

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 ทฤษฎีลวดสปริง

จุดประสงค์ของการใช้สปริง ส่วนมากจะเป็นไปในรูปของการเก็บพลังงานเอาไว้ในตัวสปริง ความเค้นที่เกิดขึ้นในขณะที่สปริงใช้รับแรงจะมีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงต้องนำวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงมาใช้ทำสปริง โดยทั่วไปเหล็กสำหรับใช้ทำสปริงจะเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนสูงกว่า 0.5 % แล้วผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้มีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากความสามารถในการยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติของสปริง ทั้งนี้เพื่อให้สปริงมีการยืดหดได้มากนั่นเอง นอกจากนี้แล้วยังมีวัสดุประเภทโลหะผสม เหล็กกล้าไร้สนิม และอื่นๆ ที่ต้องใช้งบงานเป็นพิเศษ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนหรือทนทานต่ออุณหภูมิสูงๆ

สปริงชนิด (helical spring) ที่มีขนาดของลวดสปริงไม่เกิน 12 mm จะใช้วิธีขดขณะเย็น (wound cold) แต่ถ้าขนาดของลวดสปริงโตขึ้นก็มักจะใช้วิธีขดขณะร้อน (wound hot) ในกรณีของลวดสปริงขนาดเล็กอาจจะนำไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก่อนจะนำมาขดหรือหลังจากขดแล้วก็ได้ สปริงที่ขดขณะเย็นควรที่จะนำมาอบเพื่อคลายความเค้น (stress relieved) ที่อุณหภูมิประมาณ  $260^{\circ}\text{C}$  นานประมาณ 15 ถึง 60 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของสปริง ขนาดของลวดสปริง สำหรับวัสดุบางชนิดคงที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นขนาดที่หาซื้อได้ทั่วไป

1. Hard-drawn wire (ASTM A227) เป็นวัสดุที่มีราคาถูกที่สุด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.50 mm จนถึง 16 mm ขดขณะเย็นได้ มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.45 % ถึง 0.75 % คุณภาพผิวต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น ดังนั้นไม่ควรใช้กับชิ้นงานที่ต้องการอายุการทำงานยาวนานมาก และในชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำในการทำงานมาก อุณหภูมิขณะใช้งานไม่ควรสูงกว่า  $120^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$

2. Music wire (ASTM A228) ทำโดยวิธี hard-drawn แต่ใช้เหล็กกล้าที่มีคุณภาพสูง คุณภาพผิวดีเป็นพิเศษ มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.70 % ถึง 1.00 % ขดขณะเย็นได้ ลวดชนิดนี้เป็นลวดที่มีการใช้กันมากที่สุดในจำนวนสปริงขนาดเล็ก มีความแข็งแรงสูง และสามารถทนแรงที่กระทำซ้ำกันได้ดีมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.10 mm จนถึง 6.35 mm แต่มิให้นำไปใช้งานในที่ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่า  $120^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$

3. Oil-tempered wire (ASTM A229) ผลิตโดยวิธีรีดเย็น แล้วจึงชุบแข็งและอบเหนียว (tempered) มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.55 % ถึง 0.75 % มักใช้วิธีชุบแข็งแล้วอบคลายความเค้นที่อุณหภูมิประมาณ 230 °C ฝิวไม่สู้จะดีนักแต่ก็ดีกว่า hard-drawn wire ลวดสปริงชนิดนี้ก็มีใช้กันแพร่หลายทั่วไป เพราะราคาถูกกว่า music wire มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.50 mm จนถึง 16 mm แต่ก็สามารถหาขนาดซึ่งใหญ่หรือเล็กกว่านี้ได้ อุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 0 °C ถึง 180 °C

4. Valve spring quality carbon steel (ASTM 230) เป็น oil-tempered wire ที่มีคุณภาพสูง สด มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.60 % ถึง 0.75 % มีผิวดีเป็นพิเศษเทียบกับ music wire จึงเหมาะสำหรับใช้กับงานที่อาจจะเสียหายเนื่องมาจากความล้า wire มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.50 mm จนถึง 6.25 mm

5. Chrome vanadium steel (ASTM 231) เป็น โลหะผสมที่นิยมใช้กันมากเมื่อโลหะอื่นๆ ไม่สามารถที่จะทนความเค้นสูงๆ ได้ เหมาะสำหรับรับแรงที่กระทำซ้ำกันเป็นอย่างยิ่ง รับแรงกระแทกได้ดี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.50 mm จนถึง 12.50 mm มักใช้ทำสปริงสำหรับวาล์ว เครื่องยนต์ของเครื่องบิน ใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 230 °C

6. Chrome silicon steel (ASTM A401) เป็น โลหะผสมที่สามารถรับแรงได้สูง และมีคุณสมบัติรับแรงกระแทกได้ดี ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 250 °C มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.80 mm จนถึง 12 mm

7. Stainless steel (chrome nickel ASTM A313 หรือ AISI 302) เป็น โลหะที่ราคาแพง รับแรงได้สูง และสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เหมาะสำหรับรับแรงกระแทก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.20 mm จนถึง 12.50 mm ในการผลิตจะใช้วิธีรีดเย็นแล้วคลายความเค้น

### คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

ค่าความต้านแรงของวัสดุที่ใช้ทำลวดสปริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของลวดสปริง ดังนั้นจึงอาจเขียนในรูปสมการที่ใช้หาค่าความต้านแรงของวัสดุลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใดๆได้ ดังนี้คือ

$$\sigma_u = A / d^x \quad (2.1)$$

$$\tau_u = B / d^y \quad (2.2)$$

โดยที่

- $\sigma_u$  คือความต้านแรงดึงต่ำสุด
- $\tau_u$  คือความต้านแรงเฉือนทนทาน
- D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเป็น mm

ค่าคงที่โดยประมาณของสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ค่าความต้านแรงมีหน่วยเป็น  $N/m^2$  และค่าต่างๆเหล่านี้เป็นค่าที่เรียบเรียงมาจากหนังสือของ V.M.FAIRE'S เพื่อใช้เป็นตัวอย่างข้อมูลสำหรับแบบฝึกหัด ในการคำนวณถ้ามีความจำเป็นที่จะต้องใช้สมการ (2.1) และสมการ (2.2) กับลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่าค่าในตาราง 2.1 ก็อนุโลมให้สามารถใช้ได้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

| ชนิดของวัสดุ                  | ขนาดลวด(mm) | x     | y     | A    | B   |
|-------------------------------|-------------|-------|-------|------|-----|
| Hard-drawn wire (ASTM A227)   | 0.50-16.00  | 0.190 | 0.340 | 1780 | 560 |
| Music wire (ASTM A228)        | 0.10-6.35   | 0.154 | 0.154 | 2150 | 565 |
| Oil-tempered wire (ASTM A229) | 0.50-16.00  | 0.190 | 0.340 | 1855 | 560 |
| Valve spring steel (ASTM 230) | 1.50-6.25   | 0.100 | 0.150 | 1730 | 515 |
| Cr- V steel (ASTM 231)        | 0.50-12.50  | 0.166 | 0.150 | 1976 | 515 |
| Cr- Si steel (ASTM A401)      | 0.80-12.00  | 0.107 | 0.150 | 1965 | 515 |
| Stainless steel (ASTM A313)   | 0.20-12.50  | 0.140 | 0.170 | 1840 | 360 |

( ที่มา : ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น,2541 )

สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนของวัสดุในตารางที่ 2.1 ให้ใช้ค่าประมาณ ดังนี้ (ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิม)

$$E = 200 \text{ kN/mm}^2 \quad G = 80 \text{ kN/mm}^2$$

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมให้ใช้

$$E = 180 \text{ kN/mm}^2 \quad G = 70 \text{ kN/mm}^2$$

ค่าต่างๆที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 2.1 เป็นเพียงค่าโดยประมาณเพื่อใช้ประกอบในการคำนวณเกี่ยวกับสปริงชนิดเท่านั้น ในการทำงานจริงผู้ออกแบบควรจะสอบถามค่าที่แน่นอนจากผู้ผลิตโดยตรง

สำหรับค่าความต้านแรงเฉือนครากให้ใช้ค่าประมาณ

$$\tau_y = 0.60 \sigma_u \quad \text{สำหรับวัสดุทั่วไป}$$

$$\tau_y = 0.47 \sigma_u \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม}$$

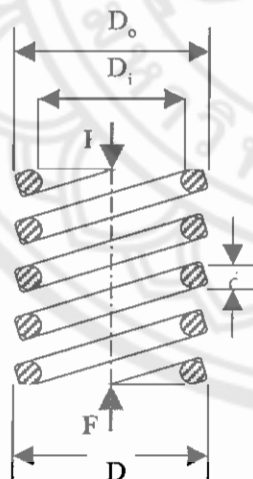
#### ความเค้นในสปริงชนิดกรับแรงกด

พิจารณาสปริงชนิดกรับแรงกด  $F$  ในแนวแกนของสปริง ดังรูปที่ 2.1 (ก) โดยจากรูปกำหนดให้

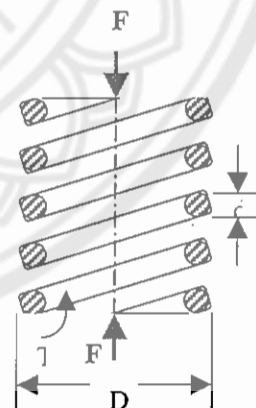
$D_o$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดสปริง

$D_i$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดสปริง

$D = (D_o + D_i) / 2$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดสปริง



(ก) แรงกดกระทำในแนวแกนของสปริง



(ข) แผนภาพวัตถุอิสระแสดงให้เห็นว่าลวดอยู่ภายใต้แรงเฉือนและโมเมนต์บิด

รูปที่ 2.1 สปริงชนิด

(ที่มา : ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541 )

ให้ตัดส่วนหนึ่งของสปริงออกมาพิจารณาจะเห็นได้ว่า ลวดสปริงอยู่ใต้แรงภายใน  $F$  และ โมเมนต์บิด  $T$  ดังรูปที่ 2.1 (จ) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในลวดสปริง คือ

$$\tau = (Tr/J) + (F/A) \quad (2.3)$$

$$\text{แต่ } T = FD/2$$

$$\text{และ } J/r = (\pi x d^4/32)/(d/2)$$

$$= \pi x d^3/16$$

$$\text{และ } A = \pi x d^2/4$$

ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (2.3) ใหม่ได้เป็น

$$\tau = (8FD/\pi x d^3) + (4F/\pi x d^2) \quad (2.4)$$

ถ้าให้  $C = D/d$  ซึ่งเรียกว่า ดัชนีสปริง (spring index) สมการที่ (2.4) สามารถจะจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau = K_s (8FD/\pi x d^3) \quad (2.5)$$

$$\text{โดยที่ } K_s = 1 + (0.5/C)$$

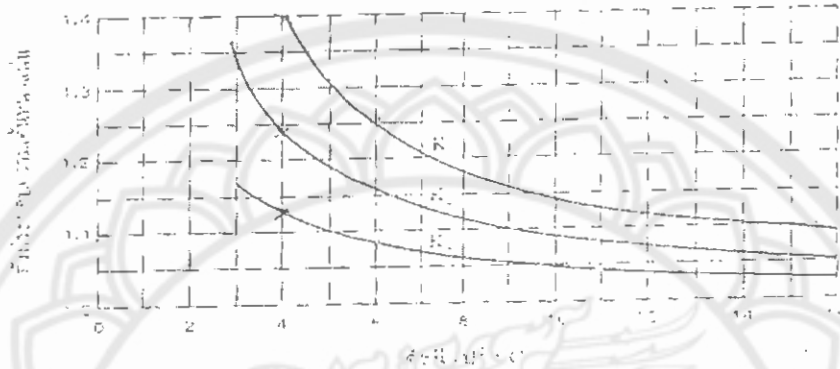
ค่า  $K_s$  นี้เรียกว่าตัวประกอบความเค้นเฉือน (shear stress correction factor) ซึ่งเป็นค่าทำให้ความเค้นเฉือนในสปริงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความเค้นเฉือนตรง  $F/A$

ในการคำนวณที่ผ่านมาได้ใช้สูตรความเค้นเฉือนเนื่องจากโมเมนต์บิด  $Tr/J$  ซึ่งเป็นสูตรสำหรับการบิดชิ้นส่วนตรง เช่น เพลา แต่ในสปริง เส้นลวดบิดวนไปตามความโค้งของสปริงทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นสูงสุดบริเวณด้านในของสปริงชด วาห์ล (Wahl) ได้มีการเสนอให้มีการแก้ไขในสมการที่ (2.5) โดยเพิ่มตัวประกอบความโค้ง (curvature correction factor)  $K_c$  เข้าไปในสมการ ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} K_s &= K_c K_s \\ &= \{(4C-1)/(4C-4)\} + (0.615/C) \end{aligned} \quad (2.6)$$

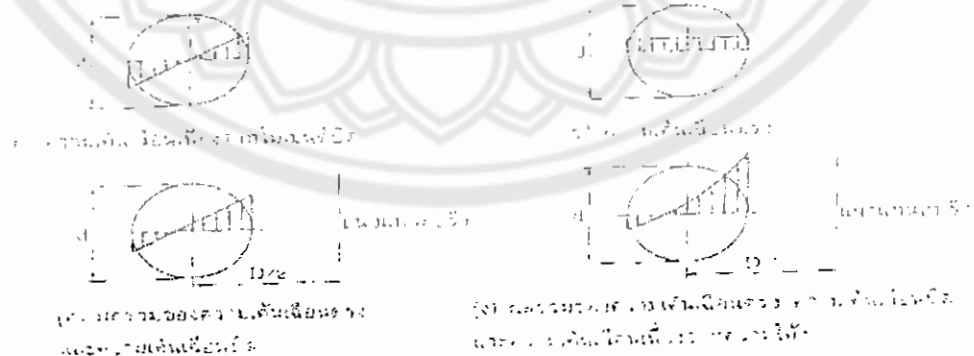
ค่า  $K$  นี้เรียกว่าตัวประกอบของวาห์ล (Wahl 's factor) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการคำนวณจากสมการที่ (2.6) หรือหาค่าได้จากรูปที่ 2.2 ดังนั้นความเค้นเฉือนในสมการที่ (2.5) จึงกลายเป็น

$$\begin{aligned} \tau &= K (8FD / \pi x d^3) \\ &= K (8FD / \pi x d^2) \end{aligned} \tag{2.7}$$



รูปที่ 2.2 ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับสปริงขดรับแรงดึงและรับแรงกด  
(ที่มา : ชาญ ถนัดงาน, การออกแบบเครื่องจักรกล1, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541 )

การกระจายความเค้นเฉือนในเส้นลวดสปริงซึ่งเกิดจาก โมเมนต์บิด  $T$  และแรงเฉือน  $F$  จะดูได้จากรูปที่ (2.3 ก) และรูปที่ (2.3 ข) เมื่อรวมความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ (2.3 ก) และ (2.3 ข) ก็จะได้ความเค้นเฉือนดังรูปที่ (2.3 ค) แต่เมื่อรวมความเค้นหนาแน่นอันเนื่องมาจากความโค้งของลวดสปริงเข้าไปด้วยจะได้ดังรูปที่ (2.3 ง) ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเค้นเฉือนสูงสุดเกิดขึ้นที่ด้านในของลวดสปริง



รูปที่ 2.3 การรวมความเค้นในสปริงขด

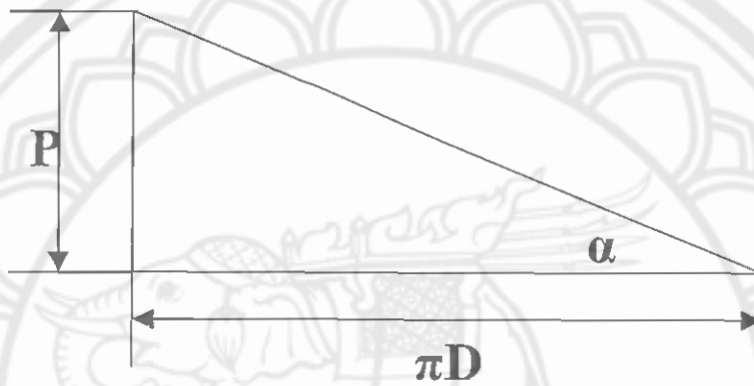
(ที่มา : ชาญ ถนัดงาน, การออกแบบเครื่องจักรกล1, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541 )

สมการที่ (2.7) นี้ จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อสปริงมีขีดจำกัดเท่านั้น

ถ้าให้ระยะพิศของสปริงยาว  $P$  ดังรูปที่ 2.4 และเมื่อนำสปริงหนึ่งรอบมาคลี่ออก จะได้สมการความชันระหว่างมุมขนาดกับระยะพิศเป็น

$$\tan \alpha = P / (\pi \times D)$$

สำหรับสปริงรับแรงกด ถ้ามุมขนาดของสปริงขณะที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำเล็กกว่า  $12^\circ$  แล้ว ก็ให้ถือว่าสปริงชนิดนั้นมีขีดจำกัด



รูปที่ 2.4 มุมขนาดของสปริง

#### ความแข็งตึงของสปริง

ความแข็งตึงของสปริง (spring stiffness) หมายถึงปริมาณของแรงที่ใช้ในการทำให้สปริงยืดหดหนึ่งหน่วยความยาวในแนวแกนของสปริง ซึ่งยังมีชื่อเรียกอีกหลายชื่อแตกต่างกันไป เช่น ค่าคงที่ของสปริง (spring constant) อัตราสปริง (spring rate) โมดูลัสของสปริง และเกรเดียนของสปริง (spring gradient) เป็นต้น ถ้าให้  $\delta$  เป็นระยะยุบตัวของสปริงภายใต้แรงกด  $F$  ค่าความแข็งตึงของสปริงคือ

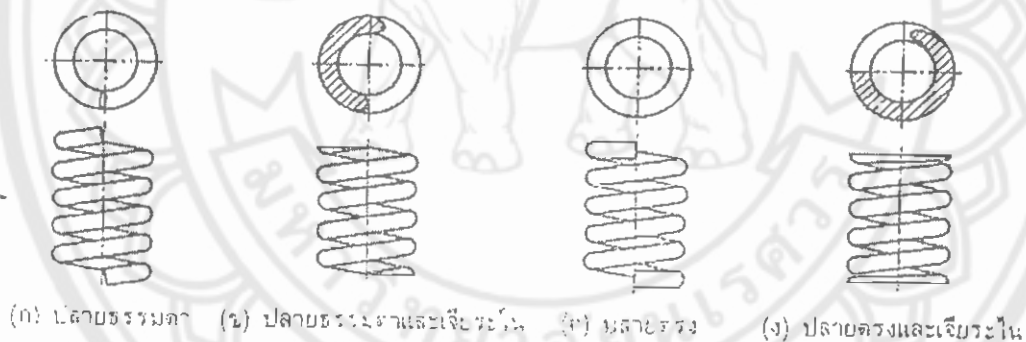
$$\begin{aligned} K &= F / \delta \\ &= Gd^4 / 8D^3 n \\ &= Gd / 8C^3 n \end{aligned} \quad (2.8)$$

ค่าความแข็งตึงของสปริงนี้ก็เป็นค่าที่สำคัญ ซึ่งผู้ใช้ต้องเลือกให้ถูกต้องกับชิ้นงาน จึงจะทำให้เครื่องจักรกลทำงานได้ตามความมุ่งหมาย

### จำนวนขดทำการ

สปริงขดรับแรงกดที่ใช้งานอยู่ทั่วไปจะมีปลายทั้งสองในลักษณะดังรูปที่ 2.5 โดยปกติแล้วต้องการให้ปลายสปริงสัมผัสกับสิ่งที่สปริงกดอยู่ให้มากที่สุด ในบางกรณีสปริงตั้งอยู่ในช่องซึ่งมีพื้นที่กวดที่เรียบแบน ดังนั้นจึงนิยมตัดปลายสปริงชนิดนี้ให้เรียบเป็นฐานตั้ง เนื่องจากขดส่วนที่ตัดปลายไปจะสูญเสียผลในการเป็นสปริงไปมาก ฉะนั้นการคำนวณจึงให้หักเอาจำนวนขดเหล่านี้ออก จำนวนขดที่เหลืออยู่ทั้งหมดเรียกว่า ขดทำการ ซึ่งก็เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ถ้าให้  $n_t$  เป็นจำนวนขดทั้งหมดของสปริงขดแล้ว จำนวนขดทำการสามารถคิดได้ดังนี้

|                                   |                 |
|-----------------------------------|-----------------|
| ปลายธรรมดา (plain ends)           | $n = n_t$       |
| ปลายธรรมดาและเจียรไน (ground end) | $n = n_t - 1$   |
| ปลายตรง (square ends)             | $n = n_t - 1.5$ |
| ปลายตรงและเจียรไน                 | $n = n_t - 2$   |



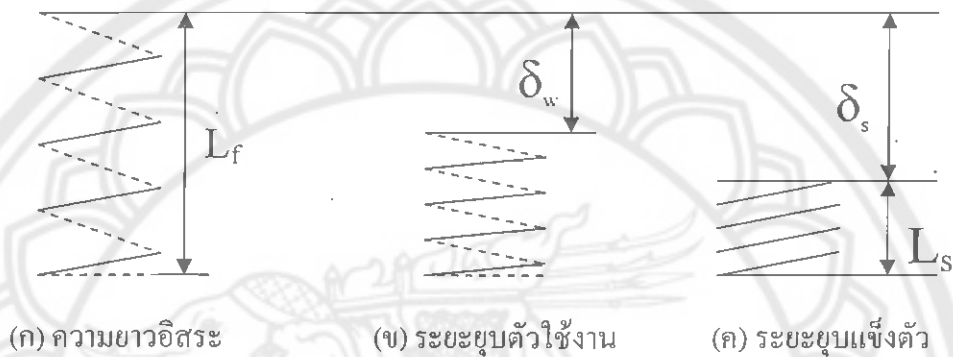
รูปที่ 2.5 ปลายสปริงขดรับแรงกด

(ที่มา : ชาลย ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541)



### ระยะยวบตัวใช้งาน

ความยาวของสปริงขดในขณะที่ยังไม่มีแรงภายนอกมากระทำเรียกว่า ความยาวอิสระ  $L_f$  ดังรูปที่ (2.6 ก) เมื่อมีแรงภายนอกมาก็คสปริงขดนี้ให้ทุกขดติดกันพอดีดังรูปที่ (2.6 ค) ความยาวของสปริงขดนี้เรียกว่า ความยาวแข็งตัว (solid height)  $L_s$  แรง และความเค้นในขณะนี้เรียกว่า แรงแข็งตัว (solid force) และความเค้นแข็งตัว (solid stress) ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 ระยะยวบตัวของสปริงขด

( ที่มา : ชาญ ถนังงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น,2541 )

สำหรับการออกแบบสปริงให้รับแรง  $F$  สูงสุดขณะใช้งาน โดยที่สปริงจะยวบตัวลงไป  $\delta_w$  ค่า  $\delta_w$  นี้จะเรียกว่า ระยะยวบตัวใช้งาน ดังรูปที่ (2.6 ข) ถ้าให้ระยะยวบแข็งตัว (Solid Deflection)  $\delta_s$  เป็นผลต่างระหว่างความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวจะได้ว่า

$$\delta_s = L_f - L_s$$

ซึ่งจะทำให้สามารถเผื่อการยวบตัวของสปริงให้มีการยวบตัวมากกว่าระยะยวบตัวใช้งานได้อย่างมีหลักเกณฑ์พอสมควร โดยใช้ค่าความเผื่อการกวดติด (clash allowance) ซึ่งมีนิยามว่า

$$\text{ความเผื่อการกวดติด} \quad r_c = (\delta_s - \delta_w) / \delta_w \quad (2.9)$$

ค่าความเผื่อการกวดติดนี้เป็นอัตราส่วนที่แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของระยะยวบตัว ที่อาจจะมิได้เกินกว่าระยะยวบตัวใช้งาน โดยทำหน้าที่ให้ความปลอดภัยแก่การใช้งานยิ่งขึ้นไปอีก ค่า  $r_c$  นี้แนะนำให้ใช้ประมาณ 0.20 ซึ่งก็หมายความว่าสามารถใช้สปริงรับแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าแรงที่ใช้ออกแบบอีก

20 % สปริงทุกชุดจึงจะติดกันหมด จึงเป็นการป้องกันมิให้ผิวหน้าของสปริงเสียหายเนื่องจากการสัมผัสและเสียดสีกันระหว่างชุดได้ อีกประการหนึ่งถ้าสปริงยุบตัวจนถึงความยาวแข็งตัว สปริงจะหมดคุณสมบัติในการใช้งานรับแรงสั่นสะเทือนหรืออื่นๆตามต้องการไป

ความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวของสปริงจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายสปริงชุด ซึ่งอาจจะหาค่าโดยประมาณได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าประมาณของความยาวอิสระและความยาวแข็งตัว

| ลักษณะของปลายชุดสปริง | ความยาวอิสระ( $L_f$ ) | $n_r$   | ความยาวแข็งตัว( $L_s$ ) |
|-----------------------|-----------------------|---------|-------------------------|
| ปลายธรรมดา            | $Pn + d$              | $n$     | $d(n+1)$                |
| ปลายธรรมดาและเจียรไน  | $Pn + d$              | $n+1$   | $d(n+1)$                |
| ปลายตรง               | $Pn + 2.5d$           | $n+1.5$ | $d(n+2.5)$              |
| ปลายตรงและเจียรไน     | $Pn + 2d$             | $n+2$   | $d(n+2)$                |

(ที่มา : ชาลู ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541 )

#### การออกแบบสปริงขดรับแรงกด

การออกแบบสปริงมักจะต้องใช้วิธีทดลองแก้ความคลาดเคลื่อน (trial -and-error) บางครั้งก็มีข้อจำกัดอย่างอื่นซึ่งทำให้การออกแบบยากขึ้นไปอีก เช่น ขนาดจำกัดของช่องสำหรับใส่ชุดสปริง เป็นต้น โดยปกติแล้วสปริงขดจะขยายตัวกว้างออกเล็กน้อยเมื่ออยู่ภายใต้แรงกด ดังนั้นในกรณีที่มีช่องว่างจำกัดก็จะต้องเหลือช่องไว้โดยรอบสปริงประมาณ  $d/4$  ซึ่งการขยายตัวของสปริงอาจจะประมาณค่าได้จากสมการ

$$D_o = [D_o^2 + 0.1E^2]^{1/2} \quad (2.10)$$

โดยที่  $D_o$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสปริงขดหลังขยายตัว  
 $D_o$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของสปริงขดก่อนขยายตัว  
 $E = \{ L_f - d(n_r - n) \} / n$

การคำนวณเกี่ยวกับสปริงชดอาจแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. ให้คิดว่าแรงที่มากกระทำต่อตัวสปริงเป็นแบบอยู่นิ่ง แล้วคิดว่าแรงที่ทำกับสปริงนั้นจัดอยู่ในงานประเภทใด ซึ่งแบ่งออกเป็น
  - (ก) งานเบา (light service) หมายถึงแรงที่มากกระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงไม่เกิน  $10^4$  ครั้ง
  - (ข) งานปานกลาง (average service) หมายถึงแรงที่มากกระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงอยู่ระหว่าง  $10^4$  ถึง  $10^6$  ครั้ง
  - (ค) งานหนัก (severe service) หมายถึง ) หมายถึงแรงที่มากกระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงมากกว่า  $10^6$  ครั้ง
2. ให้พิจารณาว่าแรงเปลี่ยนแปลงจากค่าสูงสุดไปถึงต่ำสุด แล้วคำนวณออกแบบสปริงโดยใช้สมการลักษณะเดียวกับของไซเคอร์เบอร์ก สำหรับการคำนวณโดยวิธีนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้สปริงมีอายุการใช้งานไม่จำกัด (indefinite lift)

การออกแบบสปริงชดโดยคิดให้แรงอยู่นิ่ง

ในการออกแบบสปริงชดโดยคิดให้แรงอยู่นิ่ง ให้ผู้ออกแบบใช้ค่าความเค้นเฉือนที่แสดงอยู่ในตารางที่ 2.3 เป็นค่าความเค้นออกแบบ แต่ถ้าสามารถได้ข้อมูลที่แน่นอนจากผู้ผลิตวัสดุสำหรับลวดสปริง ได้ก็ควรที่จะใช้ค่านั้นแทน

ตารางที่ 2.3 ค่าความเค้นเฉือนออกแบบสำหรับวัสดุสปริง

| วัสดุลวดสปริง               | ความเค้นเฉือนออกแบบ $k T_d$ |                 |                 |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
|                             | งานเบา                      | งานปานกลาง      | งานหนัก         |
| Hard drawn wire (ASTM A227) | $0.344\sigma_u$             | $0.275\sigma_u$ | $0.244\sigma_u$ |
| Stainless steel (ASTM A313) | $0.320\sigma_u$             | $0.260\sigma_u$ | $0.210\sigma_u$ |
| วัสดุอื่นๆในตารางที่ 10.1   | $0.405\sigma_u$             | $0.324\sigma_u$ | $0.263\sigma_u$ |

( ที่มา : ชาลยู ถนังงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2541 )

สำหรับขนาดมาตรฐานของเส้นลวดสปริงในระบบหน่วยเอสไอนี้ยังมิได้มีการตกลงกันระหว่างประเทศต่างๆ ให้เป็นที่แน่นอน ดังนั้นจึงแนะนำให้ใช้ค่าต่อไปนี้เป็นค่าที่ทดลองเลือกใช้ โดยบอกเป็นมิลลิเมตร ถ้าขนาดลวดที่ต้องการใช้โตกว่าที่ให้ไว้ในที่นี้ก็ให้ถือเอาตัวเลขที่คำนวณได้เป็นเกณฑ์ โดยใช้ค่าที่แนะนำดังนี้

|       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.00  | 1.25  | 1.50  | 1.80  | 2.00  | 2.25  | 2.50  |
| 2.80  | 3.20  | 3.60  | 4.00  | 4.50  | 5.00  | 5.50  |
| 6.00  | 7.00  | 8.00  | 9.00  | 10.00 | 11.00 | 12.50 |
| 14.00 | 16.00 | 18.00 | 20.00 | 22.50 | 25.00 |       |

ทางด้านการผลิตสปริงพบว่า ถ้าสปริงมีดัชนี  $C$  น้อยการม้วนหรือขดสปริงจะประสบปัญหาเรื่องการแตกร้าวของสปริง หรืออีกในหนึ่งคือการม้วนสปริงให้มีความโค้งมากจนเกินไปทำได้ยาก ดังนั้นในการออกแบบสปริงควรจะให้หมีค่าดัชนีสปริงมากพอสมควร โดยปกติแล้วไม่ควรจะให้น้อยกว่า 3 สปริงขดรับแรงกดส่วนมากจะมีดัชนีสปริงอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ทั้งนี้เพราะทำให้ไม่มีปัญหาทางด้านการผลิตและมีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี

ถึงแม้ว่าในการใช้งานสปริงจะไม่ถูกกดจนแข็งตัว แต่ในขณะที่ทำการดัดสปริงหรือทำการซ่อมแซมชิ้นส่วนก็อาจจะกดสปริงเข้าออกจนถึงความยาวแข็งตัวได้ เพื่อป้องกันความเสียหายของสปริง ในการออกแบบจึงจะให้ความเค้นเฉือนในขณะที่สปริงถูกกดจนขดทุกขดติดกันหมดน้อยกว่า  $\tau_y$  ของวัสดุเสมอ

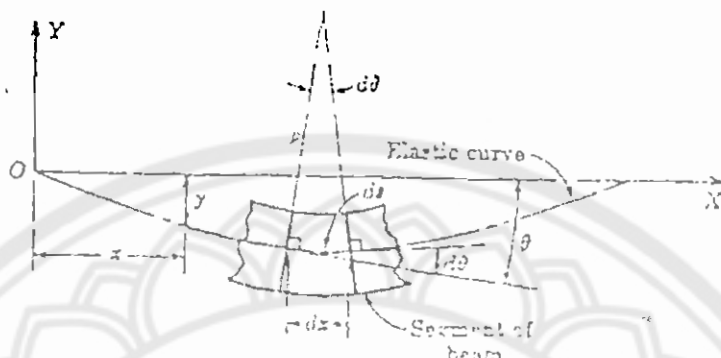
## 2.2 การโก่งตัวของคาน

การโก่งตัวของคาน เป็นแฟกเตอร์ตัวหนึ่งที่น่าสนใจมาพิจารณาถึงขีดจำกัดของภาระที่กระทำต่อคาน ดังนั้น ในการออกแบบคานจะต้องคำนึงระยะโก่งตัวของคานด้วย

ระยะโก่งตัวของคาน (beam deflection) สามารถหาได้โดยวิธีต่างๆดังนี้

1. วิธีการอินทิเกรตสองชั้น (double-integration method)
2. วิธีพื้นที่และ โมเมนต์ (area-moment method)
3. วิธีการซ้อนทับ (superposition method)
4. วิธีใช้พลังงาน-ทฤษฎีแคลคูลัสของวาเรียส (energy method-Castigliano's Theorem)

## วิธีการอินทิเกรตสองชั้น (Double-Integration Method)



รูปที่ 2.7 แสดงเส้นในแนวยาวตามลักษณะของคาน

ที่มา : สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์, กลศาสตร์ของแข็ง, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544

พิจารณาผิวสะเทิน (neutral surface) เป็นเส้นในแนวยาวตามลักษณะของคานที่โค้งตัว เราเรียกขอบเส้นของผิวสะเทินว่า เส้นอีลาสติกของคาน (elastic line) หรือ เส้นโค้งยืดหยุ่น (elastic curve)

พิจารณาที่เส้นโค้งยืดหยุ่นในช่วง  $dx$  โดยกำหนดให้พิกัด  $x$  วัดจากปลายด้านซ้ายเป็นจุดกำเนิด และพิกัด  $y$  วัดขึ้นเป็นบวก ระยะโค้งตัวของคานจะถูกสมมติให้มีค่าน้อยมาก นั่นคือ เส้นโค้งยืดหยุ่นเกือบเป็นเส้นตรง ดังนั้น ความลาดชันของเส้นโค้งยืดหยุ่นที่จุดหนึ่งๆ สามารถเขียนเป็น

$$\tan \theta \approx \theta = dy/dx$$

และ

$$d\theta/dx = d^2y/dx^2$$

จากรูป ส่วนโค้ง  $ds$  รองรับมุม  $d\theta$  ที่รัศมี  $\rho$  ดังนั้น

$$ds = \rho d\theta$$

เนื่องจาก ระยะโค้งตัวมีค่าน้อยมาก จึงสามารถแทนส่วนโค้ง  $ds$  ด้วยการกระจัด  $dx$

$$\text{ดังนั้น } dx = \rho d\theta = 1/\theta = d\theta/dx$$

$$\text{หรือ } 1/\rho = d^2y/dx^2$$

(2.11)

จากสมการความเครียดตามยาว และคุณสมบัติความยืดหยุ่นของวัสดุ

$$\epsilon_x = \sigma_x / E$$

$$\epsilon_x = -y / \rho = \sigma_x / E = My / EI$$

$$1 / \rho = M / EI$$

ดังนั้น  $d^2y / dx^2 = d\theta / dx = 1 / \rho = M / EI$

หรือ  $EI (d^2y / dx^2) = M$  (2.12)

สมการที่ 2.12 เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ของเส้นโค้งยืดหยุ่นของคาน  
ถ้าสมมติให้ EI มีค่าคงที่ แล้วอินทิเกรตสมการที่ 2.12 จะได้

$$EI (dy / dx) = \int M(x) dx + C_1 \quad (2.13)$$

ซึ่งเป็นสมการของความชัน (slope) หรือ  $dy / dx$  ที่จุดต่างๆของเส้น โค้งยืดหยุ่น และ EI เรียกว่า  
สภาพแข็งแรงต่อการดัด (flexural rigidity) ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดความยาวของคาน

ถ้าอินทิเกรตสมการที่ 2.13 จะได้ว่า

$$EIy = \iint (M(x) dx) + C_1x + C_2 \quad (2.14)$$

สมการที่ 2.14 เป็นสมการของระยะโค้งตัวของเส้น โค้งยืดหยุ่น สำหรับค่า  $C_1$  และ  $C_2$  เป็น  
ค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากเงื่อนไขของขอบเขตของการ โค้งตัวตามจุดต่างๆของคาน

สรุปความสัมพันธ์ของสมการ

Deflection =  $y$

Slope =  $dy / dx$

Moment,  $M(x) = EI (d^2y / dx^2)$

Shear,  $V(x) = dM / dx = EI (d^3y / dx^3)$  (for EI = constant)

Load,  $w(x) = dV / dx = EI (d^4y / dx^4)$  (for EI = constant)

Singularity Function คือการเขียนการกระจายของโมเมนต์ดัดที่แตกต่างกันในแต่ละช่วง  
เวลาของคานเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่องไปตลอดทั้งคาน ไม่ว่าภาวภายนอกที่กระทำจะเป็นจุดหรือ  
กระจาย Singularity Function ของ  $x$  จะเขียนในรูป  $\langle x - x_0 \rangle^n$  (ใช้วงเล็บหัวแหลม) เมื่อ  $n$  เท่ากับ  
จำนวนเต็มใดๆ

## เงื่อนไข

$$\begin{aligned}
 \langle x - x_0 \rangle^n &= (x - x_0)^n && \text{เมื่อ } n > 0 \text{ และ } x \geq x_0 \\
 &= 0 && \text{เมื่อ } n > 0 \text{ และ } x < x_0 \\
 \langle x - x_0 \rangle^0 &= 1 && \text{เมื่อ } x \geq x_0 \\
 &= 0 && \text{เมื่อ } x < x_0 \\
 \int \langle x - x_0 \rangle^n dx &= \frac{1}{n+1} \langle x - x_0 \rangle^{n+1} - C_1 && \text{เมื่อ } n \geq 0 \\
 d/dx (\langle x - x_0 \rangle^n) &= n \langle x - x_0 \rangle^{n-1} && \text{เมื่อ } n > 1
 \end{aligned}$$

## ข้อสังเกต

นิพจน์  $\langle x - x_0 \rangle^n$  จะไม่มีค่าเมื่อค่าของ  $x$  ทำให้ในวงเล็บหัวแหลมค่าน้อยกว่าศูนย์

สามารถเขียนสมการโมเมนต์ของแต่ละช่วงดังนี้

$$\begin{aligned}
 M_1 &= R_L x && 0 < x < x_1 \\
 M_2 &= R_L x - P(x - x_1) && x_1 < x < x_2 \\
 M_3 &= R_L x - P(x - x_1) + M_A && x_2 < x < x_3 \\
 M_4 &= R_L x - P(x - x_1) + M_A - (w/2)(x - x_3)^2 && x_3 < x < L
 \end{aligned}$$

จากสมการข้างต้น สามารถลดเหลือเพียงสมการเดียวตามเงื่อนไขของ Singularity Function ได้ดังนี้

$$M(x) = R_L x - P \langle x - x_1 \rangle^1 + M_A \langle x - x_1 \rangle^2 - (w/2) \langle x - x_3 \rangle^2 \quad 0 < x < L$$

ในการใช้วงเล็บหัวแหลมกับการกระจาย จะต้องเป็นแรงกระจายให้ตลอดถึงปลายคานด้านขวา ในกรณีที่มีแรงกระจายไม่ถึงปลายคานให้ขยายแรงกระจายไปจนสุดคานด้านขวามือพร้อมกับหักล้างออกโดยเติมแรงกระจายขนาดเดียวกันแต่ทิศทางตรงกันข้าม

### ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดที่สำคัญ

ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยของหน้าตัดต่างๆ สามารถหาได้ ดังนี้

#### 1.สี่เหลี่ยมผืนผ้า

$$A = bh$$

$$C = h/2$$

$$N.A. = 1/12(bh^3)$$

#### 2. วงกลม

$$A = (\pi/4) d^2$$

$$C = d/2$$

$$N.A. = (\pi/64) d^4$$

#### 3. สามเหลี่ยม

$$A = (1/2)bh$$

$$C = h/3$$

$$N.A. = 1/36(bh^3)$$

#### 4. ครึ่งวงกลม

$$A = (\pi r^2)/2$$

$$C = 4r/3\pi$$

$$N.A. = 0.110 r^4$$

ในกรณีที่หน้าตัดของคานไม่เป็นไปตามที่กล่าวมาแล้ว เช่น เป็นรูปตัว T การหาโมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนสะเทินของหน้าตัดเหล่านั้น ต้องอาศัยการย้ายแกนของโมเมนต์ความเฉื่อย กล่าวคือ โมเมนต์ของความเฉื่อยของรูปตัดรอบแกนใดแกนหนึ่งที่ขนานกับแกนสะเทินจะมีค่าเท่ากับโมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนสะเทินของรูปตัดนั้น บวกด้วยผลคูณของพื้นที่ที่หน้าตัดกับกำลังสองของระยะทางที่แกนนั้นห่างจากแกนสะเทิน ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{N.A.} = I_{C.G.} + Ad^2 \quad (2.15)$$

|       |            |   |
|-------|------------|---|
| เมื่อ | $I_{N.A.}$ | เป็นโมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนที่ต้องการหา                  |
|       | $I_{C.G.}$ | เป็นโมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนสะเทินของหน้าตัดนั้น          |
|       | A          | เป็นพื้นที่ที่หน้าตัดของคาน                                 |
|       | d          | เป็นระยะทางที่อยู่ห่างจากแกนศูนย์กลางวงไปยังแกนที่ต้องการหา |



### 2.3 ความแข็งแรงของเสาค้ำยัน

โดยทั่วไป ความแข็งแรงของเสาค้ำยัน จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 อย่างดังนี้

1. วัสดุ
2. ความยาวของเสา
3. ขนาด
4. สภาพของจุดรองรับที่ปลาย

วัสดุที่ใช้ทั่วไปมากที่สุดสำหรับเสาค้ำยันคือเหล็กกล้า ไม้ อลูมิเนียม และคอนกรีตอัดแรง โดยทั่วไปวัสดุที่แข็งแรงกว่า มักนำมาใช้เป็นเสาค้ำยัน ซึ่งจะสามารถรับแรงกดและน้ำหนักโหลดได้มากขึ้น ปริมาณของน้ำหนักโหลดที่เสาค้ำยันจะสามารถรับภาระได้จะแปรผันกลับกันกับความยาวของตัวเสา ดังนั้นเสาค้ำยันสั้น จึงสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าเสาค้ำยันยาว

อิทธิพลของขนาดของเสานั้นเห็นได้ชัดเจน เสาที่มีขนาดใหญ่กว่าย่อมสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า ยิ่งไปกว่านั้น การกระจายเนื้อวัสดุสัมพันธ์กับแกนจุดศูนย์กลางมวลของหน้าตัดเสา (โมเมนต์ความเฉื่อย) จะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของค้ำยันด้วย

แบบของหัวต่อที่ใช้ตรงขั้วปลายหัวค้ำยัน เสา ก็มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำหนักแรงกดของเสาค้ำยัน ที่มันจะสามารถรับภาระได้ด้วย รูปแบบทั่วไปที่ใช้กันมากที่สุดของการเชื่อมต่อปลายหัวเสา คือต่อแบบสลักหมุด และต่อแบบเชื่อมติด โดยทั่วไปปลายหัวขั้วเสายังเชื่อมติดกันมาก ปริมาณน้ำหนักแรงกดที่เสาค้ำยันจะรองรับได้ก็มากขึ้นด้วย

#### อัตราส่วนความเรียว

ผลการเปลี่ยนแปลงของความยาว, สภาพของจุดรองรับที่ปลาย, และขนาดของค้ำยัน เสา มักจะรวมกันเป็นเทอมเดียว เรียกว่า “อัตราส่วนความเรียว” (Slenderness Ratio) สำหรับเสาค้ำยันที่ท่ามาจากเหล็กกล้า อัตราส่วนความเรียว จะกำหนดให้เป็น  $kl/r$

เมื่อ  $k$  = ตัวคงที่ขึ้นอยู่กับสภาพของจุดรองรับที่ปลายเสา

$l$  = ช่วงความยาวที่ค้ำยันอยู่

$r$  = รัศมีการหมุนตัว (radius of gyration) ของค้ำยันวัดจากแกนของความโค้งงอ  
 $= \sqrt{I/A}$

ค่าของ  $k$  สำหรับสภาพจุดรองรับที่ปลายเสาทั่วไปได้กำหนดไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าของ k สำหรับสภาพรองรับที่ปลายเสาทั่วไป

| สภาพรองรับที่ปลายเสา | ค่าคงที่ K ทางทฤษฎี | ค่าคงที่ K ในการออกแบบ |
|----------------------|---------------------|------------------------|
| สลักหมุด             | 1.0                 | 1.0                    |
| เชื่อมติด            | 0.5                 | 0.65                   |

( ที่มา : สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์. กลศาสตร์ของแข็ง. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544 )

สำหรับเสาค้ำยันไม้ อัตราส่วนความเร็วถูกกำหนดทั่วไปเป็น  $l/d$  เมื่อค่าตัวแปร K ถูกสมมติเป็น 1.0, 1 เป็นช่วงความยาวของเสาค้ำยัน และ d เป็นมิติขนาดด้านข้างที่น้อยที่สุดของเสาค้ำยัน

การวิเคราะห์เสาค้ำยันเหล็กกล้า (AISC)

การวิเคราะห์เสาค้ำยัน ปรกติจะหมายถึงการพิจารณาปริมาณแรงกด ที่เสาค้ำยันจะสามารถรับภาระได้อย่างปลอดภัย

ในการวิเคราะห์เสาค้ำยันเหล็กกล้า ขั้นตอนแรกให้พิจารณา อัตราส่วนความเร็ว จากนั้นให้แยกจัดประเภทเสาค้ำยัน เป็นเสาค้ำยันขนาดกลาง หรือขนาดยาว โดยขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนความเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับเทอม  $C_c$  ตามข้อกำหนดเฉพาะของสถาบันเหล็กกล้าในงานก่อสร้างของอเมริกา (American Institute of Steel Construction, AISC)

$$C_c = \sqrt{2\pi^2 E / F_y} \quad (2.16)$$

เมื่อ E เป็น โมดูลัสการยืดหยุ่นของเหล็กกล้าซึ่งมีค่า  $= 29 \times 10^6 \text{ psi} = 200 \times 10^6 \text{ Pa}$  และ  $F_y$  เป็น ความแข็งแรงครากของเหล็กกล้า ค่าของ  $C_c$  สำหรับเหล็กกล้าทั่วไป มีกำหนดไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าของ  $C_c$  สำหรับเหล็กกล้าทั่วไป

|             |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|
| $F_y$ (ksi) | 36    | 42    | 50    |
| $C_c$       | 126.1 | 116.7 | 107.0 |

(ที่มา: สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์. กลศาสตร์ของแข็ง. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544)

ตามข้อกำหนดเฉพาะของ AISC ถ้า  $kl/r \geq C_c$  แล้วความเค้นอนุญาตตามแนวแกน ในเสาค้ำยันเหล็กกล้าจะถูกกำหนดเป็นดังนี้

$$F_a = \left\{ \left[ 1 - (kl/r)^2 / (2C_c^2) \right] F_y \right\} / \left\{ \left[ (5/3) + (3kl/r) / (8C_c) \right] - \left[ (kl/r)^3 / (8C_c^3) \right] \right\} \quad (2.17)$$

และถ้า  $C_c < kl/r \leq 200$  แล้วความเค้นอนุญาตตามแนวแกน จะถูกกำหนดเป็นดังนี้

$$F_a = 12\pi^2 E / (kl/r)^2 \quad (2.18)$$

การวิเคราะห์เสาค้ำยัน (สมการออกแบบเครื่องจักรกล)

เมื่อข้อกำหนดควบคุมการออกแบบมีการระบุว่า ให้ใช้สมการการออกแบบเครื่องจักรกล แทนการใช้สมการของสมาคมเหล็กกล้าในงานก่อสร้างของอเมริกา (AISC) การวิเคราะห์เสาค้ำยัน จะต้องอ้างอิงจากสมการภายใต้สภาพหรือเงื่อนไขต่อไปนี้

ถ้า  $kl/r < 40$  ดังนั้นค่าความเค้นอนุญาตตามแนวแกนเท่ากับ

$$F_a = F_y / N_y \quad (2.19)$$

เมื่อ  $F_y$  คือความเค้นครากของวัสดุ และ  $N_y$  คือ ตัวแปรเพื่อความปลอดภัย ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงกดที่มากระทำกับเสาค้ำยันนั้น ค่าตัวแปรเพื่อความปลอดภัย  $N_y$  ที่ใช้กันทั่วไป สามารถแสดงได้ตาม ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าตัวแปรเพื่อความปลอดภัย  $N_y$

| ลักษณะของแรงกดที่มากระทำ | $N_y$ |
|--------------------------|-------|
| แรงสม่ำเสมอ              | 2     |
| แรงเปลี่ยนแปลง           | 3     |
| แรงกระตุก (Shock Load)   | 5     |

(ที่มา: สุระเชษฐ รุ่งวัฒนพงษ์, กลศาสตร์ของแข็ง, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเกชั่น, 2544)

$$\text{ถ้า } 40 \leq kl/r < \sqrt{2E/F_y} (K^2)$$

เมื่อค่า K หาได้จากตารางที่ 2.6 ดังนั้นค่าความเค้นอนุญาตตามแนวแกนเท่ากับ

$$\text{ถ้า } 40 \leq kl/r < \sqrt{2E/F_y} (K^2)$$

เมื่อค่า K หาได้จากตารางที่ 2.6 ดังนั้นค่าความเค้นอนุญาตตามแนวแกนเท่ากับ

$$F_s = F_y/N_y \{ [1 - (F_y (kl/r)^2 / 4E)] \} \quad (2.20)$$

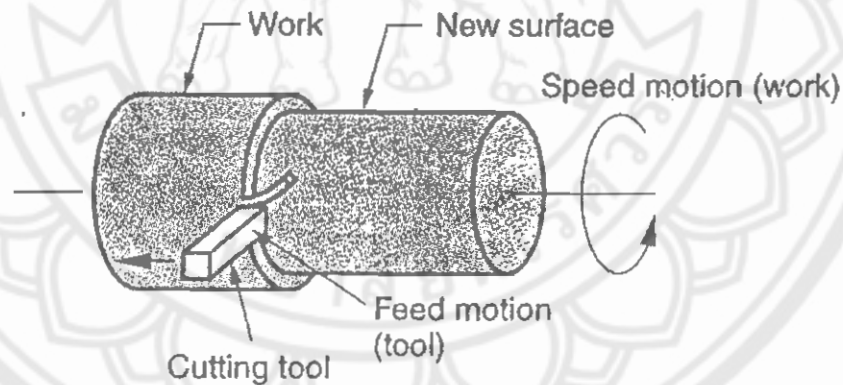
และสุดท้ายถ้า  $kl/r \geq \sqrt{2E/F_y} (K^2)$  แล้ว ค่าความเค้นอนุญาตตามแนวแกนเท่ากับ

$$F_s = E / [N_y (kl/r)^2] \quad (2.21)$$

#### 2.4 ทฤษฎีการ Machining

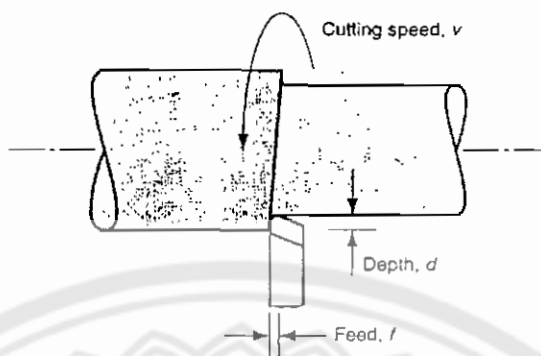
งาน Machining เป็นการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการกำจัดโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงาน

การกลึง เป็นกระบวนการกำจัดส่วนของชิ้นงานที่ไม่ต้องการออกจากผิวชิ้นงาน ทรงกระบอกที่กำลังหมุนด้วยมีดกลึงหรือทูล (Tool) โดยมีดกลึงจะเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นขนาดกับแกนหมุนของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.8 แสดงการกลึง

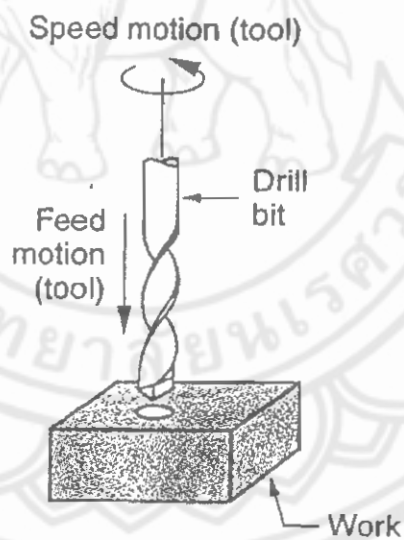
ที่มา: Techniques of press working sheet Metal. Eary, D.F. and E.A. Reed



รูปที่ 2.9 แสดงความเร็วตัด ระยะป้อน ความลึกตัด

ที่มา: Techniques of press working sheet Metal, Eary, D.F. and E.A. Reed

การเจาะ เป็นการทำให้เกิดรูกลมบนชิ้นงาน โดยเครื่องมือทรงกระบอกที่มีคมตัด 2 คม เรียกว่า ดอกสว่าน (Drill or Drill bit) โดยดอกสว่านจะหมุนเจาะลงบนชิ้นงานที่อยู่กับที่ โดยรูเจาะที่ได้จะมีขนาดเท่ากับดอกสว่าน รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการเจาะ

ที่มา: Techniques of press working sheet Metal, Eary, D.F. and E.A. Reed