทำให้เกิดพรีโหลด ได้จากสมการ

$$T_q = \frac{Pd_m(\cos \alpha \tan \lambda + \mu_{hd})}{2(\cos \alpha - \mu_{hd} \tan \lambda)} + P\mu_{und} \frac{d_c}{2} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\alpha$  = มุมของเกลียวที่ทำกับแนวระนาบ

$\lambda$  = มุมหัดของเกลียว

$\mu_{hd}$  = สัมประสิทธิ์การเสียดทานของหน้าเกลียว

$$\begin{aligned}\mu_{und} &= \text{สัมประสิทธิ์การเสียดทานของหน้าสัมผัสได้หัวสลักเกลียว} \\ d_m &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเกลียว} \\ d &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่}\end{aligned}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแหวนรองใต้หัวเป็นเกลียวหกเหลี่ยม ก็คือ ความกว้างระหว่างด้านคู่ขนานของหัว (Width across flat) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.5 เท่าของขนาดระบุ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของบ่ากันรุนคือ  $d_c = 1.25d$  เมื่อจัดสมการ (2.5) ใหม่จะได้

$$T_q = \left[ \frac{d_m}{2d} \left( \frac{\cos \alpha \tan \lambda + \mu_{thd}}{\cos \alpha - \mu_{thd} \tan \lambda} \right) + 0.625 \mu_{und} \right] Pd \quad (2.5a)$$

จาก สมการ(2.5) ถ้าให้  $K$  เป็นสัมประสิทธิ์ของแรงบิด จะได้

$$K = \frac{d_m}{2d} \left( \frac{\cos(\alpha) \tan(\lambda) + \mu_{thd}}{\cos(\alpha) - \mu_{thd} \tan(\lambda)} \right) + 0.625 \mu_{und} \quad (2.6)$$

สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ขึ้นอยู่กับความเรียบของผิว ความประณีต และการหล่อลื่น พบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของบ่ากันรุนและในสลักเกลียว เมื่อผิวโลหะสัมผัสกับผิวโลหะมีค่าระหว่าง 0.4-0.8 และผิวหล่อลื่นมีค่าระหว่าง 0.005-0.20 ซึ่งค่าเฉลี่ยของ  $\mu_{thd}$  และ  $\mu_{und}$  ประมาณ 0.15 จากสมการ (2.6) จะได้ค่า  $K = 0.20$  แต่สำหรับเป็นเกลียวที่เป็นแผ่นราบ ควรใช้  $K = 0.15$  [9]