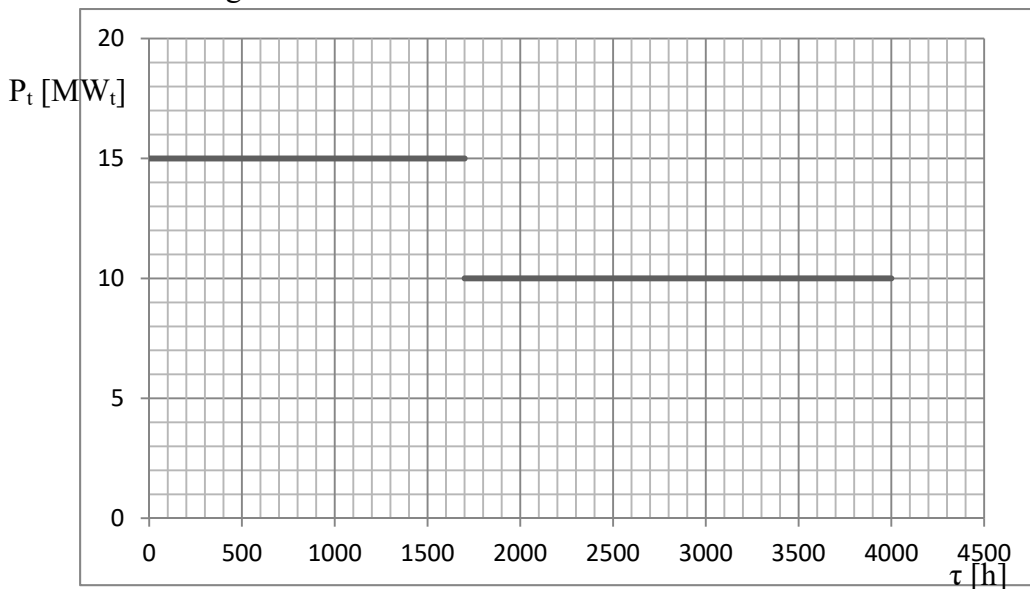


1. zadatak.

Zadana je krivulja potrošnje toplinske energije nekog proizvodnog pogona. Potrebe za toplinskom energijom namiruju se iz kogeneracijskog postrojenja s turbinom s reguliranim oduzimanjem. Izračunajte količine pare (t/h) koje se oduzimaju, ukupno isporučenu toplinsku i električnu energiju ako je proizvodnja pare u kotlu  $D=35t/h$ . Izračunajte omjer proizvedene električne i toplinske energije (Power to Heat) na godišnjem nivou ako je:

- kogeneracijsko postrojenje radilo koliko je trajala isporuka toplinske energije, a ostalo vrijeme (do 8760 sati) stajalo,
- kogeneracijsko postrojenje radilo 4000 sati s isporukom toplinske i električne energije, a 4000 sati samo s isporukom električne energije tj. u kondenzacijskom pogonu ( $D_0=0$ ).

Koliki su faktori iskorištenja postrojenja  $f$  u svakom režimu rada? Nacrtajte karakteristike proizvodnje električne energije za oba režima reda! Zadane su entalpije pare i kondenzata prema oznakama i shemi s predavanja:  $h_1=3630kJ/kg$ ,  $h_2=2940kJ/kg$ ,  $h_3=2120kJ/kg$  i  $h_4=100kJ/kg$ .



Rješenje:

Izraz za snagu odvedene topline potrošačima  $P_{t_i}$  može se općenito pisati:

$$P_{t_i} = D_{0_i} \cdot (h_2 - h_4) \quad [MW_t] \quad (1)$$

a za zadane podatke se to može pisati:

$$P_{t_i} = 2840 \cdot D_{0_i} \quad (1a)$$

Iz ovog izraza i podataka iz zadane karakteristike proizvodnje  $P_t$ - $\tau$  mogu se izračunati količine oduzete pare u oba perioda rada postrojenja:

$$D_{0_1} = \frac{P_{t_1}}{(h_2 - h_4)} = \frac{15 \cdot 10^3 kW}{2940 - 100} = 5,24 \frac{kg}{s} \hat{=} 19,01 \frac{t}{h} \quad (2) \quad i$$

$$D_{0_2} = \frac{P_{t_2}}{(h_2 - h_4)} = \frac{10 \cdot 10^3 kW}{2940 - 100} = 3,52 \frac{kg}{s} \hat{=} 12,7 \frac{t}{h} \quad (3)$$

Iz dobivenih vrijednosti može se izračunati električna snaga prema izrazu s predavanja:

$$N_e = N_{VTT} + N_{NTT} = \frac{D \cdot (h_1 - h_2) + (D - D_0) \cdot (h_2 - h_3)}{3600} \quad (4)$$

ili uvrštavanjem zadanih podataka

$$N_e = 0,1917 \cdot D + 0,2278 \cdot (D - D_0) \quad (4a)$$

Uvrštavanjem vrijednosti za zadanu količinu proizvedene  $D$  i izračunate količine oduzete pare (2) i (3) dobivamo iznose električne snage u oba režima rada:

$$N_{el_1} = 10351,67 kW_e = 10,35 MW_e \quad (5) \text{ i}$$

$$N_{el_2} = 11789,44 kW_e = 11,78 MW_e \quad (6),$$

a proizvedene količine električne energije možemo izračunati prema općem izrazu:

$$E_{el} = \sum_i N_{el_i} \cdot \tau_i \quad (7).$$

Za vrijednosti električne snage (5) i (6) i vremena trajanja pogona iz zadanog  $P_t$ - $\tau$  dijagrama proizvedena električna energija je:

$$E_{el} = 10,35 MW \cdot 1700 + 11,78 MW \cdot (4000 - 1700)h = 44713 MWh_e \quad (8)$$

Sada možemo izračunati omjere proizvedene električne i toplinske energije (E/T) za slučajeve zadane pod a.) i b.), a prije toga izračunajmo proizvedenu toplinsku energiju iz zadanog  $P_t$ - $\tau$  dijagrama. Proizvedena toplinska energija odgovara toplinskoj energiji koju industrijski pogon troši, a predstavlja je površina ispod zadane krivulje potrošnje koje se u ovom slučaju sastoji od dvije konstantne vrijednosti u odgovarajućim vremenskim intervalima. Općenito se može zapisati da je proizvedena toplinska energija jednaka:

$$E_t = \sum_i P_{t_i} \cdot \tau_i \quad (9)$$

U konkretnom slučaju to iznosi:

$$E_t = 15 MW \cdot 1700h + 10 MW \cdot (4000 - 1700)h = 48500 MWh_t \quad (10)$$

Ovaj iznos jednak je u oba slučaja, iako je u b.) slučaju CHP postrojenje radili 4000 sati dulje, ali bez isporuke toplinske energije (kondenzacijski pogon). Prema tome su omjeri E/T:

$$\text{a.) } \left( \frac{E}{T} \right)_a = \frac{44713 MWh}{48500 MWh} = 0,92,$$

$$\text{b.) } \left( \frac{E}{T} \right)_b = \frac{(44713 + 58722,2) MWh}{48500 MWh} = 2,133$$

gdje je prvi član u brojniku jednak kao i u a.) slučaju, a drugi član predstavlja vrijednost proizvedene električne energije u razdoblju kondenzacijskog režima rada tj.

$$E_{elkond} = N_{elkond} \cdot \tau = 14,68 MW \cdot 4000h = 58722,2 MWh_e \quad (11),$$

dok je prema (4a) i  $D_0=0$ .

$$N_{elkond} = 14,68 MW_e \text{ a isti rezultat može se dobiti i izravnim uvrštavanjem u izraz (4).}$$

Izračunajmo sada toplinske faktore iskorištenja za oba režima rada:

$$f_1 = \frac{N_{el_1}}{Q_K} + \frac{P_{t_1}}{Q_K} = 0,74 \quad (9) \text{ i}$$

$$f_2 = \frac{N_{el_2}}{Q_K} + \frac{P_{t_2}}{Q_K} = 0,63 \quad (10)$$

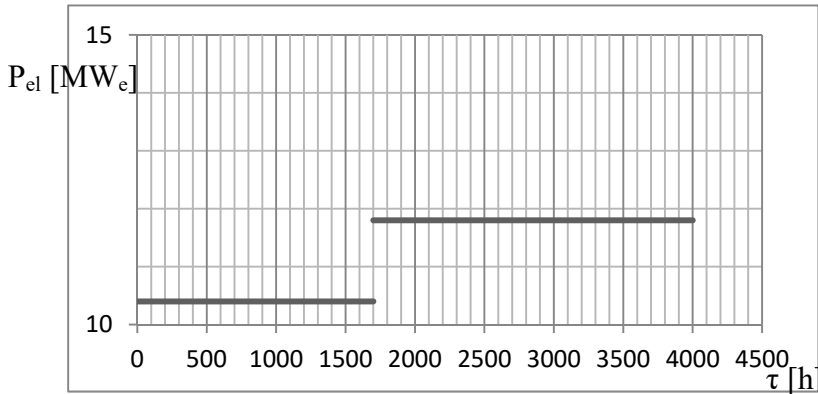
gdje je  $Q_K$  toplina dovedena u kotlu prema izrazu, a to je u stvari toplinska snaga kotla:

$$Q_K = D \cdot (h_1 - h_4) = 35 \cdot 10^3 \cdot (3630 - 100) = 34319,4 \text{ kWh}_t \quad (11)$$

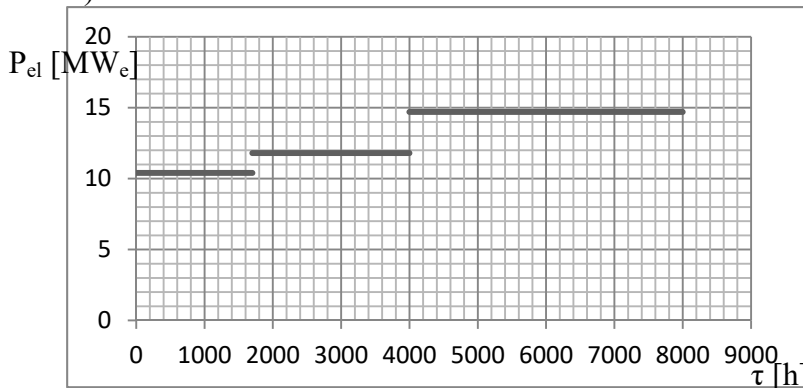
Ako bi se računao toplinski faktor iskorištenja za treći period rada (slučaj b.) on bi bio jednak termodinamičkom stupnju iskorištenja obzirom da je  $D_0=0$  tj.  $P_t=0$ .

Nacrtajmo sada dijagrame proizvodnje električne energije  $P_{el}-\tau$ .

a.)



b.)



## 2. zadatak

Kotao elektrane s reguliranim oduzimanjem pare (prema shemi i oznakama s predavanja) proizvodi  $D=120\text{t/h}$  pare uz stupanj iskorištenja kotla  $\eta_K=0,87$ . 1/3 proizvedene pare odvodi se potrošačima uz entalpiju oduzimanja pare  $h_2=3080\text{kJ/kg}$  i ukupni toplinski pad u turbini od  $1220\text{kJ/kg}$ . Entalpija na izlazu iz niskotlačne turbine je  $h_3=2180\text{kJ/kg}$ , a entalpija vrelog kondenzata iznosi  $h_4=100\text{kJ/kg}$ . U tom režimu je elektrana radila 2700h, a nakon toga je sljedećih 1500 sati nastavila raditi s istim udjelom oduzete pare, ali uz četvrtinu manju proizvodnju pare u kotlu. Kolike su električne snage  $N_e$  u svakom režimu rada, koliko je ukupno proizvedeno električne energije, koliko je isporučeno toplinske energije i koliko je omjer snage i topline (power to heat ratio) u promatranom vremenu (2700+1500 sati). Kolika je satna potrošnja prirodnog plina u oba režima rada ( $\text{kWh/h}$ ) i kolika je ukupna potrošnja prirodnog plina za cijelo vrijeme trajanja pogona? Nacrtajte karakteristike proizvodnje (snaga-vrijeme) električne i toplinske energije u promatranom razdoblju.

Rješenje.

Prvo ćemo izračunati entalpiju iz entalpije  $h_3=2180\text{kJ/kg}$  i ukupnog toplinskog pada u visoko i nisko tlačnoj turbini  $h_1-h_3=1220\text{kJ/kg}$ . Entalpija u početnoj točki ekspanzije  $h_1=3400\text{kJ/kg}$ .

Uz poznate entalpije i količinu pare  $D$  i  $D_0=D/3=40\text{t/h}$  možemo izračunati električnu snagu:

$$N_{el1} = \frac{D \cdot (h_1 - h_2) + (D - D_0) \cdot (h_2 - h_3)}{3600} =$$

$$= \frac{120 \cdot 10^3 \cdot (3400 - 3080) + 40 \cdot 10^3 \cdot (3080 - 2180)}{3600} = 30,67 \text{ MW}_e \quad (1)$$

Snaga odvedene topline potrošačima je:

$$P_{t1} = D_0 \cdot (h_2 - h_4) \cdot \frac{1}{3600} = 40 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (3080 - 100) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{3600} = 33,1 \text{ MW}_t \quad (2)$$

Proizvedena i isporučena električna i toplinska energija uz (1) i (2) i za trajanje ovog režima rada od  $\tau_1=2700\text{h}$  je:

$$E_{el1} = N_{el1} \cdot \tau_1 = 30,67 \cdot 2700 = 8,28 \cdot 10^4 \text{ MWh}_e \quad (3) \text{ i}$$

$$E_{t1} = P_{t1} \cdot \tau_1 = 33,1 \cdot 2700 = 8,94 \cdot 10^4 \text{ MWh}_t \quad (4).$$

U nastavku postrojenje nastavlja raditi sa smanjenom količinom pare  $D_2 = \frac{3}{4} \cdot D = 90 \frac{\text{t}}{\text{h}}$  i

količinom oduzete pare  $D_{0_2} = \frac{1}{3} \cdot D_2 = 30 \frac{\text{t}}{\text{h}}$ . Sada je:

$$N_{el2} = \frac{D_2 \cdot (h_1 - h_2) + (D_2 - D_{0_2}) \cdot (h_2 - h_3)}{3600} = 23 \text{ MW}_e \quad (5) \text{ i}$$

$$P_{t2} = D_{0_2} \cdot (h_2 - h_4) = 24,8 \text{ MW}_t \quad (6)$$

Proizvedena i isporučena električna i toplinska energija uz (5) i (6) i za trajanje ovog režima rada od  $\tau_2=1500\text{h}$  je:

$$E_{el2} = N_{el2} \cdot \tau_2 = 23 \cdot 1500 = 3,45 \cdot 10^4 \text{ MWh}_e \quad (7) \text{ i}$$

$$E_{t2} = P_{t2} \cdot \tau_2 = 24,8 \cdot 1500 = 3,725 \cdot 10^4 \text{ MWh}_t \quad (8).$$

Omjer proizvedene električne i toplinske energije E/T (Power to Heat) je uz vrijednosti iz izraza (3), (4), (7) i (8):

$$\frac{E}{T} = \frac{(8,28 + 3,45) \cdot 10^4 \text{ MWh}}{(8,94 + 3,725) \cdot 10^4 \text{ MWh}} = 0,926 \quad (9)$$

Potrošnju prirodnog plina izračunat ćemo iz bilance kotla:

$$Q_K = D \cdot (h_1 - h_4) = \eta \cdot V_{pl} \cdot H_d \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (10)$$

Odavde je:

$$V_{pl} \cdot H_d = \frac{D \cdot (h_1 - h_4)}{\eta} \quad \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (11)$$

Da bismo  $\text{kJ/h}$  preračunali u tražene  $\text{kWh/h}$  potrebno je lijevu i desnu stranu izraza (11) podijeliti s 3600 pa je.

$$(V_{pl} \cdot H_d)_{\frac{kWh}{h}} = \frac{D \cdot (h_1 - h_4)}{3600 \cdot \eta} \quad \left[ \frac{kWh}{h} \right] \quad (12)$$

Za zadane brojeve u našem slučaju satna potrošnja prirodnog plina u oba režima rada je:

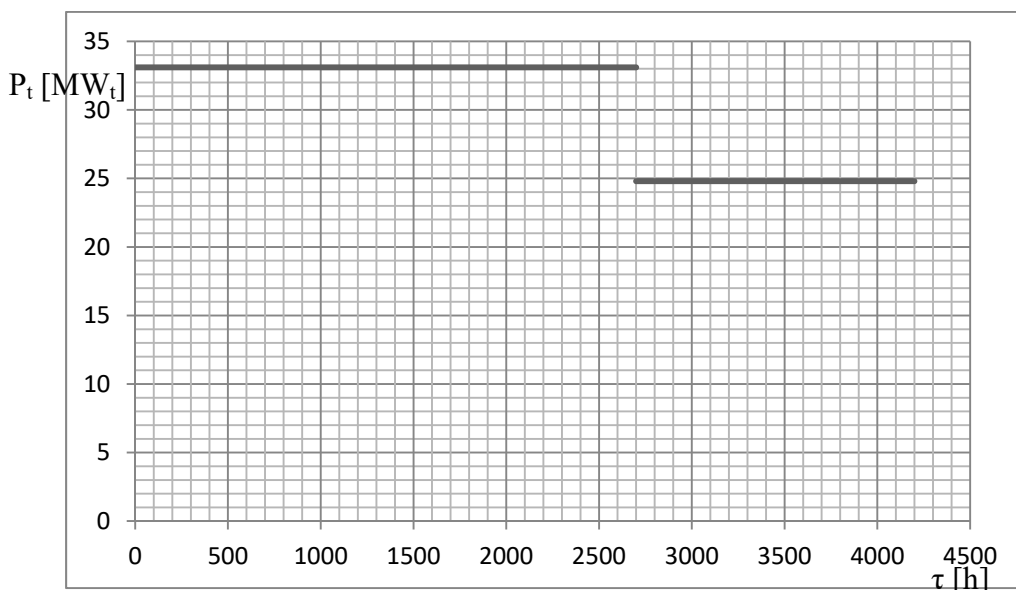
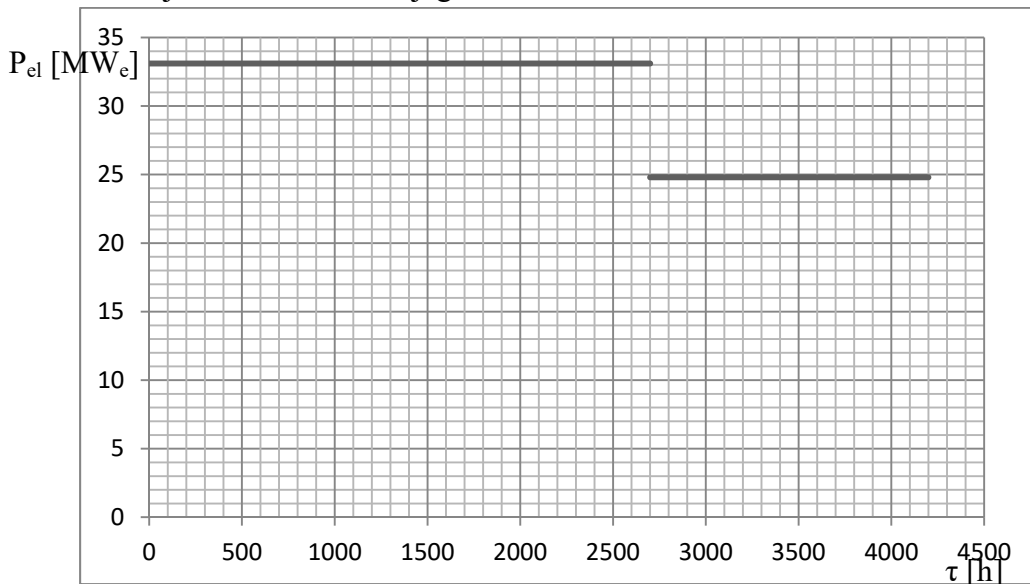
$$(V_{pl} \cdot H_d)_{\left[\frac{kWh}{h}\right]_1} = \frac{120 \cdot 10^3 \frac{kg}{h} \cdot (3400 - 100) \frac{kJ}{kg}}{3600 \cdot 0,87} = 126436,78 \frac{kWh}{h} \quad (13)$$

$$(V_{pl} \cdot H_d)_{\left[\frac{kWh}{h}\right]_2} = \frac{90 \cdot 10^3 \cdot (3400 - 100)}{3600 \cdot 0,87} = 94827,59 \frac{kWh}{h} \quad (14)$$

Uočite da za ovako izraženu satnu potrošnju u kWh/h nije potrebno znati donju toplinsku vrijednost prirodnog plina. Nadalje, ukupnu potrošnju prirodnog plina za vrijeme trajanje pogona možemo jednostavno izračunati:

$$E_{pp} = 126436,78 \frac{kWh}{h} \cdot 2700h + 94827,59 \frac{kWh}{h} \cdot 1500h = 483,62GWh \quad (15)$$

Nacrtajmo sada tražene dijagrame!



3. zadatak

Poznata je funkcijska ovisnost  $N_e = f(D_0)$  kogeneracijskog postrojenja:

$$\{N_e\}_{MW_e} = -0,25 \cdot \left\{D_0\right\}_{\frac{t}{h}} + 40,67 .$$

Na temelju ove karakteristike i poznatih toplinskih padova odredite funkcijske ovisnosti termodinamičkog stupnja iskorištenja  $\{\eta\}_{\%} = f\left(\left\{D_0\right\}_{\frac{t}{h}}\right)$  i odvedene topline potrošačima o

količini oduzete pare  $\{P_t\}_{MW} = f\left(\left\{D_0\right\}_{\frac{t}{h}}\right)$  kao jednadžbe pravca  $y=ax+b$ . Funkcijske ovisnosti prikažite grafički u odgovarajućim dijagramima. Toplinski padovi su; u visokotlačnoj turbini 320kJ/kg, a u niskotlačnoj 900kJ/kg dok su entalpije  $h_1=3400\text{kJ/kg}$  i  $h_4=100\text{kJ/kg}$ .

Rješenje:

Da bismo izračunali tražene karakteristike koristit ćemo definicijske izraze:

$$\eta_t = \frac{N_e \cdot 3600}{Q_K} \quad (1) \text{ i}$$

$$P_t = \frac{D_0 \cdot (h_2 - h_4)}{3600} [kW_e] \quad (2)$$

Podsjetimo da je  $N_e = f(D_0)$ , a da bismo izračunali  $Q_K$  koji nam je potreban u izrazu (1) iskoristit ćemo zadanu jednadžbu pravca tako što ćemo odabrati proizvoljnu vrijednost  $D_0$ . Najjednostavnije je odabrati vrijednost  $D_0=0$  (kondenzacijski režim) pa je:

$$\text{za } D_0 = 0 \Rightarrow N_e = -0,25 \cdot 0 + 40,67 = 40,67 MW_e \quad (3).$$

Opći izraz za  $N_e$  uz  $D_0=0$  je:

$$N_e = \frac{D \cdot (h_1 - h_3)}{3600} \quad (4)$$

Odavde možemo uz vrijednost (3) izračunati količinu pare D:

$$D = \frac{3600 \cdot N_e}{(h_1 - h_3)} = \frac{3600 \cdot 40,67 \cdot 10^3 kW}{(320 + 900) \frac{kJ}{kg}} = 120000 \frac{kg}{h} = 120 \frac{t}{h} \quad (5)$$

Važno je napomenuti da zadana jednadžba vrijedi za točno određene vrijednosti količine pare D i entalpije!

Sada možemo izračunati snagu kotla  $Q_K$ :

$$Q_K = \frac{D \cdot (h_1 - h_4)}{3600} = 120000 \cdot \frac{kg}{h} \cdot \frac{(3400 - 100) \frac{kJ}{kg}}{3600} = 110000 kW = 110 MW \quad (6)$$

Izraz (1) uz prethodnu vrijednost (6) postaje:

$$\eta_t = \frac{N_e(D_0) \cdot 3600}{Q_K} = \frac{N_e(D_0)}{110 \cdot 10^3 kW} \quad (7)$$

U izrazu (7) naglašena je ovisnost  $N_e$  o  $D_0$  iz čega proizlazi i tražena karakteristika  $\eta_t$ - $D_0$  koja je prikazana odgovarajućim pravcem:

$$\eta_t = a \cdot D_0 + b \quad (8)$$

Kako je pravac definiran s dvije točke odabrat ćemo dva para vrijednosti  $D_0$  i za njih izračunati  $N_e$  uvrštavanjem u zadani izraz pa te vrijednosti uvrstiti u (7):

$$\text{za } D_0 = 0 \Rightarrow N_e = 40,67 MW_e \Rightarrow \eta_t = 0,3697 \quad (9) \text{ i}$$

$$D_0 = 30 \frac{t}{h} \Rightarrow N_e = 33,17 MW_e \Rightarrow \eta_t = 0,3015 \quad (10)$$

Uvrštavanjem ovih vrijednosti u (8) dobivamo:

$$36,97\% = a \cdot 0 + b \Rightarrow b = 36,97\% \quad (11)$$

$$30,15\% = a \cdot 30 + 36,97 \Rightarrow a = -0,227 \quad (12)$$

Tražena karakteristika je:

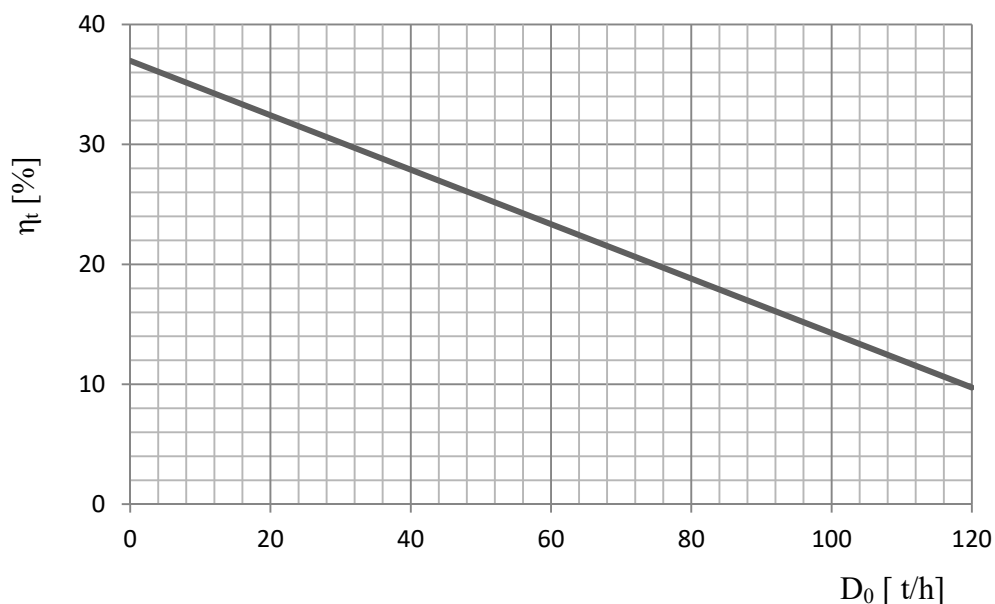
$$\{\eta_t\}_{\%} = -0,227 \cdot \{D_0\}_{\frac{t}{h}} + 36,97 \quad (13)$$

Funkcijska ovisnost  $P_t$ - $D_0$  izravno slijedi iz izraza (2):

$$P_t = \frac{D_0 \cdot (3400 - 320 - 100)}{3600} = 0,8278 \cdot D_0 \quad (14) \text{ tj.}$$

$$\{P_t\}_{MW_t} = 0,8278 \cdot \{D_0\}_{\frac{t}{h}} \quad (15)$$

grafički predočeno karakteristike (13) i (15) izgledaju kako slijedi:



## Seminar iz Energetike - kogeneracija

