

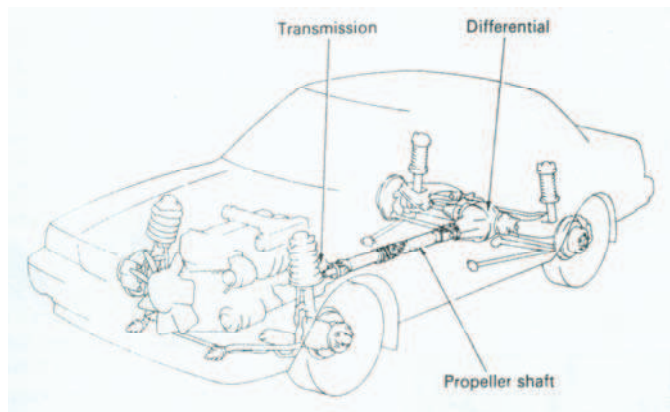
## BAB 6 POROS

Poros merupakan salah satu komponen terpenting dari suatu mesin yang membutuhkan putaran dalam operasinya. Secara umum poros digunakan untuk meneruskan daya dan putaran.

### 1. Jenis-jenis poros:

#### a. Poros transmisi

- Beban berupa : momen puntir dan momen lentur
- Daya dapat ditransmisikan melalui : kopling, roda gigi, belt, rantai.



#### b. Spindel

- Poros transmisi yang relatif pendek, misal : poros utama mesin perkakas dengan beban utama berupa puntiran.
- Deformasi yang terjadi harus kecil dan bentuk serta ukurannya harus teliti.



#### c. Gandar

- Poros yang tidak berputar
- Menerima beban lentur, misalnya pada roda-roda kereta



## 2. Hal Penting Dalam Perencanaan Poros

### a. Kekuatan Poros :

- Beban poros transmisi : puntir, lentur, gabungan puntir dan lentur, beban tarikan atau tekan (misal : poros baling-baling kapal, turbin)
- Kelelahan, tumbukan, konsentrasi tegangan seperti pada poros bertingkat dan beralur pasak.
- Poros harus didesain dengan kuat.

### b. Kekakuan Poros

- Untuk menerima beban lentur atau defleksi akibat putaran yang lebih besar.

### c. Putaran Kritis

- Jika suatu mesin putarannya dinaikkan maka pada suatu harga putaran tertentu dapat terjadi getaran yang luar biasa. Putaran ini disebut putaran kritis.
- Putaran kerja harus lebih kecil dari putaran kritis ( $n < n_s$ )

### d. Korosi

- Perlindungan terhadap korosi untuk kekuatan dan daya tahan terhadap beban.

### e. Bahan Poros

- Disesuaikan dengan kondisi operasi.
- Baja konstruksi mesin, baja paduan dengan pengerasan kulit tahan terhadap keausan, baja krom, nikel, baja krom molibden dll.

### f. Standard diameter poros transmisi

- 25 s/d 60 mm dengan kenaikan 5 mm
- 60 s/d 110 mm dengan kenaikan 10 mm
- 110 s/d 140 mm dengan kenaikan 15 mm
- 140 s/d 500 mm dengan kenaikan 20 mm

## 3. Poros Dengan Beban Torsi Murni

### a. Poros bulat (pejal)

- $\frac{T}{J} = \frac{\tau}{r}$   
T : torsi (N-m)  
J : momen inersia polar ( $m^4$ )  
 $\tau$  : tegangan geser ijin torsional ( $N/m^2$ )  
r : jari-jari poros (m) =  $d/2$

- $J = \frac{\pi}{32} d^4$

- $\frac{T}{\frac{\pi}{32} d^4} = \frac{\tau}{\frac{d}{2}}$

$$T = \frac{\pi}{16} \cdot \tau \cdot d^3$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau}} \quad (\text{rumus diameter poros beban torsi murni})$$

**Syarat pemakaian rumus :**

- Beban torsi murni
- Poros bulat, pejal, masif
- Beban lain tidak diperhitungkan.
- Diameter poros yang dihasilkan merupakan diameter poros minimum, sehingga harus diambil yang lebih besar.

**b. Untuk poros berlubang dengan beban puntir murni**

$d_o$  : diameter luar

$d_i$  : diameter dalam

$$J = \frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4)$$

$$r = \frac{d_o}{2}$$

maka :

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau}{\frac{d_o}{2}}$$

$$\frac{T}{\frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4)} = \frac{\tau}{\frac{d_o}{2}}$$

$$\begin{aligned} 16T d_o &= \pi \cdot \tau (d_o^4 - d_i^4) \\ &= \pi \cdot \tau \cdot d_o^4 \left( 1 - \left[ \frac{d_i}{d_o} \right]^4 \right) \\ &= \pi \cdot \tau \cdot d_o^4 (1 - k^4) \end{aligned}$$

$$T = \frac{\pi}{16} \tau \cdot d_o^3 (1 - k^4)$$

k adalah faktor diameter (ratio) =  $\frac{d_i}{d_o}$

**Catatan :**

- Hubungan : torsi, daya, putaran :

$$T = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} (Nm)$$

- Untuk *belt drive*, besar T :

$$T = (T_1 - T_2) R \quad (N.m)$$

R : jari-jari puli

$T_1, T_2$  : tegangan tali

**c. Contoh soal**

1. Poros berputar 200 r/min untuk meneruskan daya : 20 kW. Poros dibuat dari *mild steel* dengan tegangan geser ijin 42 MPa. Hitung diameter poros.

**Jawab :**

Diketahui :

$$n = 200 \text{ r/min}$$

$$P = 20 \text{ kW} = 20\,000 \text{ W}$$

$$\bar{\tau} = 42 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{20000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 200} \\ &= 955 \text{ Nm} = 955 \times 10^3 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$T = \frac{\pi}{16} \cdot \tau \cdot d^3$$

$$\begin{aligned} d &= \sqrt[3]{\frac{16 \times 955 \times 10^3}{42 \cdot \pi}} \\ &= 48,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

Diameter poros yang digunakan = 50 mm

2. Hitung diameter poros pejal terbuat dari baja untuk meneruskan daya 20 kW pada putaran 200 r/min. Tegangan geser maksimum bahan poros dari baja 360 MPa dan SF = 8. Hitung pula jika poros berlubang dengan rasio diameter dalam dan luar : 0,5.

**Jawab :**

$$P = 20 \text{ kW} = 20\,000 \text{ W}$$

$$n = 200 \text{ r/min}$$

$$\tau_u = 360 \text{ MPa}$$

$$\text{SF} = 8$$

$$\bar{\tau} = \frac{360}{8} = 45 \text{ MPa}$$

(i) Diameter poros pejal

$$\begin{aligned} T &= \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{20000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 200} = 955 \text{ N.m} \\ &= 955 \times 10^3 \text{ N mm.} \end{aligned}$$

$$T = \frac{\pi}{16} \cdot \tau \cdot d^3$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \times 955000}{\pi \cdot 45}} = 47,6 \text{ mm}$$

Diameter poros yang digunakan = 50 mm

(ii). Diameter poros berlubang.

- $\frac{d_i}{d_o} = k = 0,5$  maka  $d_i = 0,5 d_o$
- $T = \frac{\pi}{16} \tau d_o^3 (1 - k^4)$
- $d_o = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau (1 - k^4)}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 955000}{\pi \cdot 45 \cdot (1 - 0,5)^4}}$   
 $= 48,6 \text{ mm} = 50 \text{ mm}$
- $d_i = 0,5 d_o = 0,5 \cdot 50 = 25 \text{ mm}$

#### 4. Poros dengan Beban Lenturan Murni

##### a. Poros pejal dengan beban lentur murni

- $\frac{M}{I} = \frac{\sigma_b}{y}$   
 $M$  : momen lentur (N-m)  
 $I$  : momen inersia ( $M^4$ )  
 $\sigma_b$  : tegangan lentur :  $N/m^2$   
 $y$  : jarak dari sumbu netral ke bagian terluar  
 $y = \frac{d}{2}$
- $I = \frac{\pi}{64} d^4$
- $\frac{M}{\frac{\pi}{64} d^4} = \frac{\sigma_b}{\frac{d}{2}}$
- $M = \frac{\pi}{32} \cdot \sigma_b \cdot d^3$
- $d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M}{\pi \cdot \sigma_b}}$

##### b. Poros berlubang dengan beban lentur murni

- $I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4)$  ,  $k = \frac{d_i}{d_o}$   
 $I = \frac{\pi}{64} d_o^4 (1 - k^4)$
- $\frac{M}{\frac{\pi}{64} \cdot d_o^4 (1 - k^4)} = \frac{\sigma_b}{\frac{d}{2}}$
- $M = \frac{\pi}{32} \cdot \sigma_b \cdot d_o^3 (1 - k^4)$

**c. Contoh soal**

1. Dua buah roda dihubungkan dengan poros, menerima beban masing-masing 50 kN, sejauh 100 mm dari bagian tengah roda. Jarak antar sumbu roda : 1400 mm. Hitung diameter poros jika tegangan lentur tidak boleh melebihi : 100 MPa.

**Jawab :**

- $M = F \cdot L = 50\,000 \cdot 100 = 5 \times 10^6 \text{ N mm}$

$$M = \frac{\pi}{32} \sigma_b \cdot d^3$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M}{\pi \cdot \sigma_b}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{32 \times 5\,000\,000}{\pi \times 100}}$$

$$= 79,8 \text{ mm} = 80 \text{ mm}$$

**d. Poros dengan beban kombinasi puntir dan lentur**

- Teori penting yang digunakan :
  - (i) Teori *Guest* : teori tegangan geser maksimum, digunakan untuk material yang *ductile* (liat) misal *mild steel*.
  - (ii) Teori *Rankine* : teori tegangan normal maksimum, digunakan untuk material yang *brittle* (getas) seperti *cast iron*.

**d.1. Teori tegangan geser maksimum**

$$(i) \tau_{(\max)} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

$$(ii) \sigma_b = \frac{32 M}{\pi \cdot d^3}$$

$$(iii) \tau = \frac{16 T}{\pi \cdot d^3}$$

$$(iv) \tau_{(\max)} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{32 M}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{16 T}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$= \frac{16}{\pi d^3} \left(\sqrt{M^2 + T^2}\right)$$

Note :  $\sqrt{M^2 + T^2} = T_e$  : torsi ekuvalen.

$$(v) T_e = \frac{\pi}{16} \cdot \tau \cdot d^3$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_e}{\pi \cdot \tau}}$$

(rumus diameter poros beban kombinasi basis  $T_e$ )

**d.2. Teori tegangan normal maksimum :**

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad \sigma_{b(\max)} &= \frac{1}{2} \sigma_b + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sigma_b\right)^2 + \tau^2} \\
 &= \frac{1}{2} \left( \frac{32M}{\pi d^3} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{2} \cdot \frac{32M}{\pi d^3} \right)^2 + \left( \frac{16T}{\pi d^2} \right)^2} \\
 &= \frac{32}{\pi d^3} \left[ \frac{1}{2} \left( M + \sqrt{M^2 + T^2} \right) \right] \\
 \frac{\pi}{32} \sigma_{b(\max)} d^3 &= \frac{1}{2} \left( M + \sqrt{M^2 + T^2} \right)
 \end{aligned}$$

$$\text{(ii)} \quad \text{Jika : } \frac{1}{2} \left( M + \sqrt{M^2 + T^2} \right) = M_e$$

$M_e$  : momen lentur ekivalen  
 $\sigma_b$  : tegangan lentur ijin bahan porous

$$\begin{aligned}
 \text{(iii)} \quad M_e &= \frac{\pi}{32} \sigma_b \cdot d^3 \\
 d &= \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_e}{\pi \cdot \sigma_b}} \\
 &\text{(rumus diameter porous beban kombinasi basis } M_e)
 \end{aligned}$$

- Untuk porous berlubang dengan beban lentur dan puntir

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad T_e &= \sqrt{T^2 + M^2} = \frac{\pi}{16} \tau d_o^3 (1 - k^4) \\
 \text{(ii)} \quad M_e &= \frac{1}{2} \left( M + \sqrt{M^2 + T^2} \right) = \frac{\pi}{32} \cdot \sigma_b \cdot d_o^3 (1 - k^4) \\
 \text{dengan : } k &= \frac{d_i}{d_o}
 \end{aligned}$$

**d.3. Contoh soal**

1. Poros dibuat dari *mild steel* untuk meneruskan daya 100 kW pada putaran 300 r/min, panjang porous 300 mm. Dua buah puli dengan beban masing-masing 1500 N diletakkan pada porous dengan jarak masing-masing 100 mm dari sisi luar porous. Jika tegangan geser bahan porous : 60 MPa, hitung diameter porous berdasarkan  $T_e$  dan  $M_e$  : ?

**Jawab :**

$$\begin{aligned}
 P &= 100 \text{ kW} = 100\,000 \text{ W} \\
 n &= 300 \text{ r/min} \\
 L &= 300 \text{ mm} \\
 W_1 &= W_2 = 1500 \text{ N}
 \end{aligned}$$

- $T = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{100\,000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 300} = 3183 \text{ Nm}$
- $R_A = R_B = 1500 \text{ N}$

( $\sum M_A = 0$  dan  $\sum M_B = 0$ )  $\rightarrow$  statika struktur statis tertentu

- Momen lentur (M)  
 $M = F \cdot L = 1500 \cdot 100 = 150\,000 \text{ N mm}$
- $T_e = \sqrt{T^2 + M^2} = \sqrt{318\,300^2 + 150\,000^2}$   
 $= 3\,519 \times 10^3 \text{ Nmm}$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_e}{\pi \cdot \tau}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 318\,300}{\pi \cdot 60}} = 66,8 \text{ mm}$$

Diameter poros = 70 mm

- $M_e = \frac{1}{2} (M + \sqrt{T^2 + M^2})$   
 $= \frac{1}{2} (150\,000 + \sqrt{318\,300^2 + 150\,000^2})$   
 $= 325\,937 \text{ N mm}$

$\tau = 60 \text{ MPa}$

$$\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma = \sqrt{3} \cdot \tau = \sqrt{3} \times 60 = 104 \text{ MPa}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M}{\pi \cdot \sigma}} = \sqrt[3]{\frac{32 \times 325\,937}{\pi \times 104}} = 32 \text{ mm}$$

Dipilih diameter poros berdasarkan torsi ekuivalen,  $d = 70 \text{ mm}$

## 5. Poros dengan Beban Berfluktuasi

Pembahasan yang telah dilakukan di atas adalah poros dengan beban torsi dan momen lentur konstan. Jika terjadi fluktuasi beban baik torsi maupun lentur, maka perlu ditambahkan faktor yang berkaitan dengan fluktuasi torsi maupun lenturan.

Jika :

- $K_m$  : faktor momen lentur akibat kombinasi beban *shock* dan *fatigue*.
- $K_t$  : faktor torsi/puntiran akibat kombinasi beban *shock* dan *fatigue*

maka :

$$(i) T_e = \sqrt{(k_t \cdot T)^2 + (k_m \cdot M)^2}$$

$$(ii) M_e = \frac{1}{2} \left[ k_m \cdot M + \sqrt{(k_t \cdot T)^2 + (k_m \cdot M)^2} \right]$$



**Tabel 1. Harga  $K_m$  dan  $K_t$  Untuk Beberapa Beban**

Beban	$K_m$	$K_t$
1. Poros Statis :		
(i) <i>Gradually applied load</i> (perlahan)	1,0	1,0
(ii) <i>Suddenly applied load</i> (tiba-tiba)	1,5 – 2,0	1,5 – 2,0
2. Poros Berputar :		
(i) <i>Gradually applied load</i>	1,5	1,0
(ii) <i>Suddenly applied load with minor shock</i>	1,5 – 2,0	1,5 – 2,0
(iii) <i>Suddenly applied load with major shock</i>	2,0 – 3,0	1,5 – 3,0

**Contoh soal :**

1. Sebuah poros terbuat dari Mild Steel digunakan untuk meneruskan daya 23 kW pada putaran 200 r/min. Jika beban momen lentur yang diterima poros sebesar  $562,5 \times 10^3$  Nmm, tegangan geser ijin 42 MPa dan tegangan tarik ijin 56 MPa, berapa diameter poros yang diperlukan jika beban berupa beban fluktuasi dengan tipe gradually applied loads ?

**Jawab :**

$$P = 23 \text{ kW} = 23\,000 \text{ W}$$

$$n = 200 \text{ r/min}$$

$$M = 562,5 \times 10^3 \text{ Nmm}$$

$$\tau = 42 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 56 \text{ MPa}$$

Gradually applied loads,  $K_m = 1,5$  dan  $K_t = 1$  (lihat table)

$$\bullet \quad T = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{20\,000 \times 60}{2 \cdot \pi \cdot 200} = 955 \times 10^3 \text{ Nmm}$$

$$\bullet \quad T_e = \sqrt{(K_t \times T)^2 + (K_m \times M)^2} = \sqrt{(1 \times 955\,000)^2 + (1,5 \times 562\,500)^2}$$

$$= 1\,274 \times 10^3 \text{ Nmm}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_e}{\pi \cdot \tau}} = \sqrt[3]{\frac{16 \times 1\,274\,000}{\pi \cdot 42}} = 53,6 \text{ mm. Diameter poros} = 60 \text{ mm}$$

$$\bullet \quad M_e = \frac{1}{2} (K_m \times M + \sqrt{(K_t \times T)^2 + (K_m \times M)^2})$$

$$= \frac{1}{2} (1,5 \times 562\,500 + 1\,274\,000)$$

$$= 1\,059 \times 10^3 \text{ Nmm}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M}{\pi \cdot \sigma}} = \sqrt[3]{\frac{32 \times 1\,059\,000}{\pi \times 56}} = 57,7 \text{ mm}$$

Dipilih diameter poros berdasarkan Momen Ekuivalen  $d = 60 \text{ mm}$

**6. Poros Dengan Beban Aksial dan Kombinasi Torsi Lentur**

- Contoh : poros baling-baling, poros *worm gear*.

$$\bullet \quad \frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y}$$

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{M \cdot \frac{d}{2}}{\frac{\pi}{64} d^4} = \frac{32 M}{\pi d^3}$$

- Tegangan akibat gaya aksial :

**Poros solid,**

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{4F}{\pi d^2}$$

**Poros berlubang,**

$$\sigma = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)} = \frac{4F}{\pi (d_o^2 - d_i^2)}$$

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d_o^2 (1 - k^2)} \quad \text{untuk } k = \frac{d_i}{d_o}$$

- Total tegangan (tarik atau tekan) :

**Poros pejal :**

$$\sigma_1 = \frac{32 M}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2}$$

$$= \frac{32}{\pi d^3} \left( M + \frac{F \cdot d}{8} \right)$$

$$= \frac{32 M_1}{\pi d^3} \quad \text{jika } M_1 = M + \frac{F \cdot d}{8}$$

**Poros berlubang :**

$$\sigma_1 = \frac{32 M}{\pi d_o^3 (1 - k^2)} + \frac{4F}{\pi d_o^2 (1 - k^2)}$$

$$= \frac{32}{\pi d_o^3 (1 - k^2)} \left[ M + \frac{F \cdot d_o (1 + k^2)}{8} \right]$$

$$= \frac{32 M_1}{\pi d_o^3 (1 - k^2)} \quad \text{jika: } M_1 = M + \frac{F d_o (1 + k^2)}{8}$$

- Pada kasus poros yang panjang (*slender shaft*) perlu diperhitungkan adanya *column factor* ( $\alpha$ )

- (i) Tegangan akibat beban tekan :

Poros pejal,  $\sigma_c = \frac{\alpha \cdot 4F}{\pi d^2}$

Poros berlubang,  $\sigma_c = \frac{\alpha \cdot 4F}{\pi d_o^2 (1 - k^2)}$

- (ii) Harga *column factor* ( $\alpha$ ) :

$$\alpha = \frac{1}{1 - 0,0044 \left( \frac{L}{K} \right)} \quad \text{jika } \frac{L}{K} < 115$$

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{C \cdot \pi^2 \cdot E} \left( \frac{L}{k} \right)^2 \quad \text{jika } \frac{L}{K} > 115$$

**Keterangan :**

L : panjang poros antar bantalan

k : jari-jari girasi

 $\sigma_y$  : tegangan luluh bahan

C : koefisien Euler (tumpuan)

= 1 (engsel)

= 2,25 (jepit)

= 1,6 bantalan

$$\bullet \quad T_e = \sqrt{\left[ km M + \frac{\alpha F \cdot d_o (1+k^2)}{8} \right]^2 + (k_t T)^2}$$

$$= \frac{\pi}{16} \tau d_o^3 (1-k^2)$$

$$\bullet \quad M_e = \frac{1}{2} \left[ km M + \frac{\alpha F \cdot d_o (1+k^2)}{8} + \sqrt{\left\{ km M + \frac{\alpha F \cdot d_o (1+k^2)}{8} \right\}^2 + (k_t T)^2} \right]$$

$$= \frac{\pi}{32} \sigma d_o^2 (1-k^2)$$

**Catatan :**k = 0 dan  $d_o = d_i$  untuk poros pejal

F = 0 jika tak ada gaya aksial

 $\alpha = 1$  jika gaya aksial merupakan gaya tarik**Soal Latihan:**

- Sebuah poros digunakan untuk meneruskan daya 20 kW pada putaran 200 r/min. Panjang total poros 3 meter, dengan kedua ujung poros ditumpu oleh masing-masing satu bantalan. Poros menerima beban lentur yang berasal dari beban seberat 900 N yang diletakkan di tengah-tengah poros tersebut. Jika poros dibuat dari bahan dengan tegangan geser maksimum 126 N/mm<sup>2</sup> dan Safety Factor (SF) = 3, hitunglah diameter poros tersebut berdasarkan torsi ekuivalen yang terjadi.
- Sebuah poros terbuat dari baja dengan tegangan tarik luluh (yield) 700 MPa menerima beban momen lentur 10 kNm, beban torsi 30 kNm dan SF = 3.
  - Hitung diameter poros berdasarkan teori tegangan geser maksimum dan tegangan geser minimum.
  - Jika beban berfluktuasi dengan tipe beban *Suddenly applied load with major shock*, hitung diameter poros yang diperlukan.
- Sebuah poros digunakan untuk meneruskan daya 10 kW pada putaran 400 r/min. Jika poros terbuat dari bahan dengan tegangan geser ijin 40 MPa, hitung diameter poros yang diperlukan.
- Sebuah poros berlubang terbuat dari bahan baja dengan tegangan geser maksimum 62,4 MPa. Poros digunakan untuk meneruskan daya 600 kW pada putaran 500 r/min. Hitung dimensi poros luar dan dalam jika diameter luar dua kali lebih besar dari diameter dalam dan torsi maksimum yang terjadi 20 % dari torsi normal.