

## บทที่ 2

### การวิเคราะห์ทางทฤษฎี

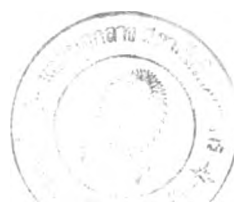


#### สมมติฐานทั่วไป

สมมติฐานต่อไปนี้เป็นสมมติฐานหลักสามารถใช้ได้ทั้งการดึงภายในขอบเขตความยืดหยุ่น เกินขอบเขตความยืดหยุ่น และการตัดโค้งภายในขอบเขตความยืดหยุ่นของเหล็กพลาสติกที่มีรอยบากบนเครื่องทดสอบความล้า

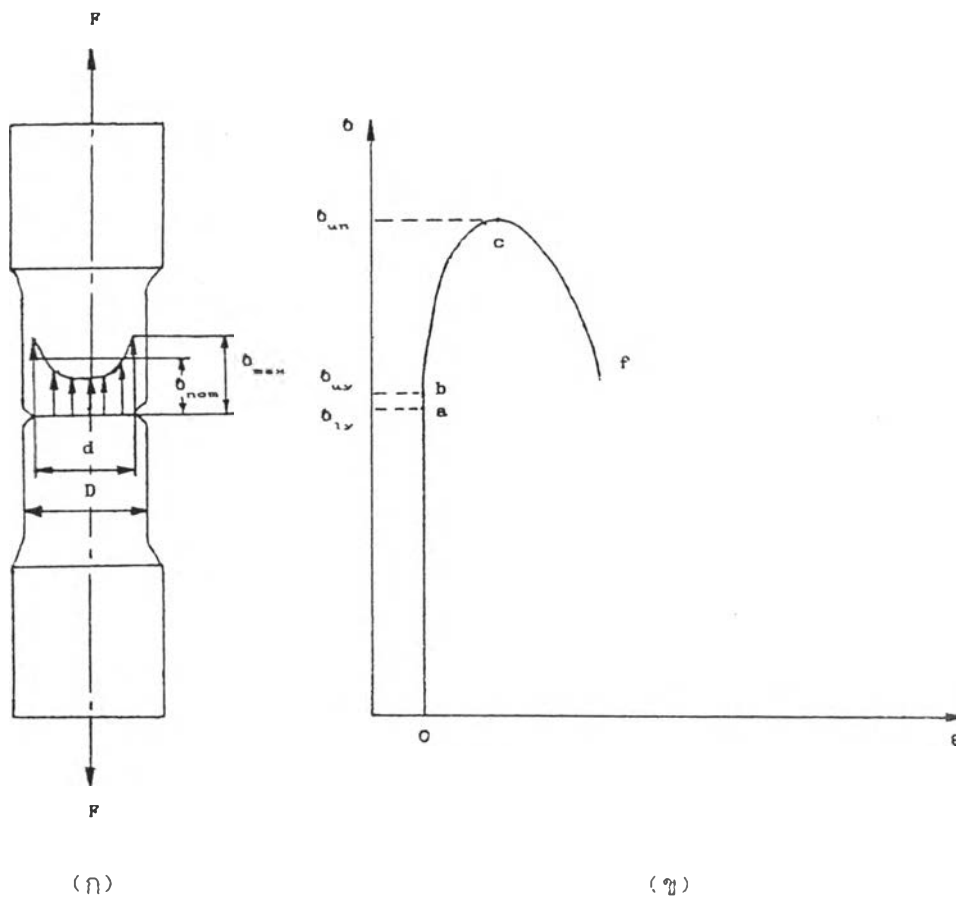
1. แนวภาระ (LOAD) ที่กระทำจะต้องผ่านจุดศูนย์กลางของพื้นที่ภาคตัด
2. ชิ้นทดสอบจะมีหน้าตัดสม่ำเสมอ
3. ความเค้นมีค่าสม่ำเสมอบริเวณหน้าตัดที่ไม่เปลี่ยนแปลง
4. ชิ้นทดสอบเป็นวัสดุที่มีเนื้อวัสดุเป็นแบบเดียวกันโดยตลอด (HOMOGENEOUS) และมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (ISOTROPY)
5. เมื่อชิ้นทดสอบถูกตัดโค้ง ระนาบของหน้าตัดที่เคยตั้งฉากกับแกนของชิ้นทดสอบจะยังคงเป็นระนาบที่ตั้งฉากกับแนวแกนของคานอยู่เช่นเดิม ซึ่งหมายความว่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ เมื่อถูกตัดโค้งจะแปรผันโดยตรงกับระยะทางที่วัดตั้งฉากออกมาจากแกนสะเทิน (NEUTRAL AXIS) และไม่พิจารณาผลของแรงเฉือน (SHEARING FORCE)
6. เนื้อวัสดุสามารถพิจารณาแบ่งเป็นชั้น (FIBER) ที่ขนานกับแนวแกนของชิ้นทดสอบหลาย ๆ ชั้นได้ และเนื้อวัสดุทุกชั้นสามารถยึดตัว หรือหดตัวได้อย่างอิสระ
7. ไม่มีแรงลัพธ์ (RESULTANT FORCE) ในแนวแกนของชิ้นทดสอบ
8. ชิ้นทดสอบมีลักษณะเป็นคานตรง และไม่มีความเค้นตั้งเดิม (INITIAL STRESS)
9. ไม่พิจารณาผลของความเค้น ความเครียดที่อยู่ใกล้กับภาระที่กระทำ

## แนวเหตุ และทฤษฎีที่สำคัญ



### ผลของรอยบากในเหล็กเหนียว

เมื่อเหล็กเหนียวที่มีรอยบากทำจากเหล็กกล้าละมุน (MILD STEEL) ถูกดึงด้วยแรง,  $F$  ดังรูปที่ 2.1 (ก) จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบดึง (TENSILE TEST) ดังรูปที่ 2.1 (ข) ผลของรอยบากจะมีผลต่อความเค้นคลากล่าง หรือจุดคลากล่าง,  $\sigma_{LY}$  (LOWER YIELD STRESS OR LOWER YIELD POINT) และความเค้นคลากบน หรือจุดคลากบน,  $\sigma_{UY}$  (UPPER YIELD STRESS OR UPPER YIELD POINT) จากรูปที่ 2.1 (ข) เมื่อต้องการจะหาความเค้นคลากล่าง หรือจุดคลากล่าง และความเค้นคลากบน หรือจุดคลากบน สามารถที่จะหาความเค้นคลากล่าง และความเค้นคลากบนได้ โดยลากเส้นตรง  $o a b$  ไปตัดกับเส้นโค้ง  $b c d$  ได้จุด  $a, b$  เป็นจุดความเค้นคลากล่าง และจุดความเค้นคลากบน (ปกติจุดทั้งสองจะใกล้กันมาก) ซึ่งเป็นจุดต่อระหว่างเส้นตรง  $o a b$  กับเส้นโค้ง  $a b c$  ในทางปฏิบัติแล้วจุด  $a, b$  ไม่สามารถจะเห็นได้ สำหรับจุด  $c$  เป็นจุดสูงสุดเรียกว่าความต้านแรงดึงรอยบาก  $\cdot \sigma_{UN}$  (NOTCH STRENGTH) ซึ่งจะคล้าย ๆ กับความต้านแรงดึงอันติมะ หรือความต้านแรงดึง (ULTIMATE TENSILE STRENGTH OR TENSILE STRENGTH) ของเหล็กเหนียวที่ไม่มีรอยบาก[20] จุด  $f$  เป็นจุดขาดเรียกว่า RUPTURE POINT



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับความเครียดจากการดึงเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก (ก) การกระจายความเค้นตามรัศมีของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก เมื่อถูกแรงดึง,  $F$  (ข) แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก

แรงดึงภายในขอบเขตความยืดหยุ่นของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก

สำหรับเหล็กเพลากลมที่มีรอยบากถูกดึงภายในขอบเขตความยืดหยุ่นตรงหน้าตัดที่มีรอยบากจะมีการกระจายความเค้นแตกต่างจากหน้าตัดที่อยู่ห่างจากรอยบากออกไป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 การกระจายความเค้นตรงหน้าตัดที่มีรอยบากจะไม่เป็นเส้นตรง

เพราะมีผลของ STRESS CONCENTRATION เข้ามาเกี่ยวข้องความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นตรงราก (ROOT) ของรอยบากสามารถหาได้จาก[21]

$$\sigma_{max} = K_t \sigma_{nom} = (K_t F)/A \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ  $K_t$  คือ ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นทางทฤษฎี ( THEORETICAL STRESS CONCENTRATION FACTOR ) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะของรอยบาก และ  $\sigma_{nom}$  คือ ความเค้นที่คำนวณโดยใช้หน้าตัดสุทธิ (NET SECTION) ตรงรอยบากเป็นหลัก

ค่าของความเค้นสูงสุดตามสมการที่ (2.1) จะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกินขอบเขตความยืดหยุ่นของวัสดุ ในกรณีความเค้นสูงสุดตรงรากของรอยบากมีค่าเท่ากับขอบเขตความยืดหยุ่นของวัสดุ จากสมการที่ (2.1) จะได้

$$\sigma_{max} = \sigma_e = (K_t F_e)/A \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

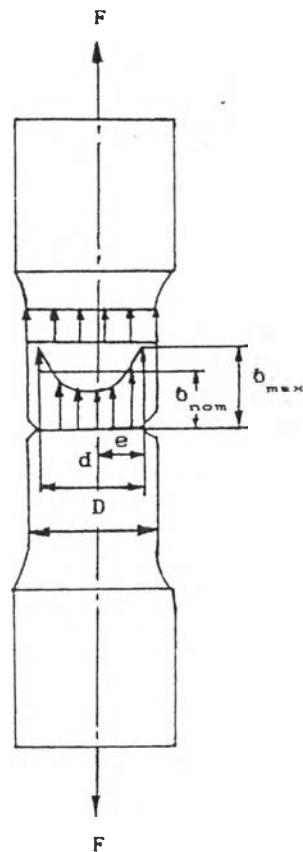
โดยที่

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

จะได้

$$\sigma_{max} = \sigma_e = (K_t F_e)/((\pi d^2)/4) = (K_t F_e)/(\pi e^2) \dots\dots(2.3)$$

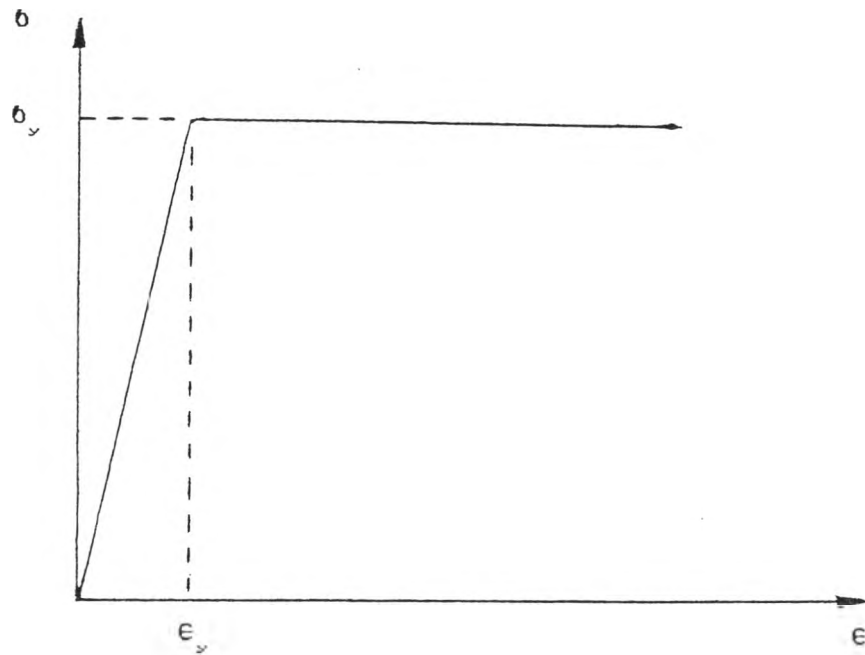
เมื่อ  $e$  คือครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลาง



รูปที่ 2.2 การกระจายความเค้นตามรัศมีของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก  
เมื่อถูกแรงดึง,  $F$  ภายในขอบเขตความยืดหยุ่น

ELASTIC-PERFECTLY PLASTIC , SIMPLE PLASTIC THEORY

เป็นแผนภาพความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 IDEAL STRESS-STRAIN DIAGRAM ของเหล็กเหนียวที่มีรอยบากเมื่อถูกแรงดึง,  $F$  ในช่วงเกินขอบเขตความยืดหยุ่นของวัสดุแบบ ELASTIC-PERFECTLY PLASTIC สำหรับ SIMPLE PLASTIC THEORY

แรงดึงในช่วงเกินขอบเขตความยืดหยุ่นของเหล็กเหนียวที่มีรอยบาก

ถ้าเหล็กเหนียวในรูปที่ 2.4 เป็นวัสดุแบบ ELASTIC - PERFECTLY PLASTIC ดังรูปที่ 2.3 เมื่อเหล็กเหนียวถูกดึงด้วยแรงดึงคงที่,  $F_y$  จนกระทั่งตรง

รากของรอยบากเกิดความเค้นเท่ากับจุดกลางของวัสดุสมการที่ (2.2) และสมการที่ (2.3) จะเปลี่ยนเป็น

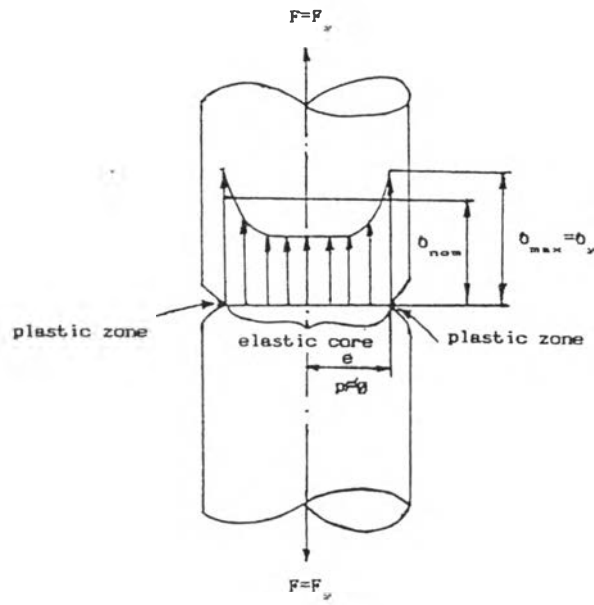
$$\sigma_{max} = \sigma_y = (K_c F_y) / A \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

หรือ

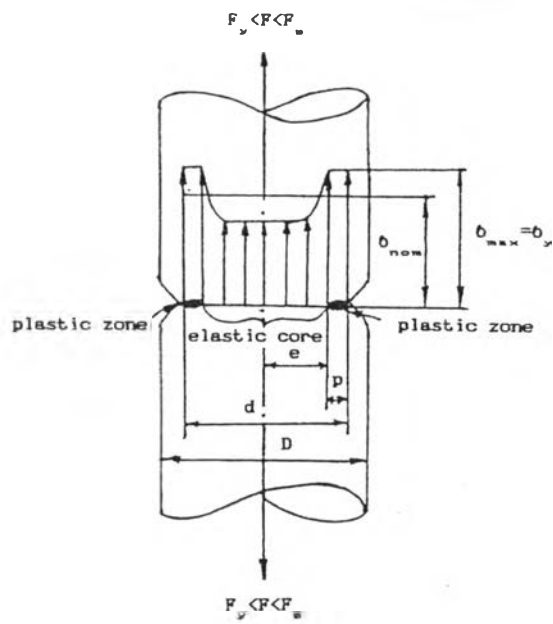
$$\sigma_{max} = \sigma_y = (K_c F_y) / ((\pi d^2) / 4) = (K_c F_y) / (\pi e^2) \quad \dots(2.5)$$

ซึ่งในกรณีนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 (ก) และภายในเนื้อเหล็กเพลากลมจะมีความลึกของ ELASTIC CORE มีค่าเป็น  $2e$  เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง,  $d$  ตรงรากรอยบาก ถ้าแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น PLASTIC ZONE ก็จะเริ่มแผ่ลึกเข้าไปหาแกนกลางตามรัศมีมากยิ่งขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 (ข) ในช่วงนี้ PLASTIC ZONE จะมีความเค้นเกิดขึ้นมีค่าเท่ากับจุดกลางของวัสดุทั้งหมด [5] และขนาดของความลึกของ ELASTIC CORE,  $2e$  จะมีค่าเล็กน้อย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเค้นจะหาได้จากสมการการสมมูลของแรง ดังสมการที่ (2.8) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ในช่วงพลาสติกตามสมการที่ (2.8) จะหาได้ ถ้ารู้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่เกิดขึ้นกับความลึกของ ELASTIC CORE ,  $2e$

ถ้าแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นอีก PLASTIC CORE ,  $p$  ก็จะแผ่ลึกเข้ามาเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิด PLASTIC ZONE เต็มทั้งหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ค)

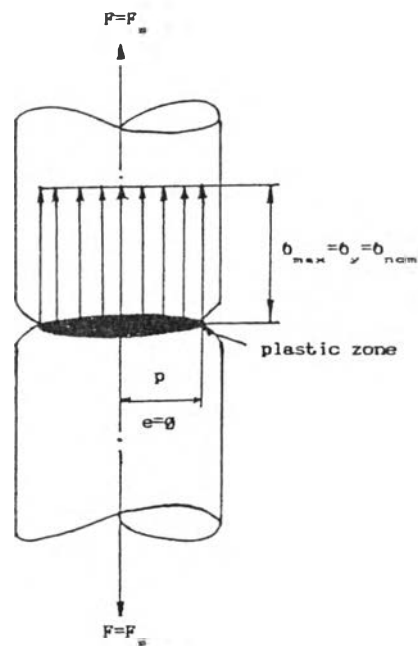


(n)



(n)



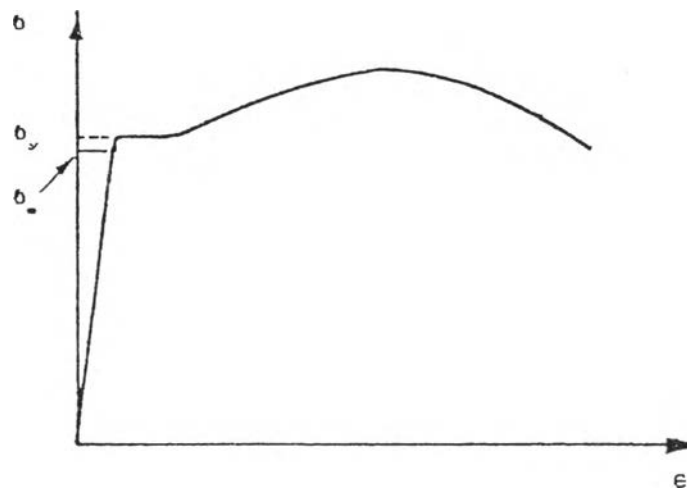


(ค)

รูปที่ 2.4 การกระจายความเค้นตามรัศมีของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก เมื่อ  
 ถูกแรงดึง,  $F$  ในช่วงเกินขอบเขตความยืดหยุ่นของวัสดุแบบ ELASTIC  
 -PERFECTLY PLASTIC (ก) เริ่มเกิด PLASTIC ZONE  
 ตรงรากรอยบาก (ข) PLASTIC ZONE แผ่เข้าหาแกน  
 กลาง (ค) เกิด PLASTIC ZONE เต็มทั้งหน้าตัด

หน้าตัดที่เกิด PLASTIC ZONE เต็มทั้งหน้าตัด โดยที่หน้าตัดอื่น ๆ ยังไม่เกิด  
 PLASTIC ZONE เต็มทั้งหน้าตัด เรียกว่า PLASTIC HINGE จะเห็นได้ว่า STRESS  
 CONCENTRATION จะไม่มีผลต่อแรงดึงพลาสติกสูงสุดเลข [1][2][5][14][22][28]  
 ผลของ STRESS CONCENTRATION มีอยู่อย่างเดียว คือ เป็นตัวบอกให้รู้ว่า PLASTIC  
 HINGE จะเกิดขึ้นตรงไหนเป็นแห่งแรกเท่านั้นเอง [26]

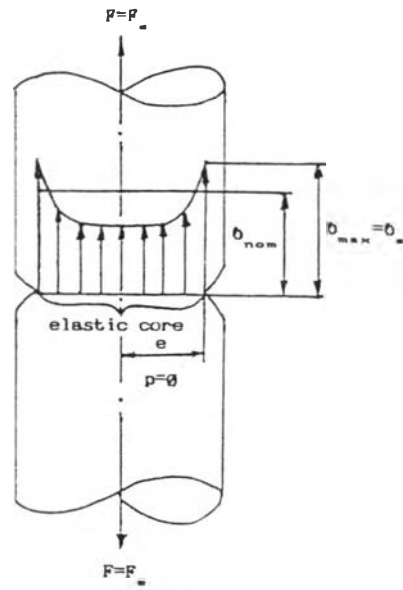
สำหรับเหล็กเหนียวที่มีแผนภาพความเค้นกับความเครียดดังแสดงในรูปที่ 2.5 นั้น จะมีการกระจายความเค้นภายในเนื้อของเหล็กเพลากลมแตกต่างกับ การกระจายความเค้นตาม SIMPLE PLASTIC THEORY เล็กน้อย การกระจายความเค้นภายในเนื้อของเหล็ก



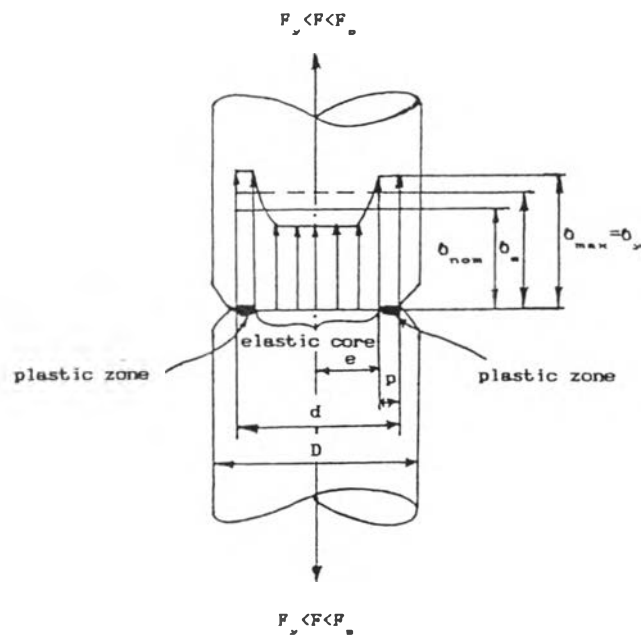
รูปที่ 2.5 แผนภาพความเค้นกับความเครียดของเหล็กเหนียว

เพลากลมที่เป็นเหล็กเหนียวเป็นเช่นนี้ เนื่องจาก DUCTILITY ของวัสดุ สำหรับวัสดุที่มี DUCTILITY สูงจะไม่เกิด STRAIN HARDENING ขึ้นใน STRESS DISTRIBUTION CURVE ดังนั้นจึงสามารถใช้ SIMPLE PLASTIC THEORY กับเหล็กเพลากลมที่เป็นเหล็กเหนียวได้

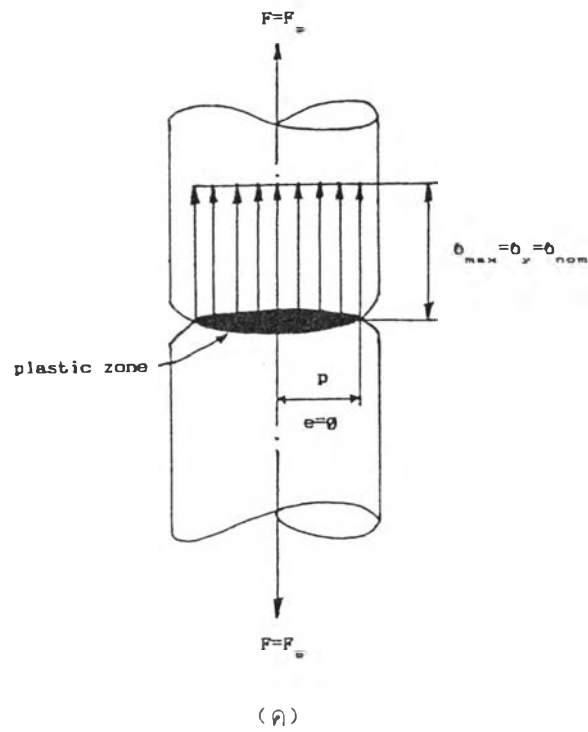
ในกรณีที่เป็นวัสดุซึ่งมีแผนภาพความเค้นกับความเครียดตามรูปที่ 2.5 การแผ่กระจายความเค้นตามรัศมีของเหล็กเพลากลมในรูปที่ 2.4 จะเปลี่ยนไปเป็นรูปที่ 2.6



(n)



(nj)



- รูปที่ 2.6 การกระจายความเค้นตามรัศมีของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบากเมื่อถูกแรงดึง,  $F$  ในช่วงเกินขอบเขตความยืดหยุ่นตามความเป็นจริง
- (ก) ชั้นของเนื้อวัสดุชั้นนอกเกิดความเค้นเท่ากับขอบเขตความยืดหยุ่น
  - (ข) PLASTIC ZONE แผ่เข้าหาแกนกลาง
  - (ค) เกิด PLASTIC ZONE เต็มทั้งหน้าตัด

การหาแรงดึงคลากต่ำสุด,  $F_u$ , ของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก

ถ้าเหล็กเพลากลมในรูปที่ 2.7 เป็นวัสดุแบบ ELASTIC-PERFECTLY PLASTIC

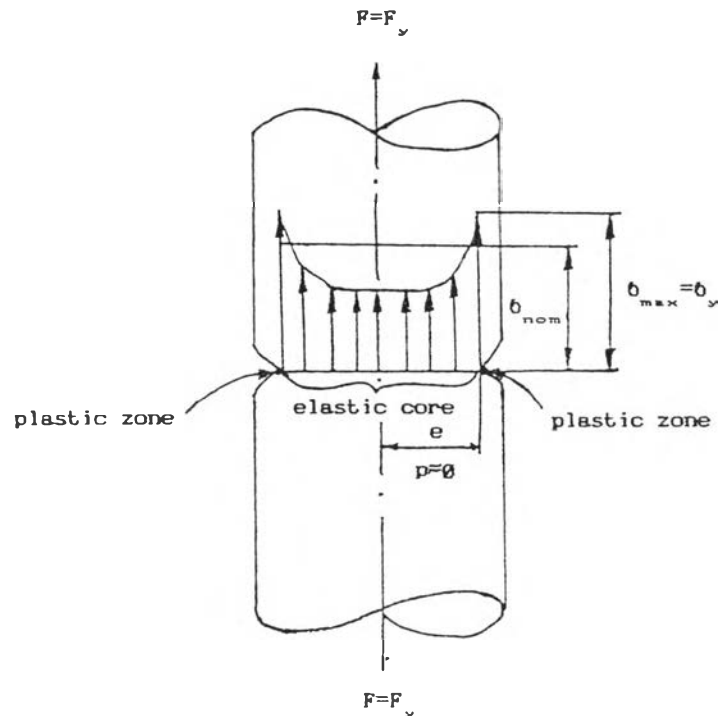
เมื่อเหล็กเพลากลมถูกดึงด้วยแรงดึงคลาก,  $F_y$  จนกระทั่งตรงรากของรอยบากเกิด PLASTIC ZONE จะมีความเค้นเกิดขึ้นเท่ากับจุดคลากของวัสดุ ซึ่งการหาแรงดึงคลากต่ำสุด,  $F_y$  ของเหล็กเพลากลมนี้จะหาได้จากสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5) คือ

$$F_y = (\sigma_y A) / K_t \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

หรือ

$$F_y = (\sigma_y \pi d^2) / (4K_t) = (\sigma_y \pi e^2) / K_t \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อ  $K_t$  คือ ตัวประกอบความเค้นหนาแน่นทางทฤษฎี (THEORETICAL STRESS CONCENTRATION FACTOR) หาได้จากรูปที่ 2.13  $\sigma_y$  คือ ความเค้นจุดคลากของวัสดุของเหล็กเพลากลมที่ไม่มีรอยบาก และภายในเนื้อเหล็กเพลากลมจะมีความเค้นของ ELASTIC CORE มีค่าเป็น  $2e$  เท่ากับ เส้นผ่าศูนย์กลาง,  $d$  ตรงรากรอยบาก



รูปที่ 2.7 การกระจายความเค้นตามรัศมีของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก  
เมื่อถูกแรงดึงคลากต่ำสุด,  $F_y$  ของวัสดุแบบ ELASTIC  
- PERFECTLY PLASTIC

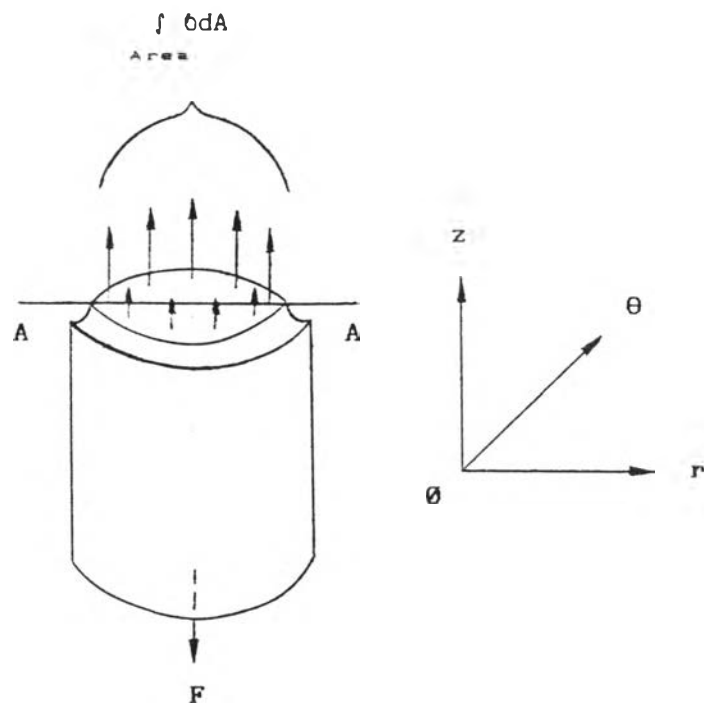
การหาแรงดึงเพื่อให้ได้ขนาดของบริเวณยืดหยุ่น-พลาสติกต่าง ๆ กัน

การคำนวณจะตั้งสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้

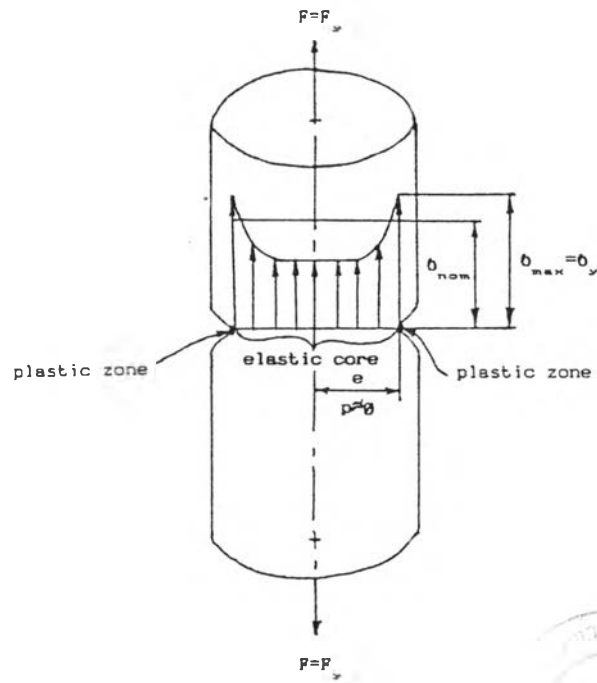
1. การวิเคราะห์จะใช้ระบบพิกัดเชิงขั้วทรงกระบอก (CYLINDRICAL POLAR COORDINATE)  $r, \theta, z$  กับเหล็กเพลากลมที่มีรอยบากดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 (ข)
2. วัสดุเป็นแบบ ELASTIC-PERFECTLY PLASTIC สำหรับ SIMPLE PLASTIC THEORY ดังรูปที่ 2.3

+ เมื่อเหล็กเพลากลมถูกดึงด้วยแรงดึงกลาง,  $F_y$  จนกระทั่งตรงรากของรอยบากเกิด PLASTIC ZONE จะมีความเค้นเกิดขึ้นเท่ากับ จุดคดกลางของวัสดุ ดังรูปที่ 2.9 (ก) และได้สมการที่ (2.5) และภายในเนื้อเหล็กเพลากลมจะมีความลึกของ ELASTIC CORE มีค่าเป็น  $2e$  เท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง,  $d$  ตรงรากรอยบากถ้าแรงดึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น PLASTIC ZONE,  $p$  ก็จะเริ่มแผ่ลึกเข้าไปหาแกนกลางตามรัศมีมากยิ่งขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 (ข) ในช่วงนี้ PLASTIC ZONE จะมีความเค้นเกิดขึ้นมีค่าเท่ากับจุดคดกลางของวัสดุทั้งหมด[5] และขนาดของความลึกของ ELASTIC CORE,  $2e$  จะมีค่าเล็กลง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเค้นจะหาได้จากสมการการสมดุลย์ของแรงที่พิจารณาจากภาคตัด A-A ดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 (ข) จะได้ว่า

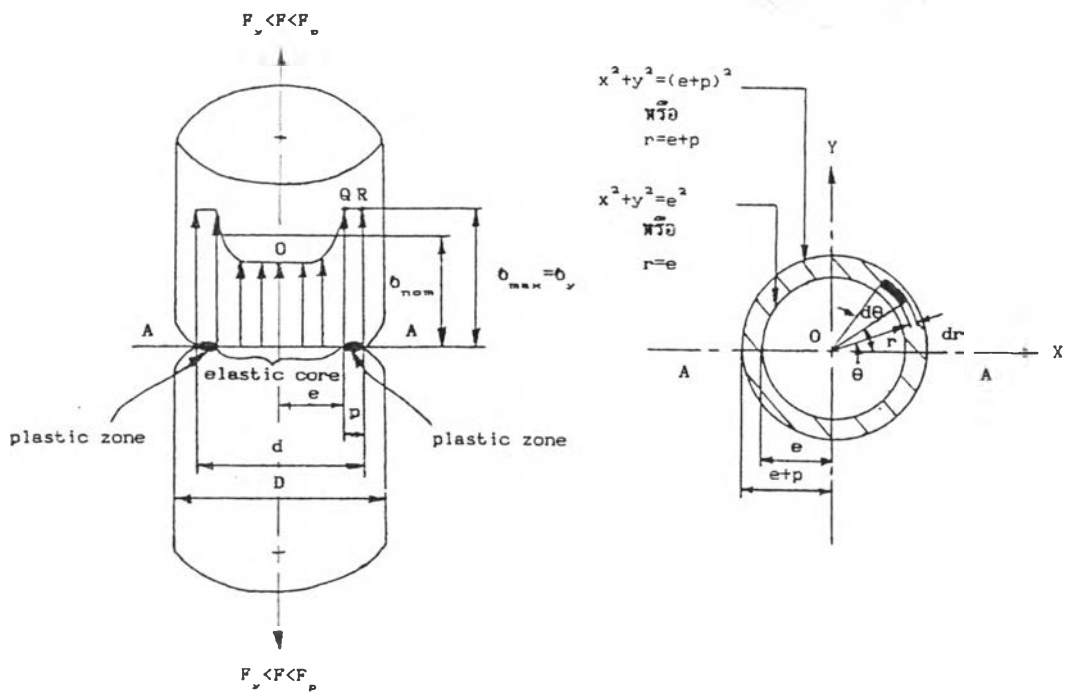
$$\begin{aligned}
 F &= F_{total} = F_{elastic} + F_{plastic} \\
 F &= F_{total} = \int_0^e \sigma dA + \int_{e+p}^{e+p} \sigma dA \\
 F &= 4 \int_0^{\pi/2} \int_0^e \sigma r dr d\theta + 4 \int_0^{\pi/2} \int_e^{e+p} \sigma r dr d\theta \dots\dots\dots(2.8)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 2.8 การสมดุลย์ของแรงที่ภาคตัด A-A

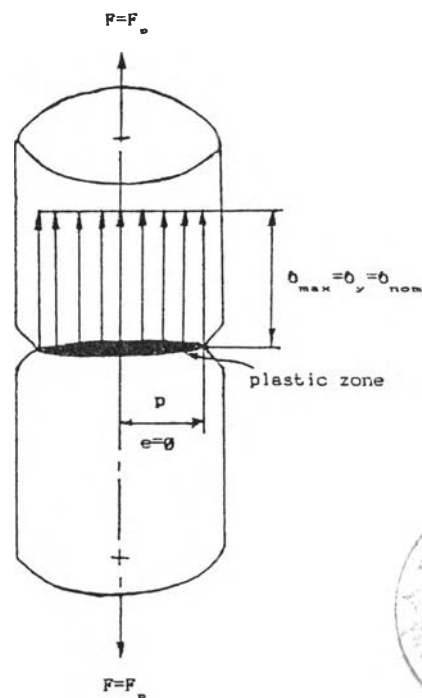


(п)



(п)





(ค)

รูปที่ 2.9 การกระจายความเค้นตามรัศมีของเหล็กเพลากลมที่มีรอยบาก เมื่อ  
 ถูกแรงดึง ,  $F$  ในช่วงเกินขอบเขตความยืดหยุ่นของวัสดุแบบ  
 ELASTIC-PERFECTLY PLASTIC (ก) เริ่มเกิด PLASTIC  
 ZONE ตรงรากของรอยบาก (ข) PLASTIC ZONE แผ่เข้า  
 หาแกนกลาง (ค) เกิด PLASTIC ZONE เต็มทั้งหน้าตัด

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุของเหล็กเพลากลมที่  
 มีรอยบากในช่วงพลาสติกตามสมการที่ (2.8) จะหาได้ ถ้ารู้ความสัมพันธ์ระหว่างความ  
 เค้นที่เกิดขึ้นกับความลึกของ ELASTIC CORE แทนค่าความสัมพันธ์ของความเค้นในแต่ละ  
 ช่วงดังรูปที่ 2.9 (ข) ลงไปในสมการที่ (2.8) คือ

เส้นโค้ง OD:  $\sigma = \sigma_{nom}$  เมื่อ  $0 \leq r \leq e$

เส้นตรง QR:  $\sigma = \sigma_y$  เมื่อ  $e \ll r \ll (e+p)$   
 จากสมการที่ (2.8) จะได้

$$\begin{aligned}
 F &= 4b_{nom} \int_0^{\pi/2} \int_0^e r dr d\theta + 4b_y \int_0^{\pi/2} \int_e^{e+p} r dr d\theta \dots\dots\dots(2.9) \\
 &= 4b_{nom} \int_0^{\pi/2} [r^2/2]_0^e d\theta + 4b_y \int_0^{\pi/2} [r^2/2]_e^{e+p} d\theta \\
 &= 2b_{nom} \int_0^{\pi/2} e^2 d\theta + 2b_y \int_0^{\pi/2} [p^2+2ep] d\theta \\
 &= 2b_{nom} e^2 [\theta]_0^{\pi/2} + 2b_y [p^2+2ep] [\theta]_0^{\pi/2} \\
 F &= b_{nom} \pi e^2 + b_y \pi [p^2+ep] \dots\dots\dots(2.10)
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ ( 2.10 ) นี้เองสามารถที่จะหาแรงดึง เพื่อให้ได้ขนาดของ บริเวณพลาสติกต่าง ๆ กัน เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงคราก,  $\sigma_y$  เส้นผ่าศูนย์กลางตรงรอยบาก, d

ความล้า (FATIGUE)

ค่าคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทางวิศวกรรม เช่น ความต้านแรงดึง ,  $\sigma_{uL}$  จุดคลาก ,  $\sigma_y$  ที่ได้จากการทดสอบดิ่งนั้น แรงที่ใช้ดึงจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นน้อยให้ชิ้นทดสอบมีเวลาพอที่จะเกิดความเครียด จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าแรงกระทำภายใต้ภาวะสถิตย์

สำหรับชิ้นงานภายใต้ภาวะความเค้นแปรเปลี่ยนระหว่างค่า เช่นที่จุดหนึ่งตรงผิวของเพลลาที่หมุน ภายใต้ภาวะการตัดจะเกิดทั้งความเค้นดึง และกดในแต่ละรอบที่หมุนบ่อยครั้งที่ชิ้นส่วนทางกล ต้องเสียหายภายใต้ภาวะความเค้นแปรเปลี่ยนทั้ง ๆ ที่ความเค้นสูงสุดต่ำกว่าความต้านแรงดึง ,  $\sigma_{uL}$  และบ่อยครั้งที่ค่าต่ำกว่าจุดคลาก ,  $\sigma_y$  เสียด้วยซ้ำ

สาเหตุที่เสียหายเพราะความเค้นแปรเปลี่ยนเหล่านี้กระทำซ้ำหลาย ๆ วัฏจักร (CYCLE) ความเสียหายกรณีเช่นนี้ เรียกว่าเสียหายเพราะความล้า

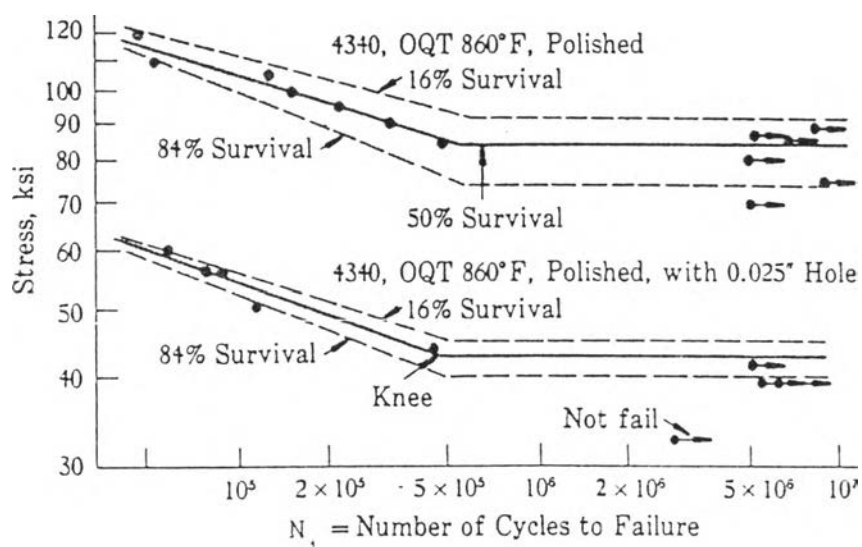
การแตกหักเนื่องจากความล้าอาจจะเริ่มจากบริเวณที่มีรอยแตกขนาดเล็ก รอยแตกนี้จะมีขนาดเล็กมากจนกระทั่งไม่อาจมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ถึงแม้ว่าจะใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ตรวจก็ยังยากที่จะหาตำแหน่งรอยแตกนี้ได้ ณ ตำแหน่งนี้ เมื่อความเค้นที่เกิดขึ้นกระทำซ้ำไปอีกหลาย ๆ ครั้ง รอยแตกก็จะเริ่มขยายขึ้นเรื่อย ๆ และเร็วขึ้น ขนาดหน้าตัดก็จะเล็กลง ทำให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหน้าตัดที่เหลือขาดออกจากกันทันที พื้นที่หน้าตัดที่ขาดจะแบ่งออกเป็นสองช่วง ช่วงแรกเกิดจากการขยายรอยแตก ช่วงที่สองขาดจากกันทันที โดยช่วงที่สองนี้มีลักษณะคล้ายการขาดของวัสดุเปราะ เช่นรอยขาดของเหล็กหล่อ เป็นการขาดเพราะการดึง โดยทั่วไปรอยแตกเบื้องต้น จะเกิดตรงบริเวณผิวที่ขาดความต่อเนื่อง เช่น การเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างกะทันหัน มีการเจาะร่องลิ้ม เจาะรู ความไม่เรียบของผิวจากการตัดกลึง หรือจากการทำเครื่องหมายต่าง ๆ ความเค้นที่เกิดขึ้น ณ บริเวณเหล่านี้จะมีค่าสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ

ความต้านแรงทนทาน (ENDURANCE STRENGTH) และขีดจำกัดความทนทาน (ENDURANCE LIMIT)

การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่รับแรงเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร จะไม่ใช้ความต้านแรงดึงคลาก หรือความต้านแรงดึงเป็นรากฐาน แต่จะใช้ความต้านแรงที่เรียกว่าความต้านแรงทนทาน ซึ่งหาได้จากขีดจำกัดความทนทาน หรือจากการทดลอง โดยมีนิยามดังนี้

ขีดจำกัดความทนทาน หรือขีดจำกัดความล้า (FATIGUE LIMIT) ,  $\sigma'$  หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดที่กระทำซ้ำกันสองทิศทาง (REVERSED STRESS) ต่อชิ้นทดสอบผิวขัดมัน (MIRROR POLISHED) เป็นจำนวนวัฏจักรนับไม่ถ้วน โดยที่ชิ้นทดสอบนั้นไม่เกิดการแตกหัก (เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบประมาณ 8 มิลลิเมตร)

การทดสอบจากการดัด (REVERSED BENDING) ในขณะที่ชิ้นทดสอบหมุนไปครบหนึ่งรอบ ตำแหน่งคงที่ ณ ผิวของชิ้นทดสอบ ก็จะได้รับ ความเค้นที่เปลี่ยนจากความเค้นดึงสูงสุดไปเป็นความเค้นกดสูงสุด แล้วกลับมาความเค้นดึงสูงสุดอีก เรียกว่า หนึ่งวัฏจักร ถ้าวัสดุชิ้นทดสอบเป็นเหล็ก เมื่อนำผลจากการทดลองมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.10 [10]



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับจำนวนวัฏจักร [10]

จากจุดหักศอก (KNEE) ในรูปที่ 2.10 จะเห็นว่ากราฟเป็นเส้นตรงเกือบอยู่ในแนวระดับแสดงว่าถ้าให้ความเค้นต่อชิ้นทดสอบต่ำกว่านี้แล้ว ชิ้นทดสอบจะไม่แตกหักเลย (ทางทฤษฎี) แต่ในทางปฏิบัติชิ้นทดสอบจะต้องขาดออกเมื่อจำนวนวัฏจักรสูงมาก ถ้าชิ้นทดสอบเป็นแบบผิวขัดมัน และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 มิลลิเมตร ความเค้น ณ จุดหักศอกบนเส้น การคงอยู่ 50 เปอร์เซ็นต์ (SURVIVAL) เรียกว่าขีดจำกัดความทนทาน และชิ้นทดสอบที่รับความเค้นระดับนี้ให้ถือว่า มีชีวิตไม่จำกัด (INFINITE LIFE) ในทางปฏิบัติให้ถือว่า ชิ้นงานที่สามารถรับแรงได้จำนวนวัฏจักรมากกว่า 1 ล้าน ( $10^6$ ) เป็นชิ้น

งานที่มีชีวิตไม่จำกัด

ชิ้นงานทั่วไปจะมีขนาดไม่เท่ากับชิ้นทดสอบ และผิวหน้าก็อาจจะไม่ได้ขัดมันตลอดจนแรงที่กระทำก็อาจจะเป็นแรงอย่างอื่น ๆ เช่น แรงบิด เป็นต้น จากการทดลองพบว่าขีดจำกัดความทนทานจะผิดไปจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน ในกรณีเช่นนี้ก็จะเรียกว่าความต้านแรงทนทานเช่นกัน เพราะฉะนั้นเมื่อกล่าวอย่างกว้าง ๆ แล้ว ความต้านแรงทนทานหมายถึงความต้านแรงทนทานของชิ้นทดสอบที่ไม่มีขีดจำกัดความทนทาน หรือความต้านแรงทนทานของชิ้นงานจริง

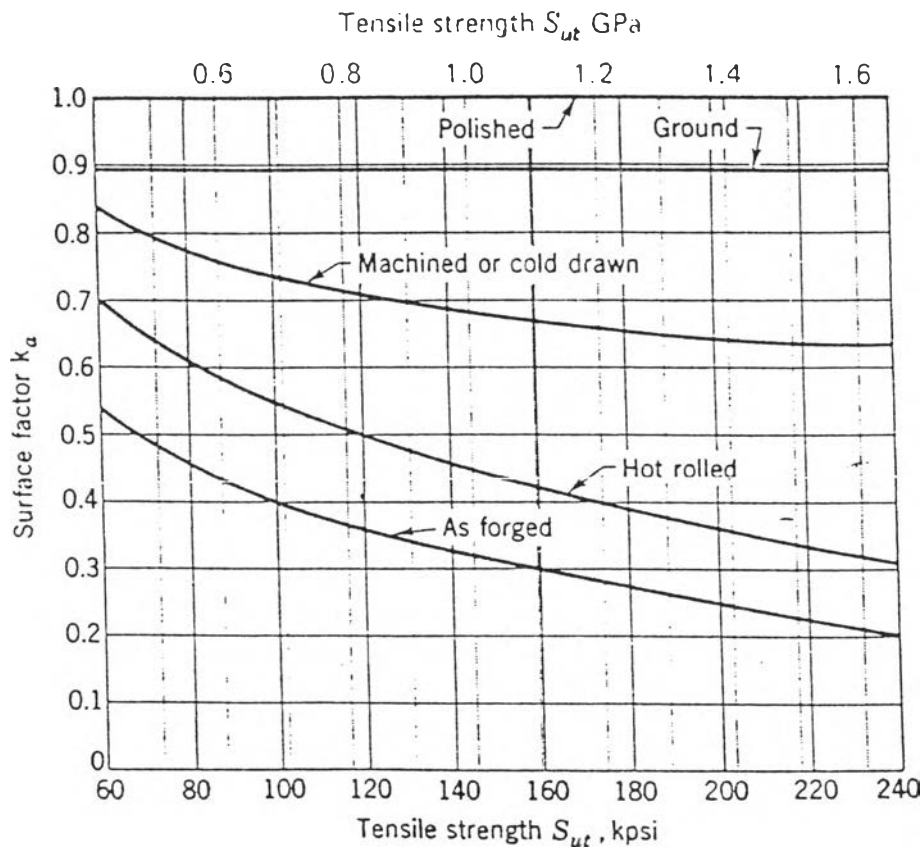
เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับขีดจำกัดความทนทานมีน้อยมาก ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณค่าขีดจำกัดความทนทาน (สำหรับการคงอยู่ 50 เปอร์เซ็นต์) ในกรณีของการตัดจากสมการที่ (h) หน้า 109[10] ดังนี้คือ

$$\sigma'_{\infty} = 0.50\sigma_{uc} \quad (\text{สำหรับเหล็กกล้าเหนียว ซึ่ง } \sigma_{uc} < 1380 \text{ N/mm}^2) \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

ค่าดังกล่าวนี้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเพื่อใช้ประกอบการคำนวณในที่นี้เท่านั้น

#### ตัวประกอบของผิว (SURFACE FACTOR)

ค่าขีดจำกัดความทนทานดังที่กล่าวมาแล้ว ใช้สำหรับชิ้นทดสอบผิวขัดมันเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วคุณภาพของผิวชิ้นงานจะต่ำกว่าชิ้นทดสอบ ความขรุขระของผิวหน้าก็ทำให้ชิ้นงานแตกหักเนื่องจากความล้าได้ง่ายขึ้นอีก เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการปรับค่าขีดจำกัดความทนทานของชิ้นงานตามสภาพของผิว ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงตัวประกอบที่ใช้สำหรับลดค่าดังกล่าวนี้ ของผิวชนิดต่าง ๆ มีชื่อเรียกว่า ตัวประกอบของผิว ,  $k_s$  โปรดสังเกตจากรูปที่ 2.11 ว่า ถ้าชิ้นงานที่มีโอกาสแตกหักเนื่องจากความล้าแล้ว คุณภาพของผิวมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นงานนั้นมาก



รูปที่ 2.11 ตัวประกอบของผิว,  $k_a$  สำหรับเหล็กกล้า [28]

### ตัวประกอบของขนาด (SIZE FACTOR)

การทดสอบหาขีดจำกัดความทนทาน ทำโดยใช้ชิ้นทดสอบขนาดมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ถ้าขนาดหน้าตัดโตขึ้นไปอีก จะพบว่าขีดจำกัดความทนทานลดลง ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบมาคูณค่าขีดจำกัดความทนทานจากชิ้นทดสอบมาตรฐาน เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นทดสอบ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ตัวประกอบของขนาด,  $k_b$  โดยแนะนำให้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 k_b &= 1.00 \quad \text{สำหรับ } d \leq 8 \quad \text{mm} \\
 k_b &= 0.85 \quad \text{สำหรับ } 8 < d \leq 50 \quad \text{mm} \\
 k_b &= 0.75 \quad \text{สำหรับ } d > 50 \quad \text{mm}
 \end{aligned}$$

#### ตัวประกอบของแรง (LOAD FACTOR)

จากการที่ได้ทราบมาแล้วว่า วัสดุทั่วไปมีคุณสมบัติในการรับความเค้นเฉือนได้น้อยกว่าความเค้นดึง หรือกด ในกรณีของขีดจำกัดความทนทานก็เช่นเดียวกัน จากการทดสอบจะพบว่า ขีดจำกัดความทนทานสำหรับการเฉือนมีค่าน้อยกว่าการดัด ตัวประกอบที่ใช้ลดค่าขีดจำกัดความทนทานจากการดัดนี้เรียกว่า ตัวประกอบของแรง,  $k_c$  โดยแนะนำให้ใช้ค่าดังต่อไปนี้

$$k_c = 1.00 \quad \text{สำหรับการดัด}$$

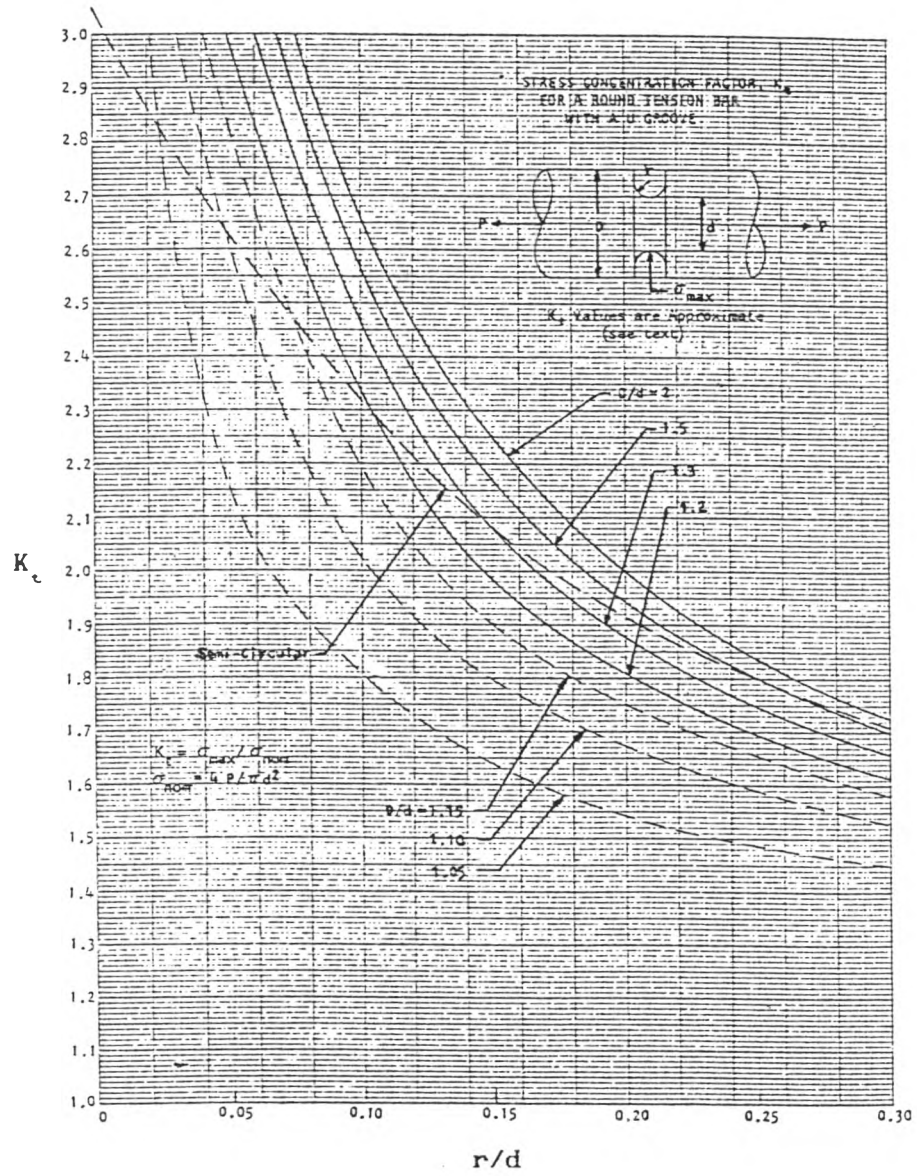
#### ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (STRESS CONCENTRATION FACTOR)

ความต้านแรงทนทานดังกล่าวมาแล้ว เป็นค่าสำหรับชิ้นงานที่มีหน้าตัดคงที่ ในกรณีที่ทั่วไปชิ้นงานอาจมีลักษณะขาดความต่อเนื่อง เช่น มีร่อง รู เจาะ หรือเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณตามปกติ นั่นคือ

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_{\text{nom}} \quad \dots \dots \dots (2.12)$$

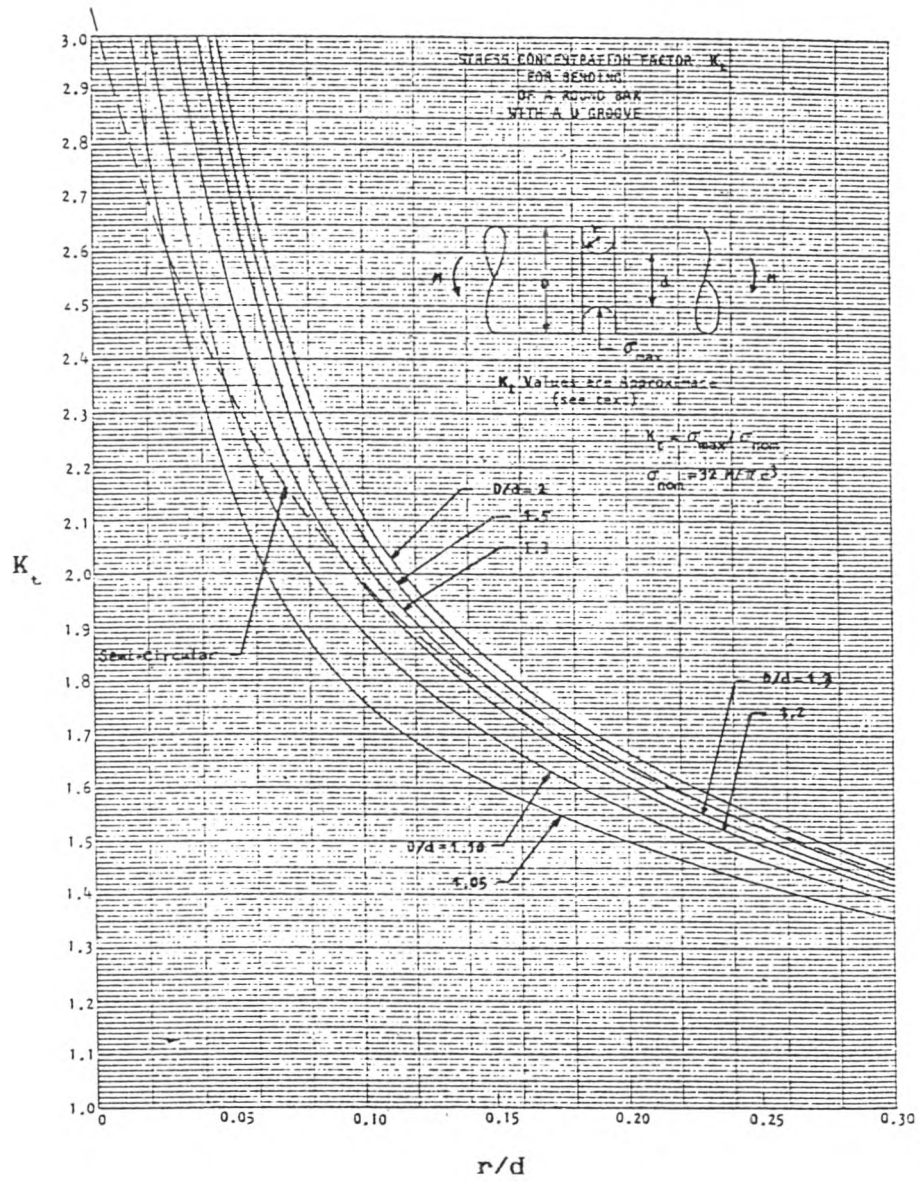
โดยที่  $\sigma_{\text{nom}}$  เป็นค่าที่คำนวณจาก  $F/A$ ,  $MC/I$  หรือ  $TR/J$  โดยคิดพื้นที่หน้าตัดสุทธิ (NET) และ  $K_t$  มีชื่อเรียกว่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นทางทฤษฎี (THEORETICAL STRESS CONCENTRATION FACTOR)

ค่า  $K_t$  นี้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองชิ้นงานชนิดต่าง ๆ โดยใช้วัสดุพิเศษโดยเฉพาะ เรียกว่าวัสดุยืดหยุ่นโปร่งแสง (PHOTOELASTIC MATERIAL) ซึ่งได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 ตามปกติแล้วชิ้นงานจริงจะเป็นวัสดุที่แตกต่างไปจากวัสดุที่ใช้ทดลอง ดังนั้น ความไว (SENSITIVITY) ของวัสดุต่อการเพิ่มความเค้นบริเวณที่มี



รูปที่ 2.12 เหล็กเพลากลมมีร่องภายใต้การดึง หรือกด  $\sigma_{nom} = F/A$   
โดย  $A = (\pi d^2)/4$  [21]

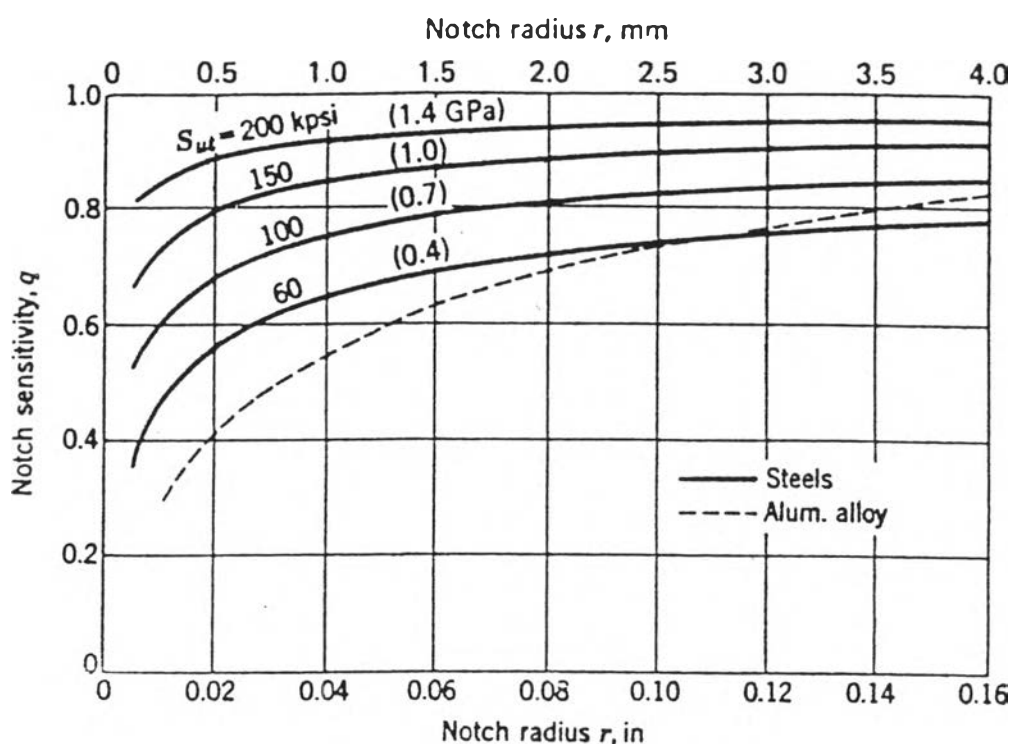




รูปที่ 2.13 เหล็กเพลากลมมีร่องภายใต้การดัด  $\sigma_{nom} = (MC)/I$   
โดย  $C = d/2$  และ  $I = (\pi d^4)/64 [21]$

ร่อง รู หรือเปลี่ยนแปลงจึงแตกต่างกันไปด้วย ดัชนีที่ใช้บอกถึงความไวของวัสดุต่อการเกิดความเค้นหนาแน่นนี้เรียกว่า ความไวของรอยเจาะ (NOTCH SENSITIVITY) ,  $q$  จากสมการที่ (4.3) หน้า 113[10] ซึ่งมีนิยามว่า

$$q = (K_{f1}-1)/(K_{t1}-1) \dots\dots\dots(2.13)$$



รูปที่ 2.14 แผนภูมิความไวของรอยเจาะสำหรับเหล็กกล้า และ อลูมิเนียมผสมเหนียว ที่อยู่ภายใต้ภาวะการดัดกลับไป กลับมา หรือการดึงกดสลับกันในแนวแกน ในกรณีที่ รัศมีรอยเจาะโตกว่าในรูปให้หาค่า  $q$  ที่ค่ารัศมี  $r = 0.16$  in. (4 mm.) [28]

หรือ

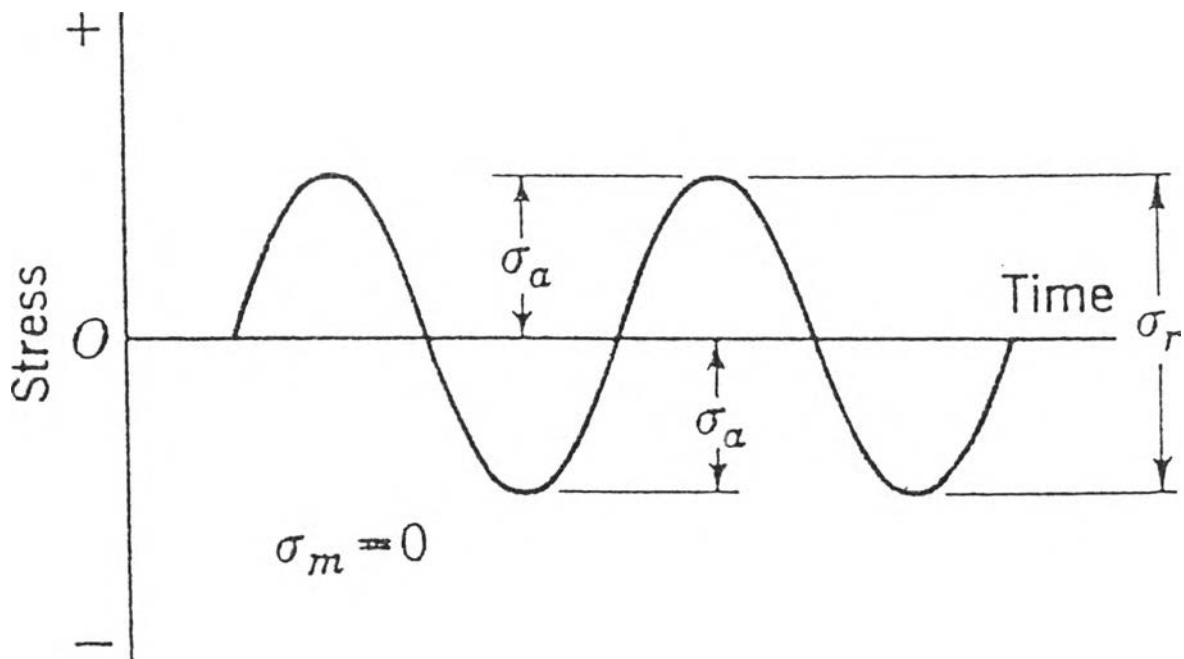
$$K_f = 1 + q(K_c - 1) \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

เมื่อ

$$K_f = \text{ตัวประกอบลดความต้านแรงล้า ( FATIGUE - STRENGTH REDUCTION FACTOR)}$$

สำหรับความไวของรอยเจาะใช้รูปที่ 2.14

เกณฑ์ของโซเดอร์เบิร์ก (SODERBERG'S CRITERION)



รูปที่ 2.15 แบบของการเปลี่ยนแปลงความเค้นแบบไซน์ซอยดัล (SINUSOIDAL) กรณีกระทำกลับไปกลับมา [28]

ในการออกแบบชิ้นงานโดยคิดถึงความล้า มักนิยมใช้วิธีการที่เรียกว่า เกณฑ์ของไซเดอร์เบิร์กเป็นส่วนมาก

ในชิ้นงานทั่วไปแล้ว แรงจะเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ไม่อาจจะทราบได้อย่างแน่นอน แต่เพื่อให้สามารถคำนวณได้ จึงสมมติให้แรงเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบบไซน์ซวยด์ ดังรูปที่ 2.15 เป็นแบบกลับไปกลับมา คือ เปลี่ยนแปลงจากค่าบวกสูงสุดไปยังค่าลบสูงสุดที่มีขนาดเท่ากัน ถ้าให้อัตราส่วนความเค้น , R (STRESS RATIO) คือ

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

เมื่อ

$$\sigma_{\min} = \text{ความเค้นดัดต่ำสุด}$$

$$\sigma_{\max} = \text{ความเค้นดัดสูงสุด}$$

จากรูปที่ 2.15 จะได้ว่า

$$R = -1$$

นอกจากนี้ยังมีนิยามที่จำเป็นจะต้องทราบอีกจากสมการที่ (a) หน้า 105[10] จะได้ว่า

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$$

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$$

เมื่อ

$$\sigma_m = \text{ความเค้นเฉลี่ย (MEAN STRESS)}$$

$$\sigma_a = \text{ความเค้นส่วนเปลี่ยน (STRESS AMPLITUDE)}$$

ถ้าชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดกลม โดยที่  $\sigma_m$  และ  $\sigma_a$  สามารถหาได้จากสมการที่ (f) และสมการที่ (g) หน้า (109)[10] จะได้

$$b_m = (M_m C) / I \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$$b_a = (M_a C) / I \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

ส่วนค่า  $M_m$  และ  $M_a$  หาค่าได้จากสมการ

$$M_m = (M_{max} + M_{min}) / 2 \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

$$M_a = (M_{max} - M_{min}) / 2 \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

เมื่อ

$$M_m = \text{โมเมนต์ดัดเฉลี่ย}$$

$$M_a = \text{โมเมนต์ดัดส่วนเปลี่ยน}$$

$$M_{max} = P l_c$$

= โมเมนต์ดัดสูงสุด

$$M_{min} = P l_c$$

= โมเมนต์ดัดต่ำสุด

$$P = \text{แรงที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด}$$

$$l_c = \text{ระยะจากแรงที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดถึงบริเวณที่ต้องการให้เกิดโมเมนต์ดัด}$$

$$C = d / 2$$

= ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่าศูนย์กลาง

$$I = (\pi d^4) / 64$$

= โมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดกลม

สำหรับเกณฑ์ของไซเดอร์เบิร์ก ในกรณีที่ชิ้นงานมีความเค้นหนาแน่นจากสมการที่ (4.4) หน้า 116[10] จะได้

$$1/S.F. = b_m / b_y + (K_f b_a) / b_m \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

ความต้านแรงชนิดมีชีวิตจำกัด (ENDURANCE STRENGTH FOR A FINITE LIFE)

การออกแบบที่กล่าวมาแล้วเป็นการออกแบบให้ชิ้นงานมีอายุใช้งานไม่จำกัด (แรงมีวัฏจักร  $N_1$  มากกว่า 1 ล้านครั้ง) แต่มีชิ้นงานจำนวนมากที่ใช้งานซึ่งจำนวนวัฏจักรน้อยกว่า 1 ล้านครั้ง จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าความต้านแรงทนทานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนวัฏจักรน้อยกว่า 1 ล้านครั้ง

สำหรับความต้านแรงทนทาน  $\sigma_u$  เมื่อ  $N_1$  มากกว่า  $10^5$  ครั้ง แต่น้อยกว่า  $10^6$  ครั้ง อาจหาค่าโดยประมาณได้จากสมการที่ (๑) หน้า 118[10] จะได้

$$\sigma_u = \sigma'_u (10^6/N_1)^{0.085} \quad \dots\dots\dots(2.20)$$

ค่าความต้านแรงทนทานในสมการที่ (2.20) นี้ยังจะต้องลดลงอีกตามตัวประกอบของผิว ตัวประกอบของขนาด ตัวประกอบของแรง ก่อนที่จะนำไปใช้คำนวณออกแบบดังสมการที่ (2.21) คือ

$$\sigma_u = k_s k_b k_c \sigma'_u (10^6/N_1)^{0.085} \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

ส่วนตัวประกอบความเค้นหนาแน่นก็มีผู้พบว่า ค่าที่ใช้ควรจะน้อยกว่าการออกแบบให้มีชีวิตไม่จำกัด สมการที่แนะนำให้ใช้หาตัวประกอบความเค้นหนาแน่น สำหรับการออกแบบให้มีชีวิตจำกัด กับวัสดุที่เป็นเหล็กจากสมการที่ (๑) หน้า 119[10] จะได้

$$\begin{aligned} K_{F1} &= N_1^{(10 \log K_f / 3)} / 10^{10 \log K_f} \\ &= N_1^{(10 \log K_f / 3)} / K_F \quad \dots\dots\dots(2.22) \end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณจากสมการที่ (2.19) โดยให้เปลี่ยนค่า  $K_F$  เป็น  $K_{F1}$  จะได้

$$1/S.F. = \sigma_m / \sigma_y + (K_{F1} \sigma_u) / \sigma_m \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

เมื่อ

$N_1$  = จำนวนรอบของการขาดของชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดกลม

$K_{f1}$  = ตัวประกอบลดความต้านแรง (STRENGTH REDUCTION FACTOR) เมื่อมีอายุจำกัด  $N_1 < 10^6$  รอบ

S.F. = ค่าความปลอดภัย

สมการที่ (2.23) เป็นเกณฑ์ของโซเดอร์เบิร์ก ในกรณีที่ชิ้นงานมีความเค้น  
หนาแน่น สำหรับการออกแบบให้มีชีวิตจำกัด