



Θερμικοί Σταθμοί και Συμπαγωγή

Άσκηση 5 (Συνδυασμένος κύκλος (2))

Μελετάται η εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου-ατμοστροβίλου. Στον αεριοστροβίλο της εγκατάστασης καίγεται φυσικό αέριο με λόγο αέρα καύσης 3,6 και στη γεννήτριά του παράγονται 100 MW_{el}, με βαθμό απόδοσης 30%. Τα καυσαέρια του αεριοστροβίλου οδηγούνται στο Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ), στην είσοδο του οποίου πραγματοποιείται επιπρόσθετη καύση φυσικού αερίου χρησιμοποιώντας εξ'ολοκλήρου το οξυγόνο των καυσαερίων του αεριοστροβίλου προκειμένου η θερμοκρασία του καυσαερίου να ανέλθει στους 550°C. Στο ΛΑΘ παράγεται ατμός σε δύο πιέσεις:

- **Ατμός υψηλής πίεσης 60 bar**, θερμοκρασίας 510°C, ενθαλπίας 3423 kJ/kg και παροχής 160 t/h. Ο ατμός οδηγείται στον ατμοστροβίλο της μονάδας όπου και αποτονώνεται μέχρι τελικής πίεσης 70 mbar και ενθαλπίας 2200 kJ/kg. Ο ατμός αυτός συμπυκνώνεται και το κορεσμένο συμπύκνωμα επιστρέφει στο τροφοδοτικό δοχείο της εγκατάστασης, μέσω της αντλίας συμπυκνωμάτων.
- **Κορεσμένος ατμός πίεσης 10 bar**, παροχής 50 t/h, ένα τμήμα της παροχής αυτής χρησιμοποιείται για την απαέρωση του τροφοδοτικού δοχείου, ενώ η υπόλοιπη παροχή οδηγείται στις βαθμίδες του στροβίλου, όπου και αποτονώνεται μέχρι τελικής πίεσης 70 mbar και ενθαλπίας 2200 kJ/kg.

Το τροφοδοτικό νερό έχει θερμοκρασία 133°C και με τις κατάλληλες τροφοδοτικές αντλίες οδηγείται στο αντίστοιχο σύστημα ατμοποίησης.

Να υπολογισθούν:

- 1) Η παροχή του φυσικού αερίου για την επιπρόσθετη καύση.
- 2) Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ).
- 3) Να σχεδιαστεί το διάγραμμα Q-T του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ).
- 4) Ο βαθμός απόδοσης του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ καυσαερίου και κυκλώματος νερού-ατμού (pinch point).
- 5) Η παροχή ατμού που χρησιμοποιείται για την απαέρωση του τροφοδοτικού δοχείου.
- 6) Η συνολικά καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης.
- 7) Το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης λόγω καυσίμου σε €/MWh_{el}.
- 8) Ο καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της Μονάδας.
- 9) Να προτείνετε έναν τρόπο αύξησης του βαθμού απόδοσης του ΛΑΘ.

Δίνονται:

- Το φυσικό αέριο έχει κατώτερη θερμογόνο ικανότητα 47.941,89(kJ/kg) και την παρακάτω κατά μάζα σύσταση:

γ_{CH_4}	$\gamma_{C_2H_6}$	γ_{CO_2}	γ_{N_2}
93%	3%	1%	3%

- Η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα των καυσαερίων να ληφθεί 1,1 (kJ/(kg K)).
- Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ίση με 20°C, ενώ η υγρασία του αέρα είναι ίση με 0,01 (kg_{υγρασίας}/kg_{αέρα}).
- Οι άδηλες απώλειες και οι απώλειες πίεσης στο λέβητα ανάκτησης θερμότητας και στις σωληνώσεις της εγκατάστασης είναι αμελητέες.
- Οι πάσης φύσης απώλειες (άδηλες, ηλεκτρικές και μηχανικές απώλειες) του αεριοστρόβιλου είναι αμελητέες.
- Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας και ο μηχανικός β.α. του ατμοστρόβιλου είναι 99% και 98%, αντίστοιχα.
- Η ενεργειακή ανύψωση από τις διάφορες αντλίες θεωρείται αμελητέα.
- Το κόστος του φυσικού αερίου είναι 30(€/MWh_{th}).
- Οι ιδιοκαταναλώσεις της Μονάδας αποτελούν το 5% της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.
- Η εγκατάσταση λειτουργεί για 4000 ώρες το χρόνο.

Χαρακτηριστικά μεγέθη για στοιχειομετρική καύση:

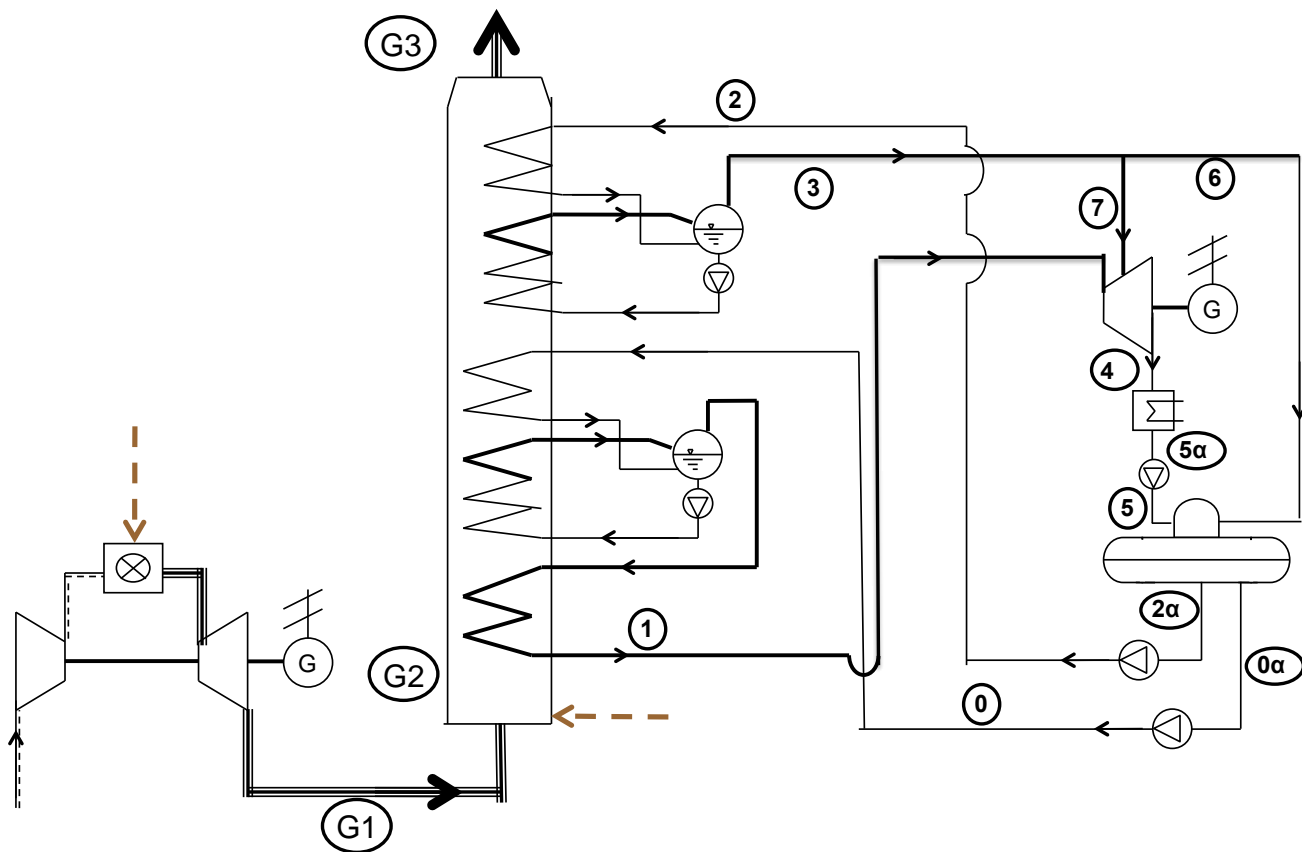
Όνομα	Σύμβ.	μ_{O_2O}	μ_{LoT}	μ_{CO_2}	μ_{SO_2}	μ_{N_2O}	μ_{GoT}	$\mu_{(H_2O)_B}$	μ_{G_o}
		kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg	kg/kg
Άνθρακας	C	2,665	11,480	3,665	0	8,815	12,480	0	12,480
Υδρογόνο	H	7,936	34,194	0	0	26,258	26,258	8,936	35,194
Θείο	S	0,998	4,300	0	1,998	3,302	5,300	0	5,300
Οξυγόνο	O	1,000	4,308	0	0	3,308	3,308	0	3,308
Άζωτο	N	0	0	0	0	1,000	1,000	0	1,000
Υδρατμός	H ₂ O	0	0	0	0	0	0	1,000	1,000
Μεθάνιο	CH ₄	3,990	17,189	2,743	-	13,199	15,943	2,246	18,189
Αιθάνιο	C ₂ H ₆	3,725	16,049	2,927	-	12,324	15,251	1,798	17,049
Υδρόθειο	H ₂ S	1,408	6,068	-	1,880	4,660	6,539	0,529	7,068
Προπάνιο	C ₃ H ₈	3,629	15,634	2,994	-	12,005	15,000	1,634	16,634



Πίνακες κορεσμένου νερού-ατμού

p[bar]	θ[°C]	ρ'[kg/m³]	ρ''[kg/m³]	h'[kJ/kg]	h''[kJ/kg]	s'[kJ/kgK]	s''[kJ/kgK]
0,05	32,9	994,7	0,035	137,8	2560,8	0,476	8,394
0,06	36,2	993,6	0,042	151,5	2566,7	0,521	8,329
0,07	39,0	992,6	0,049	163,4	2571,8	0,559	8,275
0,08	41,5	991,6	0,055	173,9	2576,2	0,593	8,227
0,09	43,8	990,7	0,062	183,3	2580,3	0,622	8,186
0,1	45,8	989,8	0,068	191,8	2583,9	0,649	8,149
0,2	60,1	983,1	0,131	251,4	2608,9	0,832	7,907
0,3	69,1	978,3	0,191	289,2	2624,6	0,944	7,767
0,4	75,9	974,3	0,250	317,6	2636,1	1,026	7,669
0,5	81,3	971,0	0,309	340,5	2645,2	1,091	7,593
1,0	99,6	958,6	0,590	417,4	2674,9	1,303	7,359
1,5	111,4	949,9	0,863	467,1	2693,1	1,434	7,223
2,0	120,2	942,9	1,129	504,7	2706,2	1,530	7,127
2,5	127,4	937,0	1,391	535,4	2716,5	1,607	7,052
3,0	133,5	931,8	1,651	561,5	2724,9	1,672	6,992
3,5	138,9	927,1	1,908	584,3	2732,0	1,727	6,940
4,0	143,6	922,9	2,163	604,7	2738,1	1,777	6,895
4,5	147,9	919,0	2,416	623,2	2743,4	1,821	6,856
5,0	151,8	915,3	2,668	640,2	2748,1	1,861	6,821
10,0	179,9	887,1	5,145	762,7	2777,1	2,138	6,585
20,0	212,4	849,8	10,042	908,6	2798,4	2,447	6,339
30,0	233,9	821,9	15,001	1008,4	2803,3	2,646	6,186
40,0	250,4	798,4	20,090	1087,4	2800,9	2,797	6,070
50,0	263,9	777,4	25,351	1154,5	2794,2	2,921	5,974
60,0	275,6	758,0	30,818	1213,7	2784,6	3,027	5,890
70,0	285,8	739,7	36,524	1267,4	2772,6	3,122	5,815
80,0	295,0	722,2	42,503	1317,1	2758,6	3,208	5,745





Μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης.

Λύση

1) Παροχή φυσικού αερίου για την επιπρόσθετη καύση

Παροχή καυσαερίου από τον αεριοτρόβιλο

$$\dot{m}_{fg,GT} = \dot{m}_{f,GT} \cdot \mu_{g,GT}$$

Από ισοζύγιο ενέργειας αεριοτροβίλου

$$\dot{m}_{f,GT} = \frac{P_{GT}}{\eta_{GT} \cdot Hu} = \frac{100000}{0.30 \cdot 47941.89} = 6.953 \text{ kg/s}$$

$$\mu_{g,GT} = 1 + \mu_{L,GT} = 1 + n\mu_{LoT}(1 + x_{H_2O}) = 1 + 3.6\mu_{LoT}(1 + 0.01)$$

Για το φυσικό αέριο:

$$\mu_{LoT} = \gamma_{CH_4} \cdot \mu_{LoT,CH_4} + \gamma_{C_2H_6} \cdot \mu_{LoT,C_2H_6} + \gamma_{CO_2} \cdot \mu_{LoT,CO_2} + \gamma_{N_2} \cdot \mu_{LoT,N_2} = 16.467$$

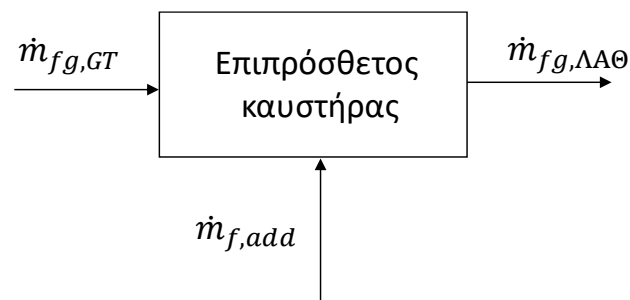
Άρα

$$\mu_{g,GT} = 60.875 \text{ και } \dot{m}_{fg,GT} = 423.25 \text{ kg/s}$$

Υπολογισμός θερμοκρασίας καυσαερίου μετά τον αεριοτρόβιλο από ισολογισμό ενέργειας στον αεριοτρόβιλο

$$\begin{aligned} T_{fg,GT} &= T_{amb} + \frac{Q_{GT,loss}}{\dot{m}_{fg,GT} \cdot cp_{fg}} = T_{amb} + \frac{(1 - \eta_{GT}) \cdot \dot{m}_{f,GT} \cdot Hu}{\dot{m}_{fg,GT} \cdot cp_{fg}} \\ &= 20 + \frac{(1 - 0.30) \cdot 6.953 \cdot 47941.89}{423.25 \cdot 1.1} = 521.2 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ισολογισμός ενέργειας κατά την επιπρόσθετη καύση:



Είσοδος ενέργειας (θερμό καυσαέριο από αεριοτρόβιλο και θερμική ισχύς επιπρόσθετου καυσίμου):

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{fg,GT} \cdot cp_{fg} \cdot (T_{fg,GT} - T_{amb}) + \dot{m}_{f,add} \cdot Hu \quad (1)$$

Σημ: Δεν έχουμε επιπλέον αέρα καύσης αφού η καύση επιτυγχάνεται μέσω του οξυγόνου που βρίσκεται στα καυσαέρια του αεριοτροβίλου

Έξοδος ενέργειας (θερμό καυσαέριο μετά τον επιπρόσθετο καυστήρα):



$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta} \cdot c_{pfg} \cdot (T_{fg, \Lambda\Lambda\theta, in} - T_{amb}) \quad (2)$$

όπου Επιπλέον $T_{fg, \Lambda\Lambda\theta, in} = 550^\circ\text{C}$ (από εκφώνηση)

Από ισοζύγιο μάζας στον επιπρόσθετο καυστήρα:

$$\dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta} = \dot{m}_{fg, GT} + \dot{m}_{f, add} \quad (3)$$

Η μέθοδος επίλυσης γίνεται επαναληπτικά ως εξής:

- 1) Υποθέτουμε μία παροχή $\dot{m}_{f, add}$
- 2) Από την εξίσωση (3) υπολογίζουμε το $\dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta, in}$
- 3) Από την εξίσωση (1) υπολογίζουμε το \dot{Q}_{in}
- 4) Θέτουμε στην εξίσωση (2) $\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in}$
- 5) Λύνουμε την εξίσωση (2) ως προς $\dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta}$
- 6) Από το $\dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta, in}$ χρησιμοποιούμε την εξίσωση (3) για να υπολογίζουμε τη νέα τιμή του $\dot{m}_{f, add}$
- 7) Επαναλαμβάνουμε μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση στις διαδοχικές τιμές $\dot{m}_{f, add}$ που υπολογίζουμε

Τελικά προκύπτει $\dot{m}_{f, add} = 0.283 \text{ kg/s}$

Και $\dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta} = 423.54 \text{ kg/s}$

2) Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ).

Ισολογισμός ενέργειας στο ΛΑΘ

$$\dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta} \cdot c_{pfg} \cdot (T_{fg, \Lambda\Lambda\theta, in} - T_{fg, \Lambda\Lambda\theta, out}) = \dot{Q}_{\omega\varphi}$$

άρα

$$T_{fg, \Lambda\Lambda\theta, out} = T_{fg, \Lambda\Lambda\theta, in} - \frac{\dot{Q}_{\omega\varphi}}{\dot{m}_{fg, \Lambda\Lambda\theta} \cdot c_{pfg}}$$

$$\dot{Q}_{\omega\varphi} = \dot{m}_{D, \gamma\Pi} (h_7 - h_0) + \dot{m}_{D, \chi\Pi} (h_3 - h_2)$$

$$h_2 = h_0 = c_{pw} \cdot 133 = 556.9 \text{ kJ/kg}$$

Καθώς όλα τα άλλα μεγέθη είναι γνωστά υπολογίζουμε:

$$\dot{Q}_{\omega\varphi} = 158218 \text{ kW}$$

Επομένως προκύπτει:

$$T_{fg, \Lambda\Lambda\theta, out} = 210.4^\circ\text{C}$$



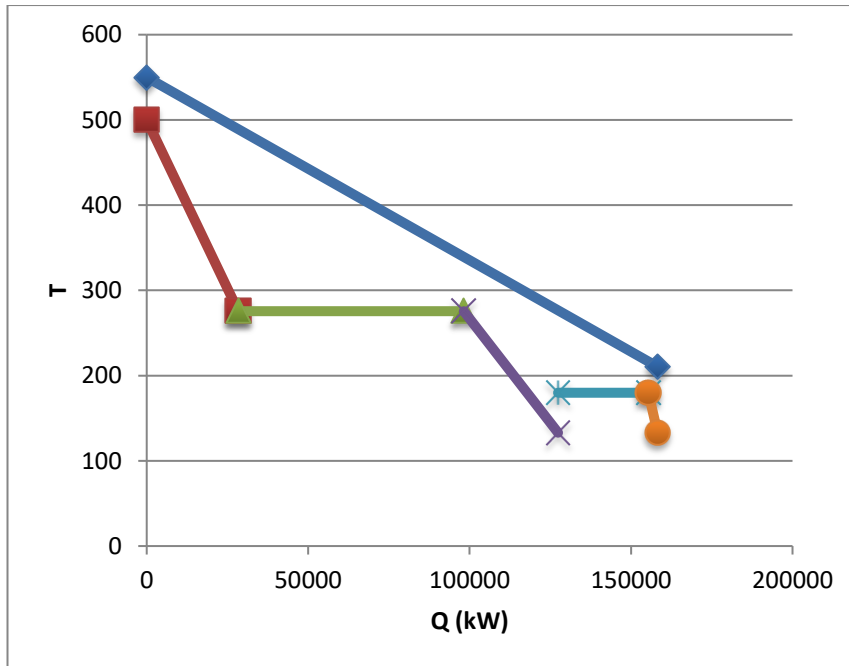
3) Να σχεδιαστεί το διάγραμμα Q-T του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας (ΛΑΘ).

Προσδιορίζουμε την εξίσωση της καμπύλης του καυσαερίου

$$\dot{Q}_{fg} = cp_{fg} \cdot \Delta T_{fg} + b$$

$$\text{Για } \Delta T_{fg} = 0, b = 550$$

Με βάση αυτά τα στοιχεία σχεδιάζουμε την ευθεία γραμμή του καυσαερίου.



Υπολογίζουμε τα h' και h'' καθώς και τις θερμοκρασίες κορεσμού του νερού για πιέσεις 60 και 10 bar από τους πίνακες κορεσμού.

Έτσι για το ρεύμα ατμού υψηλής πίεσης:

$$\dot{Q}_{sh,\gamma\Pi} = \dot{m}_{D,\gamma\Pi} [h_1 - h''(60bar)] = 28372 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{ev,\gamma\Pi} = \dot{m}_{D,\gamma\Pi} [h''(60bar) - h'(60bar)] = 69814 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{pre,\gamma\Pi} = \dot{m}_{D,\gamma\Pi} [h'(60bar) - h_0] = 29194 \text{ kW}$$

Ενώ αντίστοιχα για το ρεύμα χαμηλής πίεσης

$$\dot{Q}_{sh,\chi\Pi} = 0$$

$$\dot{Q}_{ev,\chi\Pi} = \dot{m}_{D,\chi\Pi} [h''(10bar) - h'(10bar)] = 27978 \text{ kW}$$



$$\dot{Q}_{pre,XP} = \dot{m}_{D,XP} [h'(10bar) - h_2] = 2858 \text{ kW}$$

Η θερμοκρασία του καυσαερίου στις εισόδους εξόδους των περιοχών του ΛΑΘ υπολογίζεται από τη γενική εξίσωση:

$$T_{fg, \Lambda A \theta, i} = T_{fg, \Lambda A \theta, in} - \frac{\sum \dot{Q}_{\omega \phi}}{\dot{m}_{fg, \Lambda A \theta} \cdot c p_{fg}}$$

Όπου $\sum \dot{Q}_{\omega \phi}$ το συνολικό ποσό που έχει συναλλαχθεί μέχρι το σημείο i.

Υπολογίζοντας όλες τις ενδιάμεσες θερμοκρασίες του καυσαερίου και κατασκευάζουμε το Q-T.

4) Ο βαθμός απόδοσης του Λέβητα Ανάκτησης Θερμότητας και η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ καυσαερίου και κυκλώματος νερού-ατμού (pinch point).

Η ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά υπολογίζεται βρίσκοντας την ελάχιστη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των διαφορών που έχουμε υπολογίσει στο προηγούμενο ερώτημα. Τελικά είναι $PP=33.01 \text{ K}$.

Ο βαθμός απόδοσης του ΛΑΘ:

$$\eta_{\Lambda A \theta} = \frac{\dot{Q}_{\omega \phi}}{\dot{m}_{fg, \Lambda A \theta} \cdot c p_{fg} (T_{fg, \Lambda A \theta, in} - T_{amb})} = \frac{158218}{246757} = 64.12\%$$

5) Η παροχή ατμού που χρησιμοποιείται για την απαέρωση του τροφοδοτικού δοχείου.

Ισολογισμός ενέργειας στο τροφοδοτικό δοχείο:

$$\dot{m}_{5\alpha} h_{5\alpha} + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_{2\alpha} h_{2\alpha} + \dot{m}_{0\alpha} h_{0\alpha}$$

$$h_{2\alpha} = h_{0\alpha} = h_2 = h_3 = c p_w \cdot 133 = 556.9 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{5\alpha} = h'(0.07bar) = 163.37 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = h_7 = h_3 = h''(10bar) = 2777 \text{ kJ/kg}$$

Επιπλέον

$$\dot{m}_{5\alpha} = \dot{m}_7 + \dot{m}_1 = \dot{m}_3 - \dot{m}_6 + \dot{m}_1$$

Αντικαθιστούμε το $\dot{m}_{5\alpha}$ στην εξίσωση ισολογισμού ενέργειας του τροφοδοτικού δοχείου και επιλύουμε ως προς τον μόνο άγνωστο που είναι το \dot{m}_6 . Τελικά $\dot{m}_6 = 31.62 \text{ t/h}$

6) Η συνολικά καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς της εγκατάστασης.

Αφού έχουμε ιδιοκαταναλώσεις 5%, η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι ίση με:

$$P_{net, tot} = 0.95(P_{GT} + P_{ST}) = 0.95 \cdot [P_{GT} + \eta_m \eta_G [\dot{m}_1 (h_1 - h_4) + \dot{m}_7 (h_7 - h_4)]]$$



Στην παραπάνω εξίσωση όλα τα μεγέθη είναι γνωστά καθώς είτε δίνονται από την εκφώνηση είτε έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενα ερωτήματα. Τελικά προκύπτει: $P_{net,tot} = 147183 \text{ kW}$

7) Το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης λόγω καυσίμου σε €/MWh_{el}.

Ετήσια κατανάλωση καυσίμου για 4000 ώρες λειτουργίας:

$$M_{fuel} = 4000(\dot{m}_{f,GT} + \dot{m}_{f,add}) = 4000h \cdot \left(\frac{25.03t}{h} + \frac{1.02t}{h} \right) = 104200 \text{ t}$$

Το οποίο ισοδυναμεί σε θερμότητα καυσίμου (μετατροπή σε MWh):

$$Q_{fuel} = M_{fuel} \cdot Hu = 1387691 \text{ MWh}$$

Από το κόστος καυσίμου που δίνεται από την εκφώνηση

$$C_{fuel} = Q_{fuel} \cdot K_{fuel} = 1387691 \cdot 30 = 41630727.24 \text{ €}$$

Η ετησίως παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι:

$$E_{el} = P_{net,tot} \cdot 4000 = 591253.11 \text{ MWh}$$

Έτσι προκύπτει κόστος ανά MWh

$$C_e = \frac{C_{fuel}}{E_{el}} = 70.4 \text{ €/MWh}$$

8) Ο καθαρός ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της Μονάδας.

$$\eta_{e,net} = \frac{P_{net,tot}}{\dot{Q}_f} = \frac{P_{net,tot}}{\dot{Q}_{GT} + \dot{Q}_{add}} = \frac{P_{net,tot}}{(\dot{m}_{f,GT} + \dot{m}_{f,add})Hu} = 42.61\%$$

9) Τρόπος αύξησης του βαθμού απόδοσης του ΛΑΘ

Πχ. μείωση της θερμοκρασίας εξόδου του καυσαερίου από το ΛΑΘ μέσω αύξησης της παροχής ατμού υψηλής και χαμηλής πίεσης.

