

**ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟΥ ΣΑΗΣ ΣΤΟ ΚΑΠΕ 23/1/2015**  
**ΑΝΑΝΙΑΣ ΤΟΜΠΟΥΛΙΔΗΣ**

**Άσκηση 1:** Δίνεται ατμοπαραγωγός εξαναγκασμένης ροής τύπου BENSON μιας διαδρομής καυσαερίων με καύσιμο λιγνίτη με  $H_u = 5233 \text{ KJ/kg}$ , σε κλειστό κύκλο κονιοποίησης με ανακυκλοφορία καυσαερίων.

Δίνονται ακόμα τα εξής:

Έξοδος υπέρθερμου ατμού:  $h_u = 3396 \text{ KJ/kg}$

Νερό ψεκασμού υπέρθερμου ατμού:  $59 \text{ t/h}$ ,  $h_w = 1110,1 \text{ KJ/kg}$

Είσοδος αναθέρμου ατμού:  $h_{av1} = 3081 \text{ KJ/kg}$

Νερό ψεκασμού αναθέρμου ατμού:  $30 \text{ t/h}$ ,  $h_{w2} = 765,5 \text{ KJ/kg}$

Παροχή μάζας ανάθερμου ατμού χωρίς τον ψεκασμό:  $839 \text{ t/h}$

Έξοδος ανάθερμου ατμού:  $h_{av2} = 3537 \text{ KJ/kg}$

Είσοδος τροφοδοτικού νερού:  $891 \text{ t/h}$ ,  $h_{w2} = 1110,1 \text{ KJ/kg}$

Ποσότητα αέρα που χρειάζεται στη καύση του λιγνίτη:  $\mu_L = 2,94 \text{ kg/kg}$

Ποσότητα καυσαερίων από την καύση  $1 \text{ kg}$  καυσίμου:  $\mu_G = 3,81 \text{ kg/kg}$

Βαθμός απόδοσης εστίας:  $96\%$

Θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος:  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίων στους  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $1,14 \text{ KJ/kg/}^\circ\text{C}$ , στους  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $1,16 \text{ KJ/kg/}^\circ\text{C}$

Το καυσαέριο εξέρχεται με θερμοκρασία  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  στο περιβάλλον.

Να βρεθεί ο βαθμός απόδοσης και οι παροχές καυσίμου, αέρα και καυσαερίων.

Οι απώλειες ακτινοβολίας να βρεθούν από την σχέση:  $Q_L = 25,8(Q_{ωφ})^{0,7}$   
( $Q_L$  σε kW και  $Q_{ωφ}$  σε MW)

**Άσκηση 2:** Σε συνδυασμένο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από αεριοστρόβιλο-ατμοπαραγωγό και ατμοστρόβιλο, χρησιμοποιούνται τα καυσαέρια που εγκαταλείπουν τον αεριοστρόβιλο σαν φορέας του οξυγόνου για την καύση στον ατμοπαραγωγό.

Δίδονται:

- Για τα καυσαέρια στην έξοδο του αεριοστρόβιλου:
- $\dot{m}_g = 80 \text{ kg/s}$ ,  $\theta = 420^\circ\text{C}$  και λόγος αέρα  $n=5$
- Το καύσιμο είναι και για το σύστημα του αεριοστρόβιλου και για αυτό του ατμοπαραγωγού, φυσικό αέριο με τη σύνθεση:  $\gamma_{\text{CH}_4} = 0,923 \text{ kg/kg}$ ,  $\gamma_{\text{C}_2\text{H}_2} = 0,060 \text{ kg/kg}$ ,  $\gamma_{\text{CO}_2} = 0,005 \text{ kg/kg}$ ,  $\gamma_{\text{N}_2} = 0,021 \text{ kg/kg}$ ,  $H_u = 49000 \text{ kJ/kg}$
- Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του ατμοπαραγωγού είναι  $\theta_2 = 120^\circ\text{C}$ .
- Ο παραγόμενος στον ατμοπαραγωγό ατμός είναι υπέρθερμος με τα χαρακτηριστικά: Πίεση  $180 \text{ bar}$  και θερμοκρασία  $530^\circ\text{C}$
- Το τροφοδοτικό νερό μπαίνει στον ατμοπαραγωγό με πίεση  $220 \text{ bar}$  και θερμοκρασία  $250^\circ\text{C}$
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων να ληφθεί  $5\%$  μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του αέρα. ( $C_{\text{pair}} = 1 \text{ kJ/kg/K}$ )

Ζητούνται:

- Η παροχή του καυσίμου στον ατμοπαραγωγό εάν ο λόγος αέρα στο θάλαμο καύσης είναι  $n=1,1$ .
- Η ατμοπαραγωγή εάν οι απώλειες ακτινοβολίας είναι  $870 \text{ kW}$ .
- Ο ολικός μικτός και καθαρός βαθμός απόδοσης του ατμοπαραγωγού εάν η κατανάλωση των βοηθητικών αυτού είναι  $3000 \text{ kW}$ .

Δεδομένα

·) Α/Π εξατ. ποίς BENSON

·) Λιγνίτης:  $H_L = 5233 \text{ kJ/kg}$

·) Εξ. υπερθ. ατμάι:  $H_D = 3396 \text{ kJ/kg}$

·) Νερό ψεκαστόι υπ. ατμάι:  $\dot{m}_{w,y/o} = 59 \text{ t/h}$

$$H_{w,y/o} = 1110,1 \text{ kJ/kg}$$

·) Εξ. ανάθερπας ατμάι:  $H_{AN,ih} = 3081 \text{ kJ/kg}$

$$H_{AN,out} = 3537 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{WAN} = 30 \text{ t/h}$$

$$H_{WAN} = 765,5 \text{ kJ/kg}$$

} νερό ψεκαστόι ανάθερπας ατμάι.

$$\dot{m}_{AN} = 839 \text{ t/h} \text{ (χωρίς τον ψεκαστόι του νερού } \dot{m}_{WAN} \text{)}$$

·) Τροφοδοτικό νερό:  $\dot{m}_D = 891 \text{ t/h}$

$$H_W = 1110,1 \text{ kJ/h}$$

·)  $K_L = 2,94 \frac{\text{kg air}}{\text{kg fuel/air}}$  (ποσότητα αέρα για την καύση του λιγνίτη)

$$K_G = 3,81 \frac{\text{kg gas}}{\text{kg fuel/air}}$$

·) Β.Α. Εστίας:  $\eta_E = 0,96$

·)  $T_{\infty} = 20^\circ\text{C}$

$$\cdot) T_{g,out} = 150^\circ\text{C}$$

$$\cdot) C_{p,gas}^{20^\circ\text{C}} = 1,14 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$C_{p,gas}^{150^\circ\text{C}} = 1,16 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$\cdot) \Delta \rightarrow 25,8 \cdot Q_{\dots}^{9,7} \dots \Delta \dots \text{const}$$

Ζητάται

a)  $\eta_{A/P}$ ,  $\dot{m}_D$ ,  $\dot{m}_L$ ,  $\dot{m}_{gas}$

ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΣ

$h_w = 1110,1 \text{ kJ/kg}$   
 $\dot{m}_D = 891 \text{ t/h}$   
 ΤΡΟΦ. ΥΕΡΟ

υερό ψεκασμού

προς Turbine

ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΣ ατμός

$h_D = 3396 \text{ kJ/kg}$

$\dot{m}_{w,y/D} = 59 \text{ t/h}$

$h_{w,y/D} = 1110,1 \text{ kJ/kg}$

ΑΝΑΘΕΡΜΟΣ

αναθερμος ατμός  
 $h_{ANin} = 3081$   
 $\dot{m}_{AN} = 839 \text{ t/h}$

to turbine

$h_{ANout} = 3537 \text{ kJ/kg}$

$\dot{m}_{AN} + \dot{m}_{w,AN}$

ψεκασμό υερού

$\dot{m}_{w,AN} = 30 \text{ t/h}$

$h_{w,AN} = 765,5 \text{ kJ/kg}$

$$v_L = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{m}_D \cdot H_u}$$

α) B.A.  $\eta = \eta_E \cdot \eta_F$   
 $\eta_E = 0,96$

$\eta_F = 1 - v_L - v_G \rightarrow v_G = \frac{v_G \cdot (h_{ANout} - h_{ANin})}{H_u}$   
 $\eta_F = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_D \cdot H_u}$

υπερθερμωση

Αρα αρκει να βρω το  $\dot{Q}_{out}$   
 και το  $\dot{m}_{B,L}$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_D (h_D - h_w) + \dot{m}_{w,y/D} (h_D - h_{w,y/D}) +$$
  

$$+ \dot{m}_{AN} (h_{ANout} - h_{ANin}) + \dot{m}_{w,AN} (h_{w,ANout} - h_{w,ANin})$$
  
 αναθερμωση

Αρα:  $\dot{Q}_{out} = 891 \cdot \frac{1000}{3600} (3396 - 1110,1) + 59 \cdot \frac{1000}{3600} (3396 - 1110,1) +$   
 $+ 839 \cdot \frac{1000}{3600} (3537 - 3081) + 30 \cdot \frac{1000}{3600} (3537 - 765,5)$

$\dot{Q}_{out} = 732,593 \text{ [MW]}$

Αρα:  $\dot{Q}_L = 25,8 \cdot \dot{Q}_{out} = 2612,3 \text{ [kW]}$

$\eta_G = \frac{\dot{W}_G}{\dot{H}_U} = \frac{3,81 \cdot (C_{p,air} \cdot T_{air}^{150^\circ C} - C_{p,air} \cdot T_{air}^{20^\circ C})}{5233}$

$\Rightarrow \eta_G = \frac{3,81 \cdot (1,16 \cdot 150 - 1,14 \cdot 20)}{5233} = 0,1101 \text{ ή } 11,01\%$

και  $\eta_L = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{m}_{B_1} \cdot \dot{H}_U}$

Αρα έχω:  $\eta_F = 1 - \eta_L - \eta_G \Rightarrow \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_{B_1} \cdot \dot{H}_U} = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{m}_{B_1} \cdot \dot{H}_U} - \eta_G$

$\Rightarrow \dot{m}_{B_1} = \frac{\dot{Q}_{out} + \dot{Q}_L}{\dot{H}_U (1 - \eta_G)} = \frac{732593 + 2612,3}{5233 (1 - 0,1101)} = 157,8761 \text{ kg/sec}$

Αρα τώρα:  $\eta_F = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}_{B_1} \cdot \dot{H}_U} = \frac{732593}{157,8761 \cdot 5233} = 0,8867$

και ο Β.Α:  $\eta = \eta_E \cdot \eta_F = 0,96 \cdot 0,8867 = 0,8512 \text{ ή } 85,12\%$

(4)

Άρα η παροχή καυσίμου:  $\dot{m}_B = \frac{\dot{m}_{B1}}{\eta_E} = \frac{157,8761}{0,96} = \underline{164,4543 \text{ kg/sec}}$

Παροχή αέρα:  $\dot{m}_L = \mu_L \cdot \dot{m}_{B1} = 2,94 \cdot 157,8761 = \underline{464,1557 \text{ kg/sec}}$

Παροχή καυσαερίου:  $\dot{m}_G = \psi_G \cdot \dot{m}_{B1} = 3,81 \cdot 157,8761 = \underline{601,5079 \text{ kg/sec}}$

## Άσκηση 2

### Τμήμα της εγκατάστασης που αφορά στον αεριοστρόβιλο (1)

Απαιτούμενος αέρας καύσης ανά kg καυσίμου:

$$\mu_{LoT} = \mu_{LoT_{CH_4}} \cdot \gamma_{CH_4} + \mu_{LoT_{C_2H_6}} \cdot \gamma_{C_2H_6} + \mu_{LoT_{CO_2}} \cdot \gamma_{CO_2} + \mu_{LoT_{N_2}} \cdot \gamma_{N_2} \Rightarrow$$

$$\mu_{LoT} = 0,923 \cdot 17,189 + 0,060 \cdot 16,049 + 0,005 \cdot 0 + 0,021 \cdot 0 \Rightarrow$$

$$\mu_{LoT} = 16,828 \frac{kg}{kg}$$

Επειδή η υγρασία του αέρα καύσης είναι ίση με το 0 ο στοιχειομετρικά απαιτούμενος αέρας είναι

$$\mu_{Lo} = \mu_{LoT} \cdot (1 + X_{H_2O(L)}) = 16,828 \cdot (1 + 0) \frac{kg}{kg} \Rightarrow \mu_{Lo} = 16,828 \frac{kg}{kg}$$

Και ο συνολικός αέρας λόγω περίσσειας στον αεριοστρόβιλο (1) είναι

$$\mu_{L1} = n_1 \mu_{LoT} = 5 \times 16,828 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}} \Rightarrow \mu_{L1} = 84,14 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg \text{ καυσίμου}}$$

Παροχή καυσαερίων που παράγονται από την καύση στον καυστήρα του αεριοστροβίλου ( $\gamma_\alpha = 0$  επειδή δεν υπάρχει τέφρα στο ΦΑ):

$$\mu_{G1} = \mu_{L1} + 1 - \gamma_\alpha$$

$$\dot{m}_{G1} = \mu_{G1} \cdot \dot{m}_{B1} \Rightarrow \dot{m}_{G1} = (\mu_{L1} + 1 - \gamma_\alpha) \cdot \dot{m}_{B1} \Rightarrow \dot{m}_{G1} = (\mu_{L1} + 1) \cdot \dot{m}_{B1} \Rightarrow$$

$$\dot{m}_{G1} = (n_1 \mu_{Lo} + 1) \cdot \dot{m}_{B1} \quad \text{όπου } \dot{m}_{B1} = 0,9396 \text{ kg/s (Σχέση A)}$$

Ο αέρας που περιέχεται στα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου είναι αυτός της περίσσειας αέρα στο θάλαμο καύσης του αεριοστρόβιλου. Η ποσότητα αέρα ανά kg καυσίμου του αεριοστρόβιλου, που περιέχεται στα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου είναι:  $(n_1 - 1) \cdot \mu_{Lo}$

Η παροχή μάζας αέρα που περιέχεται στα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου (1) και που πηγαίνει στον αμοπαραγωγό (2):

$$\dot{m}_{L2} = [(n_1 - 1) \cdot \mu_{Lo}] \cdot \dot{m}_{B1} \quad (\text{Σχέση B})$$

Με διαίρεση των σχέσεων Α και Β κατά μέλη προκύπτει ότι:

$$\frac{\text{Σχέση B}}{\text{Σχέση A}} = \frac{\dot{m}_{L2}}{\dot{m}_{G1}} = \frac{[(n_1 - 1) \cdot \mu_{Lo}] \cdot \dot{m}_{B1}}{(n_1 \mu_{Lo} + 1) \cdot \dot{m}_{B1}} \Rightarrow$$

$$\dot{m}_{L2} = \dot{m}_{G1} \cdot \frac{(n_1 - 1) \cdot \mu_{Lo}}{n_1 \mu_{Lo} + 1} \Rightarrow \dot{m}_{L2} = 80 \cdot \frac{(5 - 1) \cdot 16,828}{5 \cdot 16,828 + 1} \Rightarrow \dot{m}_{L2} = 63,25 \frac{kg}{sec}$$

### Τμήμα της εγκατάστασης που αφορά στον ατμοπαραγωγό (2)

Ποσότητα αέρα ανά kg καυσίμου που απαιτείται για την καύση στον ατμοπαραγωγό

$$\mu_{L2} = n_2 \cdot \mu_{L_o} \Rightarrow \mu_{L2} = 1,1 \cdot 16,828 \Rightarrow \mu_{L2} = 18,51 \frac{\text{kg αέρα}}{\text{kg καυσίμου}}$$

Παροχή μάζας αέρα που απαιτείται για την καύση στον ατμοπαραγωγό

$$\dot{m}_{L2} = \mu_{L2} \cdot \dot{m}_{B2} \Rightarrow \dot{m}_{B2} = \frac{\dot{m}_{L2}}{\mu_{L2}} \Rightarrow \dot{m}_{B2} = \frac{63,25}{18,51} \Rightarrow \dot{m}_{B2} = 3,417 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Η παροχή καυσαερίου μετά τον ατμοπαραγωγό είναι

$$\dot{m}_{G2} = \dot{m}_{G1} + \dot{m}_{B2}$$

Ισοζύγιο ενέργειας στον ατμοπαραγωγό:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{B2} \cdot H_u + \dot{m}_{G1} \cdot [h_{G1}(T_1) - h_{G1}(T_o)] &= \dot{m}_{G2} \cdot [h_{G2}(T_2) - h_{G2}(T_o)] + |\dot{Q}_L| + |\dot{Q}_{\Omega\Phi}| \Rightarrow \\ \dot{m}_{B2} \cdot H_u + \dot{m}_{G1} \cdot C_{pG} \cdot (T_1 - T_o) &= \dot{m}_{G2} C_{pG} \cdot (T_2 - T_o) = |\dot{Q}_L| + |\dot{Q}_{\Omega\Phi}| \Rightarrow \\ 3,417 \cdot 49000 + 80 \cdot 1,05 \cdot (420 - 20) &= (3,417 + 80) \cdot 1,05 \cdot (120 - 20) + 870 + |\dot{Q}_{\Omega\Phi}| \Rightarrow \\ 167433 + 33600 &= 8758,785 + 870 + |\dot{Q}_{\Omega\Phi}| \Rightarrow \\ |\dot{Q}_{\Omega\Phi}| &= 191404,215 \text{ kW} \quad \text{ή} \quad -191,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Η ωφέλιμη θερμότητα που προσδίδεται στο νερό είναι

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\Omega\Phi} &= \dot{m}_D \cdot (h_u - h_w) \Rightarrow \\ 191404,215 &= \dot{m}_D \cdot (3363,8 - 1086,4) \Rightarrow \\ \dot{m}_D &= 84 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \end{aligned}$$

Ο ολικός βαθμός απόδοσης του ατμοπαραγωγού είναι:

$$\begin{aligned} n_{ολικός} &= \frac{\dot{Q}_{\Omega\Phi} - \dot{Q}_{βοηθ.}}{\dot{m}_{G1} \cdot C_{pG} \cdot (T_1 - T_o) + \dot{m}_{B2} \cdot H_u} = \frac{\dot{m}_D \cdot (h_u - h_w) - \dot{Q}_{βοηθ.}}{\dot{m}_{G1} \cdot C_{pG} \cdot (T_1 - T_o) + \dot{m}_{B2} \cdot H_u} \Rightarrow \\ n_{ολικός} &= \frac{84 \cdot (3363,8 - 1086,4) - 3000}{80 \cdot 1,05 \cdot (420 - 20) + 3,417 \cdot 49000} \Rightarrow n_{ολικός} = \frac{188301,6}{201033} = 0,936 \Rightarrow \\ n_{ολικός} &= 93,6\% \end{aligned}$$