



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας

Ενότητα 4(β) : Αεριοποίηση Βιομάζας

Αναπλ. Καθηγητής: Γεώργιος Μαρνέλλος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο **«Ανοικτά Ψηφιακά Μαθήματα του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας»** έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Περιεχόμενα

1.	Τι είναι η αεριοποίηση της Βιομάζας	4
2.	Τεχνολογίες αεριοποίησης	7
2.1	Παράδειγμα	9
2.1.1	Αρχικά υπολογίζεται η μοριακή αναλογία της τροφοδοτούμενης βιομάζας: (Α)	10
2.1.2	Το ενεργειακό ισοζύγιο του αεριοποιητή είναι (Β):	12
2.1.3	Η ενεργειακή απόδοση της αεριοποίησης ορίζεται ως (Γ):.....	14
3.	Ηλεκτροπαραγωγή σε θερμικές μηχανές Brayton	14
3.1	Παράδειγμα	16
3.1.1	Το ισοζύγιο ενέργειας του θαλάμου καύσης είναι:	16
3.1.2	Έτσι, η συνολική ποσότητα των απαερίων που τροφοδοτούνται στον στρόβιλο του κύκλου Brayton, είναι:.....	18
4.	Ηλεκτροπαραγωγή σε συνδυασμένους κύκλους αεριο- ατμο-στροβίλου.....	19
4.1	Παράδειγμα	20
5.	Οικονομικά της συμπαραγωγής από αεριοποίηση βιομάζας.....	22
5.1	Παράδειγμα	22

1. Τι είναι η αεριοποίηση της Βιομάζας

Αεριοποίηση βιομάζας (ή οποιοδήποτε στερεού ή υγρού καυσίμου ή βιοκαυσίμου) είναι η θερμοχημική μετατροπή της σε αέριο βιο- καυσίμο κατά τη θέρμανση της σε υψηλές θερμοκρασίες (650 – 1200 °C) και την ταυτόχρονη παροχή του λεγόμενου μέσου αεριοποίησης, το οποίο μπορεί να είναι:

- υπο-στοιχειομετρικό οξυγόνο (δηλαδή ποσότητας οξυγόνου μικρότερης από αυτή που απαιτείται από τη στοιχειομετρία της αντίδρασης πλήρους καύσης – συνήθως τροφοδοτείται 20 – 25 % του οξυγόνου που απαιτείται για πλήρη καύση και η αεριοποίηση συμβαίνει σε συνθήκες μερικής οξειδωσης) με τη μορφή αέρα – στην περίπτωση αυτή η διεργασία είναι εξώθερμη (εκτός από αέριο βιοκαύσιμο παράγει και θερμότητα),
- καθαρό οξυγόνο σε υπο-στοιχειομετρική αναλογία ως προς τη βιομάζα – και στην περίπτωση αυτή η διεργασία είναι εξώθερμη,
- μίγμα υδρατμών / αέρα ή υδρατμών / οξυγόνου – η διεργασία είναι εξώθερμη, αυτόθερμη (δεν παράγει ούτε καταναλώνει θερμότητα) ή αλλόθερμη (ενδόθερμη – καταναλώνει θερμότητα) ανάλογα με τη σχετική αναλογία οξυγόνου / υδρατμού στο μέσο αεριοποίησης ή
- υδρατμοί, οπότε και η διεργασία οδηγεί σε μίγματα πλούσια σε υδρογόνο και είναι αλλόθερμη.

Το παραγόμενο αέριο βιοκαύσιμο ονομάζεται **αέριο σύνθεσης** και αποτελείται:

- κυρίως H_2 και CO τα οποία αποτελούν και τα κύρια καύσιμα συστατικά του,
- μικρές ποσότητες αερίων υδρογονανθράκων (κυρίως CH_4 , C_2H_6 , ή C_2H_4) τα οποία επίσης αποτελούν καύσιμα συστατικά, και
- CO_2 και N_2 (το δεύτερο μόνο στην περίπτωση που το μέσο αεριοποίησης περιέχει αέρα) τα οποία αποτελούν και ανεπιθύμητους παράγοντες αραίωσης των καυσίμων συστατικών του αερίου σύνθεσης.

Επίσης, η διεργασία, πέραν του επιθυμητού αερίου προϊόντος της αφήνει και ένα στερεό ή πηκτώδες υπόλειμμα που αποτελείται από στερεό άνθρακα, υδρογονάνθρακες και άλλες οργανικές ενώσεις υψηλού μοριακού βάρους και αντιστοιχεί στο 5 – 15 % κ.β. της αρχικής τροφοδοσίας βιομάζας και μπορεί να καεί σε περίσσεια οξυγόνου.

Κατά την αεριοποίηση με:

- **αέρα:** εξαιτίας της αραίωσης του παραγόμενου αερίου από το N_2 , αυτό διαθέτει χαμηλή θερμογόνο δύναμη ($\sim 5 \text{ MJ/m}^3$) και υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων κατά την καύση του σε αεριοστροβίλους (κύκλοι Brayton) για την συμπαραγωγή ηλεκτρικής/θερμικής ισχύος.

- **οξυγόνο:** αποφεύγεται η αραίωση με N_2 και το παραγόμενο αέριο διαθέτει μέση θερμογόνο δύναμη ($\sim 10 - 12 \text{ MJ/m}^3$) – στην περίπτωση αυτή το κόστος διαχωρισμού του οξυγόνου από τον ατμοσφαιρικό αέρα ισοσκελίζεται από την υψηλότερη ποιότητα του παραγόμενου αερίου.
- **υδρατμό:** η θερμογόνος δύναμη του παραγόμενου αερίου μεγιστοποιείται ($\sim 15 - 20 \text{ MJ/m}^3$) με αύξηση, όμως των θερμικών απαιτήσεων της διεργασίας, η οποία ελαττώνει την ολική απόδοση της διεργασίας.

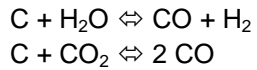
Η αεριοποίηση συμβαίνει σε ειδικούς αντιδραστήρες (αεριοποιητές) και πρόκειται για μία περίπλοκη διεργασία η οποία αποτελείται από πλήθος σταδίων στα οποία υπόκειται η πρώτη ύλη μετά την είσοδο της στον αεριοποιητή. Τα στάδια της αεριοποίησης είναι:

- η ξήρανση των τεμαχίων ή των σωματιδίων βιομάζας, η οποία είναι ενδόθερμη και συμβαίνει κατά την είσοδο της στον αεριοποιητή,
- η πυρόλυση της κύριας μάζας των τεμαχίων ξηρής βιομάζας κατά τη θέρμανση τους στους $300 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ απουσία οξυγόνου, η δράση του οποίου περιορίζεται μόνο στην επιφάνεια των σωματιδίων αυτών – η πυρόλυση οδηγεί σε μίγμα **σταθερών αερίων** προϊόντων (H_2 , CO , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 και CO_2), **ατμών** βαρέων υδρογονανθράκων ή άλλων αλειφατικών ή κυκλικών οργανικών ενώσεων (καρβονύλια, εστέρες, φαινόλες, φουράνια, προϊόντα βενζολικών δακτυλίων), βαρύτερων υγρών κλασμάτων (**πίσσες**) και **στερεό ανθρακικό υπόλειμμα**, οι σχετικές αποδόσεις των οποίων εξαρτώνται από:
 - το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας,
 - την τελική της τιμή, και
 - το χρόνο παραμονής σε αυτή.

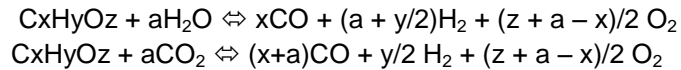
Η πυρόλυση είναι γρήγορη και δεν ελέγχει το ρυθμό του συνολικού φαινομένου

- η καύση των αερίων, των υγρών και των στερεών προϊόντων της πυρόλυσης, από το οξυγόνο του μέσου αεριοποίησης, προς σταθερά αέρια (CO , CO_2 , H_2O),
- η αεριοποίηση των άκαυστων υγρών και στερεών προϊόντων της πυρόλυσης κατά την αντίδραση τους με τα προϊόντα της καύσης, προς CO , H_2 και αέριους υδρογονάνθρακες:

αεριοποίηση άνθρακα

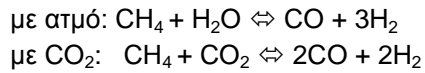


αεριοποίηση βιομάζας

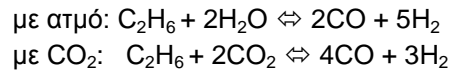


η αναμόρφωση των υδρογονανθράκων προς CO και H₂ , π.χ.:

αναμόρφωση μεθανίου :



αναμόρφωση αιθανίου:

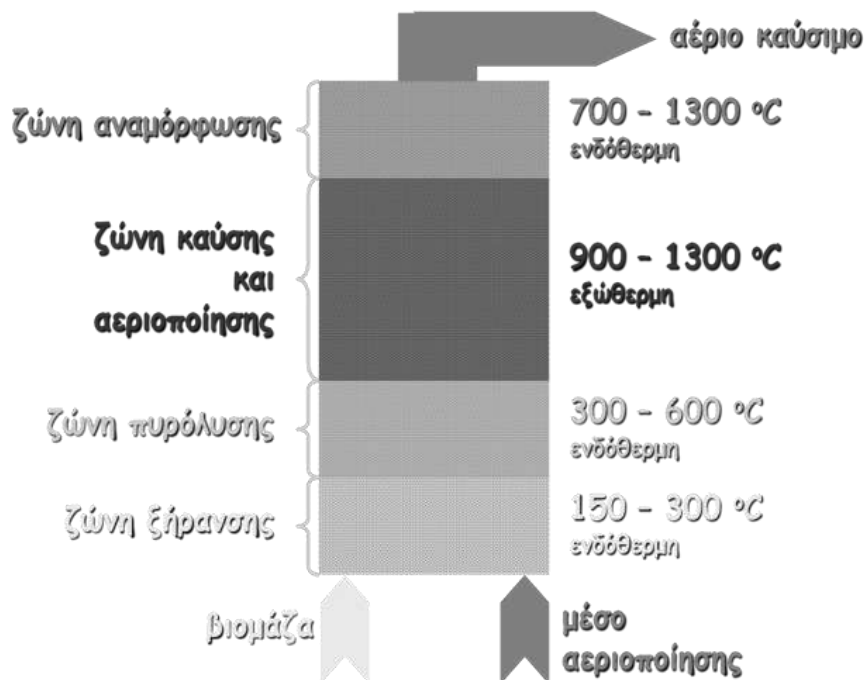


ισορροπία του υδραερίου:



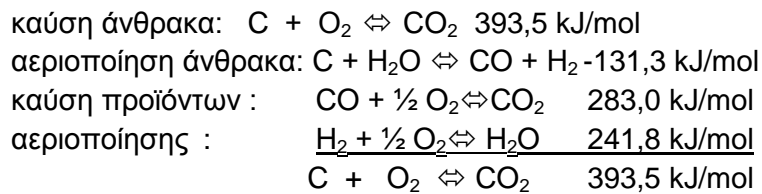
Οι αντιδράσεις αερίων – στερεών είναι οι βραδύτερες και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό και την απόδοση της συνολικής διεργασίας αεριοποίησης. Η σύσταση του παραγόμενου αερίου καθορίζεται από:

- τη σύσταση της τροφοδοσίας,
- την περιεχόμενη υγρασία,
- τη θερμοκρασία στις διάφορες ζώνες του αεριοποιητή,
- το χρόνο παραμονής,
- την ενδεχόμενη κατάλυση,
- την έκταση των αντιδράσεων πυρόλυσης, οξειδωσης, αεριοποίησης και αναμόρφωσης.



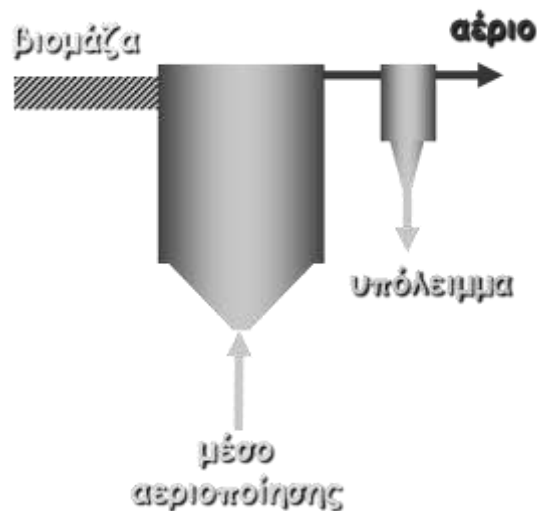
Η σχηματική αναπαράσταση της κατανομής των αντιδράσεων και των θερμοκρασιών, κατά μήκος του αεριοποιητή (στην ειδική περίπτωση των αεριοποιητών ανοδικής ομοροής), φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι, θερμοδυναμικά, η αεριοποίηση είναι μία ενεργειακά ουδέτερη αντίδραση (η βιομάζα είτε καεί απευθείας, είτε αρχικά αεριοποιηθεί και στη συνέχεια καούν τα προϊόντα της αεριοποίησης, αποδίδει το ίδιο ποσό ενέργειας), όπως εύκολα αποδεικνύεται από την ειδική περίπτωση της αεριοποίησης του στερεού άνθρακα:

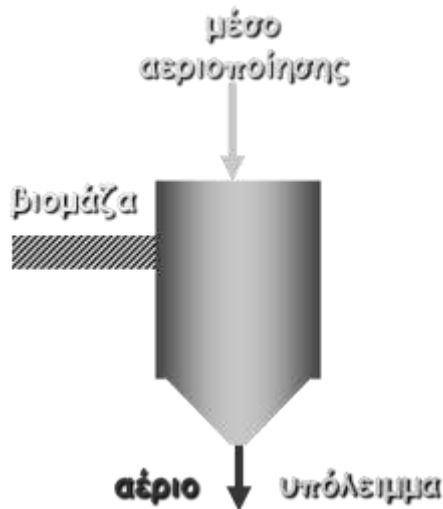


2. Τεχνολογίες αεριοποίησης

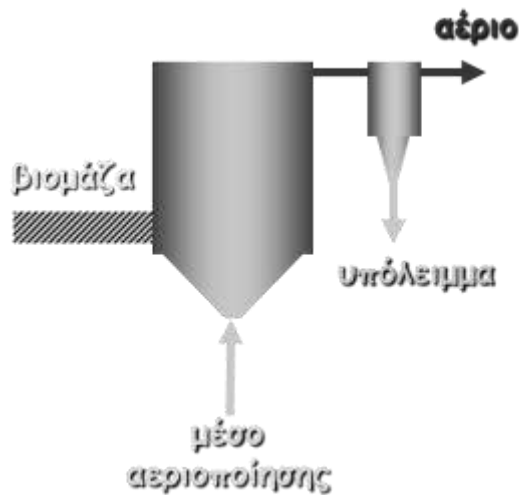
Σε μία πρώτη προσέγγιση οι αεριοποιητές διακρίνονται σε αντιροής και ομοροής, όσον αφορά στην κατεύθυνση μεταφοράς των στερεών βιομάζας και του αερίου (μέσο αεριοποίησης + παραγόμενο αέριο), καθώς και σε ανερχόμενη ή κατερχόμενη ροή, όσον αφορά στα στερεά του πολυφασικού συστήματος της αεριοποίησης:



εικόνα: αεριοποιητής κατερχόμενης αντιροής



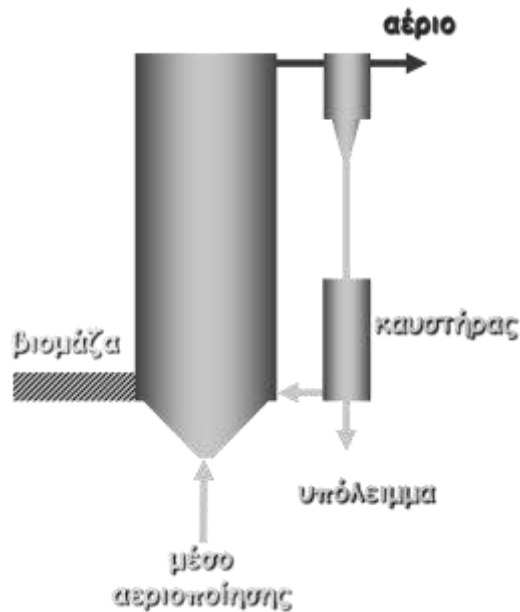
εικόνα: αεριοποιητής κατερχόμενης ομοροής



εικόνα: αεριοποιητής ανερχόμενης ομοροής

Σε μία δεύτερη προσέγγιση, οι αεριοποιητές διακρίνονται σε σταθερής, ρευστο-στερεάς και ανακυκλούμενης ρευστο-στερεάς κλίνης, αν και οι γεωμετρίες και οι τεχνολογίες αεριοποιητών, είναι πολλές και ποικιλόμορφες.

Οι αεριοποιητές **σταθερής κλίνης** είναι οι πιο απλές διατάξεις και στο εσωτερικό τους φέρουν στερεό αδρανές ή καταλυτικό πληρωτικό υλικό, με το οποίο αναμιγνύεται η εισερχόμενη, μέσω κοχλία τροφοδοσίας (και σε λεπτά τεμάχια), βιομάζα.



εικόνα: αεριοποιητής ανακυκλούμενης ρευστοστερεάς κλίνης

Οι **αεριοποιητές ρευστοστερεάς κλίνης** επιτυγχάνουν ικανοποιητικό έλεγχο θερμοκρασίας και υψηλούς ρυθμούς αντίδρασης αλλά λόγω υψηλού κόστους, είναι οικονομικά βιώσιμοι για δυναμικότητες πάνω από 10 τν ξηρής βιομάζας / ώρα, με μειονέκτημα τη μερική απώλεια άνθρακα με την τέφρα, που παρασύρεται λόγω του ισχυρού πεδίου ροής μέσα στον αεριοποιητή. Περισσότερο αποδοτικοί, όσον αφορά στη μετατροπή στερεών (αλλά και της ανάκτησης του θερμικού περιεχομένου του στερεού υπολείμματος και της πίσσας που επικάθεται στο πληρωτικό υλικό, μέσω της καύσης του σε παρακείμενο καυστήρα) είναι οι αεριοποιητές **ανακυκλούμενης ρευστοστερεάς κλίνης**, εμφανίζουν όμως υψηλότερο κόστος κατασκευής και είναι οικονομικά αποτελεσματικοί σε δυναμικότητες πάνω από 15 τν ξηρής βιομάζας / ώρα.

2.1 Παράδειγμα

Βιομάζα με στοιχειακή σύσταση:

C	54 %
O	40 %
H	6 % κ.β.

3 % τέφρα και υγρασία 9 % κ.β. εισέρχεται σε αεριοποιητή ανακυκλούμενης ρευστοστερεάς κλίνης με ρυθμό 1 kg/sec. Η αεριοποίηση επιτυγχάνεται με παροχή αέρα 20 % του στοιχειομετρικού για πλήρη καύση και η έκταση της είναι 90 % κ.β. Το οργανικό μέρος του στερεού υπολείμματος έχει στοιχειακή σύσταση:

C	70 %
O	25 % και
H	5 %

Να υπολογιστούν:

- A. Η σύσταση του παραγόμενου αερίου, που αποτελείται από H_2 , CO , CH_4 , CO_2 και N_2 , θεωρώντας ότι το μεθάνιο αποτελεί το 5 % κ.ο. του παραγόμενου αερίου και το ειδικό θερμικό περιεχόμενό του.
- B. Η θερμοκρασία εξόδου του αερίου, αν το στερεό υπόλειμμα καίγεται σε παρακείμενο καυστήρα και η θερμότητα που παράγεται από την καύσης του τροφοδοτείται στον αεριοποιητή χωρίς απώλειες, και
- Γ. η ενεργειακή απόδοση της διεργασίας.

Λύση

2.1.1 Αρχικά υπολογίζεται η μοριακή αναλογία της τροφοδοτούμενης βιομάζας: (A)

1 kg ξηρής βιομάζας περιέχει:

550 gr C	ή	45,00 mol C
400 gr O	ή	25,00 mol O
50 gr H	ή	60,00 mol H

Οπότε, σε 1 sec, στον αεριοποιητή τροφοδοτούνται :

880 gr ξηρής βιομάζας ή
39,60 mol C
22,00 mol O
52,80 mol H
90 gr νερού ή 5,00 mol H_2O ή 5,00 mol H_2 και 5,00 mol O

Το οξυγόνο που απαιτείται για πλήρη καύση της εισερχόμενης σε 1 sec βιομάζας είναι:

39,60 mol O_2 για την πλήρη καύση του εισερχόμενου άνθρακα + $52,80/4 = 13,20$ mol
 O_2 για την πλήρη καύση του εισερχόμενου υδρογόνου – $22,00/2 = 11,00$ mol O_2
που εισέρχονται με την πρώτη ύλη = 41,80 mol O_2 .

Στον αεριοποιητή εισέρχεται το 20 % του O_2 που απαιτείται για πλήρη καύση, δηλαδή:

$$0,20 \times 41,80 = 8,36 \text{ mol } O_2$$

τα οποία συνοδεύονται από:

$$8,36 \times 79/21 = 31,45 \text{ mol } N_2$$

Η επίλυση των ισοζυγίων μάζας του αεριοποιητή δίνει τη σύσταση του παραγόμενου αερίου:

είσοδος: 39,60 mol C

22,00 + 5,00 + 2 x 8,36 = 43,72 mol O

52,80 + 2 x 5,00 = 62,80 mol H

31,45 mol N₂

έξοδος: 100 gr υπόλειμμα ή 30 gr τέφρα

70 gr οργανικό μέρος

C 0,70*70 = 49,00 gr C ή 4,08 mol C

O 0,25*70 = 17,50 gr O ή 1,09 mol O

H 0,05*70 = 3,50 gr H ή 3,50 mol H

Αέριο 31,45 mol N₂

X mol H₂

Y mol CO

Z mol CO₂

W mol CH₄

οπότε: ισοζύγιο C Y + Z + W = 39,60 - 4,08 = 35,52 mol

ισοζύγιο H₂ X + 2 W = (62,80 - 3,50)/2 = 29,65 mol

ισοζύγιο O Y + 2 Z = 43,72 - 1,09 = 42,63 mol και

ισοζύγιο CH₄ W = 0,05 x (31,45 + X + Y + Z + W)

Από την τελευταία εξίσωση, με αντικατάσταση από την πρώτη:

W = 0,05 x (31,45 + 35,52 + X) ⇔ W = 3,35 + 0,05*X mol

αντικαθιστώντας στην 2η εξίσωση:

X + 6,70 + 0,1 X = 29,65 ⇔ 1,1 X = 22,95 ⇔ X = 20,86 mol

και: W = 3,35 + 0,05 x 20,86 = 4,39 mol

Αφαιρώντας την 1^η από την 3^η:

Z - W = 7,11 ⇔ Z = 11,50 mol

Λύνοντας την 1η:

Y + 11,50 + 4,39 = 35,52 ⇔ Y = 19,62 mol

Οπότε το παραγόμενο αέριο αποτελείται από:

	31,45 mol N ₂
	20,86 mol H ₂
	19,62 mol CO
	11,50 mol CO ₂ και
	<u>4,39 mol</u> CH ₄
ή	87,83 mol συνολικά

Το θερμικό περιεχόμενο (κατώτερη θερμογόνο δύναμη) του παραγόμενου αερίου,

ανά kg τροφοδοτούμενης, στον αεριοποιητή, βιομάζας, είναι:

$$n_{H_2} \times \Delta H_{\text{καυσής } H_2} = 20,86 \text{ mol } H_2 \times 241,8 \text{ kJ/mol} = 5.044,83 \text{ kJ}$$

$$n_{CO} \times \Delta H_{\text{καυσής } CO} = 19,62 \text{ mol } CO \times (393,5 - 110,5) \text{ kJ/mol} = 5.553,59 \text{ kJ}$$

$$n_{CH_4} \times \Delta H_{\text{καυσής } CH_4} = 4,39 \text{ mol } CH_4 \times (393,5 + 2 \times 241,8 - 74,5) \text{ kJ/mol} = \underline{3.525,82 \text{ kJ}}$$

14.124,24 kJ

(όπου **74,5 kJ/mol η ενθαλπία σχηματισμού του μεθανίου**). Ο όγκος, σε κανονικές συνθήκες, του αερίου που παράγεται από 1 kg βιομάζας, είναι: $87,83 \text{ mol} \times 22,4 \text{ lt/mol} = 1.967,46 \text{ lt} = 1,967 \text{ m}^3$

Οπότε η ενεργειακή πυκνότητα του παραγόμενου αερίου, είναι:

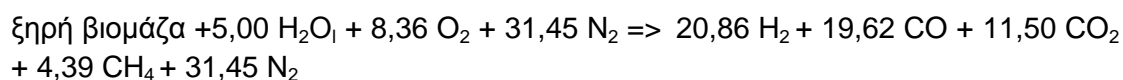
$$14.124,24 \text{ kJ} / 1,967 \text{ m}^3 = 7.178,91 \text{ kJ} / \text{m}^3 = 1,179 \text{ MJ} / \text{m}^3$$

2.1.2 Το ενεργειακό ισοζύγιο του αεριοποιητή είναι (B):

Αισθητή θερμότητα που εισέρχεται με τα αντιδρώντα + θερμότητα που παράγεται από την αντίδραση + θερμότητα από την καύση του υπολείμματος – λανθάνουσα θερμότητα εισερχόμενης υγρασίας = αισθ. Θερμότητα που εξέρχεται με το παραγ. Αέριο.

Θεωρώντας ότι τόσο η βιομάζα όσο και το μέσο αεριοποίησης (αέρας) εισέρχονται στον αεριοποιητή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η **αισθητή θερμότητα** που εισέρχεται με τα αντιδρώντα είναι μηδέν.

Η θερμότητα που παράγεται από την αντίδραση:



στη βάση του 1 sec ή την τροφοδοσία 1 kg βιομάζας, είναι:

$$\text{θερμότητα αντίδρασης} = 19,62 \times \Delta H_{CO} + 11,50 \times \Delta H_{CO_2} + 4,39 \times \Delta H_{CH_4} - \Delta H_{\text{βιομάζας}} - 5,00 \times \Delta H_{H_2O_l} \quad (1)$$

Για τον υπολογισμό του $\Delta H_{\text{βιομάζας}}$ υπολογίζεται η ΑΘΔ:

$$ΑΘΔ = 33.890,4 \times 0,54 + 144.180,6 \times (0,06 - 0,40/8) = 19.742,62 \text{ kJ/kg ξηρής βιομάζας.}$$

Η κατά mol σύσταση της (στα 1000 gr ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας):

540 gr C	ή	45,00 mol C
400 gr O	ή	25,00 mol O
60 gr H	ή	60,00 mol H

Από την αντίδραση πλήρους καύσης 1000 gr (1 kg) ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας:



$$\text{οπότε: } \Delta H_{\text{βιομάζας}} = 45 \times 393,5 + 30 \times 285,8 - 19.742,62 = 6.538,88 \text{ kJ/kg}$$

Στη βάση 1 sec, στον αεριοποιητή τροφοδοτούνται 0,88 kg ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας και από την (1) προκύπτει:

$$\text{θερμότητα αντίδρασης} = 19,62 \times 110,5 + 11,50 \times 393,5 + 4,39 \times 74,5 - 0,88 \times 6.538,88 - 5,0 \times 241,8 = \mathbf{57,10 \text{ kJ}}$$

δηλαδή η αντίδραση της αεριοποίησης, στην περίπτωση αυτή είναι εξώθερμη. Η **θερμότητα που παράγεται από την καύση του υπολείμματος** είναι ίση με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του:

$$A\Theta\Delta_{\text{υπολείμματος}} = 33.890,4 \times 0,70 + 144.180,6 \times (0,05 - 0,25/8) = 26.426,7 \text{ kJ/kg υπολείμματος}$$

Υδρατμός που παράγεται από την καύση 1 kg (1000 gr) υπολείμματος:

1000 gr υπολείμματος περιέχουν 50 gr ατομικού υδρογόνου ή 25 mol H₂, που κατά την καύση τους δίνουν 25 mol υδρατμού.

Η λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης του οποίου είναι:

$$25 \text{ mol υδρατμού} \times 40,7 \text{ kJ/mol} = 1.017,5 \text{ kJ}$$

Οπότε η ΚΘΔ του υπολείμματος, είναι:

$$26.426,7 - 1.017,5 = 25.409,2 \text{ kJ/kg}$$

Το υπόλειμμα που παράγεται κατά την αεριοποίηση αντιστοιχεί στο 10 % κ.β. της τροφοδοσίας ξηρής βιομάζας (η έκταση της αεριοποίησης είναι 90 % κ.β.). Οπότε, ανά kg τροφοδοτούμενης βιομάζας (ή στη βάση 1 sec), το υπόλειμμα που παράγεται είναι 0,1 kg από τα οποία 0,03 kg είναι τέφρα με μηδενική θερμογόνο δύναμη και τα 0,07 kg οργανικό μέρος. Η θερμότητα από την καύση του τελευταίου είναι:

$$0,07 \text{ kg} \times 25.409,2 \text{ kJ/kg} = \mathbf{1.778,64 \text{ kJ}}$$

Η **λανθάνουσα θερμότητα της εισερχόμενης υγρασίας**, στη βάση 1 sec (ή 1 kg βιομάζας), είναι:

$$5,00 \text{ mol H}_2\text{O} / \text{sec} \times 40,7 \text{ kJ/mol} = 203,50 \text{ kJ/sec}$$

Έτσι, το ισοζύγιο ενέργειας του αεριοποιητή, στη βάση ενός sec, γίνεται ($c_p^{\text{CH}_4} = 0,022 + 4,81 \times 10^{-5} \times T$):

αισθ. Θερμότητα που εξέρχεται με = $0,00 + 57,10 + 1.778,64 - 203,50 = 1.632,25 \text{ kJ}$
 \Leftrightarrow το παραγ. αέριο

$$\Leftrightarrow 11,50 \times [0,043 \times (T - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (T^2 - 298^2)] + \\ + 19,62 \times [0,028 \times (T - 298) + (5,02/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\ + 20,86 \times [0,028 \times (T - 298) + (3,39/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\ + 31,45 \times [0,027 \times (T - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\ + 4,39 \times [0,022 \times (T - 298) + (4,81/2) \times 10^{-5} \times (T^2 - 298^2)] = 1.632,25 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 0,49 \times (T - 298) + 6,61 \times 10^{-5} \times (T^2 - 88804) + \\ + 0,55 \times (T - 298) + 49,25 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) \\ + 0,58 \times (T - 298) + 35,36 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) \\ + 0,85 \times (T - 298) + 65,73 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) \\ + 0,10 \times (T - 298) + 10,56 \times 10^{-5} \times (T^2 - 88804) = 1.632,25 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 2,57 \times (T - 298) + 322,20 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) = 1.6332,25 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 2,57 \times T - 766,95 + 322,20 \times 10^{-6} \times T^2 - 28,60 = 1.632,25 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 322,20 \times 10^{-6} \times T^2 + 2,57 \times T - 2.427,80 = 0$$

Οπότε:

$$T = (-2,57 \pm (2,57^2 + 4 \times 322,20 \times 10^{-6} \times 2.427,8)^{1/2}) / (2 \times 322,2 \times 10^{-6}) = 853,4 \text{ K} \\ = 580,4 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2.1.3 Η ενεργειακή απόδοση της αεριοποίησης ορίζεται ως (Γ):

$$\text{Απόδοση} = (\text{ΚΘ}\Delta_{\text{αερίου}}) / (\text{ΚΘ}\Delta_{\text{βιομάζας που τροφοδοτείται στον αεριοποιητή}})$$

Η ΑΘΔ του ξηρού και ελεύθερου τέφρας μέρους της τροφοδοτούμενης βιομάζας είναι $0,88 \times 19.742,62 = 17.373,51 \text{ kJ}$ και η ΚΘΔ της τροφοδοτούμενης βιομάζας είναι:

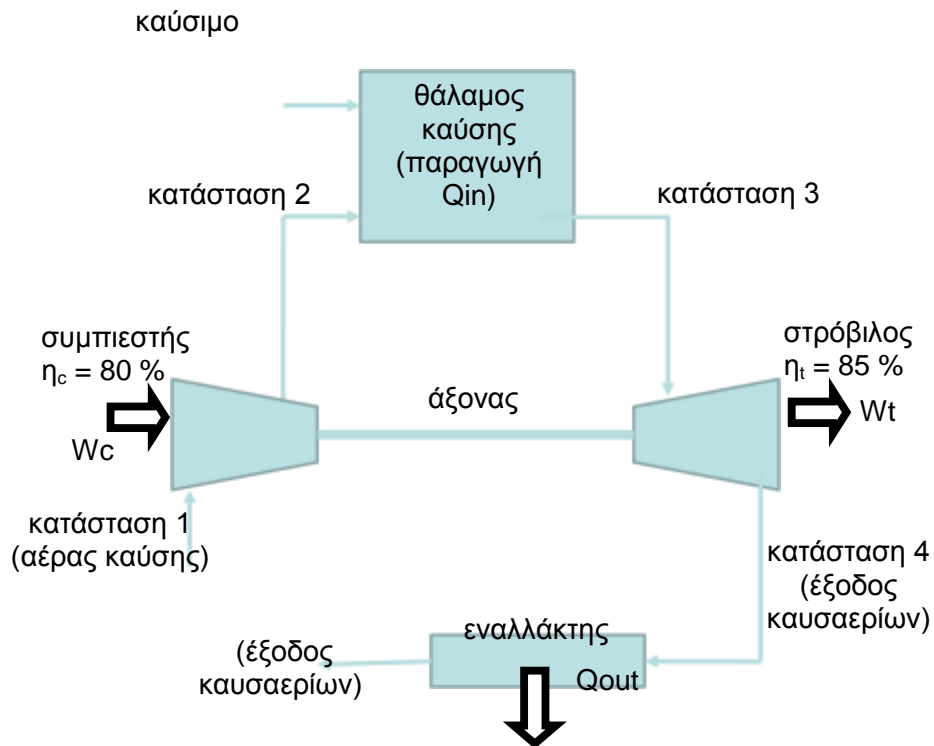
$$17.373,51 - (52,8/2 + 5,00) \times 40,7 = 16.095,53 \text{ kJ/kg}.$$

και:

$$\text{απόδοση αεριοποίησης} = 14.124,24 / 16.095,53 = 0,877 \text{ ή } 87,7 \text{ } \%$$

3. Ηλεκτροπαραγωγή σε θερμικές μηχανές Brayton

Η αεριοποίηση βιομάζας χρησιμοποιείται για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής / θερμικής ισχύος σε θερμικές μηχανές (κύκλους) Brayton (αεριοστροβίλους) ή σε συνδυασμένους κύκλους Brayton / Rankine (αεριοστροβίλου/ ατμοστροβίλου). Ο τυπικός κύκλος Brayton παρουσιάζεται στο Σχήμα που ακολουθεί:



Στον αεριοστρόβιλο (κύκλο Brayton) ο συμπιεστής (compressor) καταναλώνει έργο W_c και τροφοδοτεί τον θάλαμο καύσης με αέρα υπό υψηλή πίεση (P_2). Στον ίδιο θάλαμο τροφοδοτείται και το καύσιμο (το αέριο αεριοποίησης) και με την καύση που συμβαίνει εκεί (αλλά και λόγω της αισθητής θερμότητας του καυσίμου που ενδέχεται να βγαίνει θερμό απ τον αεριοποιητή) τα απαέρια της καύσης θερμαίνονται (πάντα υπό την πίεση που αναπτύσσει ο συμπιεστής – $P_3 = P_2$) και εκτονώνονται μέσω του στρόβιλου (turbine) παράγοντας έργο W_t . Μετά το στρόβιλο, τα απαέρια ψύχονται σε εναλλάκτη (αποδίδοντας το μεγαλύτερο μέρος της αισθητής τους θερμότητας για συμπαραγωγή ή για την επιπρόσθετη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κύκλο Rankine) και εξέρχονται στο περιβάλλον σε θερμοκρασία πάνω από $100\text{ }^\circ\text{C}$, ώστε να αποφεύγεται η συμπύκνωση των υδρατμών που περιέχουν. Το έργο που καταναλώνει ο συμπιεστής το λαμβάνει απευθείας από τον στρόβιλο, οπότε το καθαρό έργο που παράγει ο κύκλος Brayton είναι:

$$W_{net} = W_t - W_c \quad Q_{in}$$

Οι πιέσεις που αναπτύσσει ο συμπιεστής κυμαίνονται συνήθως στο διάστημα $10 - 15\text{ atm}$ ($1000 - 1500\text{ kPa}$), ενώ η μέγιστη θερμοκρασία τροφοδοσίας των απαερίων (για λόγους αντοχής των υλικών) μπορεί να φθάσει ακόμη και τους $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Η περίσσεια αέρα που τροφοδοτείται στο θάλαμο καύσης καθορίζεται από την επιθυμητή θερμοκρασία των απαερίων που τροφοδοτούνται στον στρόβιλο. Η περίσσεια αυτή είναι συνήθως μεγάλη, οπότε **η σύσταση των απαερίων θεωρείται ταυτόσημη με αυτή του αέρα.**

3.1 Παράδειγμα

Το αέριο από τη διεργασία αεριοποίησης του προηγούμενου παραδείγματος, τροφοδοτείται σε αεριοστρόβιλο με απόδοση συμπίεστή 80 % και απόδοση στροβίλου 85 %, ο οποίος λειτουργεί στους 1400 °C. Να υπολογιστεί η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, η θερμότητα που διατίθεται για συμπαραγωγή από τον εναλλάκτη του κύκλου και η συνολική ηλεκτρική απόδοση και η απόδοση συμπαραγωγής της συνδυασμένης διεργασίας αεριοποίησης – αεριοστρόβιλου, αν η πίεση που αναπτύσσει ο συμπίεστής είναι 10 atm και η θερμοκρασία εξόδου των απαερίων από τον εναλλάκτη είναι 120 °C.

Λύση

3.1.1 Το ισοζύγιο ενέργειας του θαλάμου καύσης είναι:

αισθητή θερμότητα αερίου αεριοποίησης	αισθητή θερμότητα + αέρα καύσης	θερμότητα που αισθητή + παράγεται από την= θερμότητα καύση του αερίου απαερίων
---	---------------------------------------	--

Η ειδική αισθητή θερμότητα του αέρα καύσης υπολογίζεται από τα δεδομένα του αεριοστρόβιλου.

Κατάσταση 1: $T_1 = 298 \text{ K} \Rightarrow h_1 = 298,2 \text{ kJ/kg}$
 $Pr_1 = 1,354$

Κατάσταση 2: $Pr_2 = 10 \times 1,354 = 13,54 \Rightarrow h_2 = 576,0 \text{ kJ/kg}$

Οπότε το ιδανικό ειδικό έργο που καταναλώνεται στο συμπίεστή, είναι:

$w_{c, \text{ideal}} = h_2 - h_1 = 576,0 \text{ kJ/kg} - 298,2 \text{ kJ/kg} = 277,8 \text{ kJ/kg}$
ενώ λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση του συμπίεστή:

$w_c = w_{c, \text{ideal}} / 0,80 = 347,25 \text{ kJ/kg}$

Η μη ιδανική λειτουργία του συμπίεστή (απόδοση 80 %) αυξάνει τη θερμοκρασία και την ειδική ενθαλπία στην Κατάσταση 2:

$w_c = h_{2, \text{πραγματική}} - h_1 \Rightarrow h_{2, \text{πραγματική}} = 298,2 + 347,25 = 645,45 \text{ kJ/kg}$

Έχοντας θεωρήσει ως θερμοκρασία αναφοράς τους 25 °C (298 K) για τον υπολογισμό της αισθητής θερμότητας του αερίου αεριοποίησης, η ειδική (ανά μονάδα μάζας) αισθητή θερμότητα του αέρα καύσης είναι:

Ειδική αισθητή θερμότητα αέρα καύσης = ειδική ενθαλπία του αέρα που εισέρχεται στον καυστήρα - ειδική ενθαλπία του αέρα στους 25 °C = 645,45 – 298,2 = 347,25 kJ/kg.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω τιμή είναι ανά kg αέρα καύσης στον αεριοστρόβιλο και όχι ανά kg βιομάζας που τροφοδοτείται στον αεριοποιητή. Έτσι, αν

ανά kg βιομάζας στον αεριοποιητή τροφοδοτούνται X mol O₂ και 79/21*X = 3,76*X mol N₂ δηλαδή 4,76*X mole αέρα ή 4,76*X*0,029 kg αέρα (όπου 0,029 kg = 29 gr το μοριακό βάρος του αέρα – 0,79*28 + 0,21*32 = 29 gr/mol), τότε η **αισθητή θερμότητα του αέρα καύσης** είναι:

- αισθητή θερμότητα αέρα καύσης = (4,76*X*0,029)*347,25 = 47,93*X kJ/kg βιομάζας.

Η **αισθητή θερμότητα του αερίου αεριοποίησης** είναι 1.632,25 kJ ανά kg εισερχόμενης βιομάζας ή ανά sec.

Έστω ότι η καύση πραγματοποιείται με την παροχή X mol O₂ και 79/21 x X = 3,76 x X mol N₂, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η απαραίτητη περίσσεια αέρα, προκειμένου ο αεριοστρόβιλος να λειτουργεί στους 1400 °C. Έτσι η αντίδραση που συμβαίνει στον θάλαμο καύσης είναι:

Καύσιμο (αέριο αεριοπ.)	Αέρας καύσης	απαέρια	-
20,86 H ₂		(20,86 + 2*4,39) H ₂ O	= 29,64 H ₂ O
19,62 CO		(19,62 + 4,39 + 11,50) CO ₂	= 35,51 CO ₂
11,50 CO ₂	+ X O ₂ 3,76 X N ₂	(X – 2*4,39 – 19,62/2 – 20,86/2) O ₂	= (X – 29,02) O ₂
4,39 CH ₄		(31,45 + 3,76 X) N ₂	= (31,45 + 3,76 X) N ₂
31,45 N ₂			

και η **θερμότητα που παράγεται από την καύση του αερίου** είναι 14.124,24 kJ.

Οπότε, η αισθητή θερμότητα που περιέχεται στα απαέρια, ανά kg τροφοδοτούμενης βιομάζας είναι:

$$1.632,25 + 14.124,24 + 47,93*X = 35,51 \times [0,043 \times (T - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (T^2 - 298^2)] + (31,45 + 3,76 X) \times [0,027 \times (T - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + (X - 29,02) \times [0,035 \times (T - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + 29,64 \times [0,034 \times (T - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (T^2 - 298^2)]$$

και θεωρώντας θερμοκρασία απαερίων 1400 °C:

$$15.756,49 + 47,93 X = 35,51 \times [0,043 \times (1673 - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (1673^2 - 298^2)] + (31,45 + 3,76 X) \times [0,027 \times (1673 - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (1673^2 - 298^2)] + (X - 29,02) \times [0,035 \times (1673 - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (1673^2 - 298^2)] + 29,64 \times [0,034 \times (1673 - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (1673^2 - 298^2)] = 35,51 \times [0,043 \times 1.375 + (1,15/2) \times 10^{-5} \times 2.710.125] + (31,45 + 3,76 X) \times [0,027 \times 1.375 + (4,18/2) \times 10^{-6} \times 2.710.125] + (X - 29,02) \times [0,035 \times 1.375 + (1,08/2) \times 10^{-6} \times 2.710.125] + 29,64 \times [0,034 \times 1.375 + (6,28/2) \times 10^{-7} \times 2.710.125] = 3.970,44 + 210,48 X \Leftrightarrow 11.786,05 = 162,55*X \Leftrightarrow X = 73,51 \text{ mol}$$

3.1.2 Έτσι, η συνολική ποσότητα των απαερίων που τροφοδοτούνται στον στρόβιλο του κύκλου Brayton, είναι:

$$29,64 \text{ mol H}_2\text{O} + 35,51 \text{ mol CO}_2 + 43,49 \text{ mol O}_2 + 304,08 \text{ mol N}_2 = 412,72 \text{ mol}$$

τα οποία προσομοιάζονται με 412,72 mol αέρα ή $412,72/29 = 14,23 \text{ kg}$ αέρα.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται στο στρόβιλο υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Κατάσταση 1: } T_1 = 298 \text{ K} \Rightarrow H_1 = 298,2 \text{ kJ/kg} \times 14,23 \text{ kg} = 4.243,94 \text{ kJ} \\ Pr_1 = 1,354$$

όπου 298,2 kJ/kg και 1,354 η ειδική ενθαλπία και η ανηγμένη πίεση του αέρα στους 298 K.

$$\text{Κατάσταση 2: } Pr_2 = 10 \times 1,354 = 13,54 \Rightarrow H_2 = 575,6 \text{ kJ/kg} \times 14,23 \text{ kg} \\ = 8.191,85 \text{ kJ}$$

όπου 575,6 kJ/kg η ειδική ενθαλπία του αέρα στην κατάσταση 2.

$$\text{Κατάσταση 3: } T_3 = 1673 \text{ K} \Rightarrow H_3 = 1.846,9 \text{ kJ/kg} \times 14,23 \text{ kg} = 26.284,79 \text{ kJ} \\ Pr_3 = 957,2$$

όπου 1.846,9 kJ/kg και 957,2 η ειδική ενθαλπία και η ανηγμένη πίεση του αέρα στους 1673 K.

$$\text{Κατάσταση 4: } Pr_4 = (1/10) \times 957,2 = 95,7 \Rightarrow H_4 = 996,7 \text{ kJ/kg} \times 14,23 \text{ kg} = \\ 14.184,88 \text{ kJ}$$

όπου 996,7 kJ/kg η ειδική ενθαλπία του αέρα στην κατάσταση 4.

Οπότε το ιδανικό έργο που καταναλώνεται στο συμπιεστή και παράγεται στο στρόβιλο, είναι:

$$W_c, \text{ ideal} = H_2 - H_1 = 8.191,85 \text{ kJ} - 4.243,94 \text{ kJ} = 3.947,91 \text{ kJ} \quad \text{και}$$

$$W_t, \text{ ideal} = H_3 - H_4 = 26.284,79 \text{ kJ} - 14.184,88 \text{ kJ} = 12.099,91 \text{ kJ}$$

ενώ λαμβάνοντας υπόψη τις αποδόσεις του συμπιεστή και του στροβίλου:

$$W_c = W_c, \text{ ideal} / 0,80 = 4.934,89 \text{ kJ} \quad \text{και}$$

$$W_t = 0,85 \times W_t, \text{ ideal} = 10.284,92 \text{ kJ}$$

Η μη ιδανική λειτουργία του στροβίλου (απόδοση 85 %) αυξάνει τη θερμοκρασία (και την ενθαλπία) εξόδου των απαερίων (Κατάσταση 4):

$$W_t = H_3 - H_{4, \text{πραγματική}} \Leftrightarrow H_{4, \text{πραγματική}} = 26.284,92 - 10.284,92 = 15.999,86 \text{ kJ}$$

Το ενθαλπικό (θερμικό) περιεχόμενο του αέρα που εξέρχεται από τον εναλλάκτη είναι:

$$H_{\text{out}} = 393,9 \text{ kJ/kg} \times 14,23 \text{ kg} = 5.605,20 \text{ kJ}$$

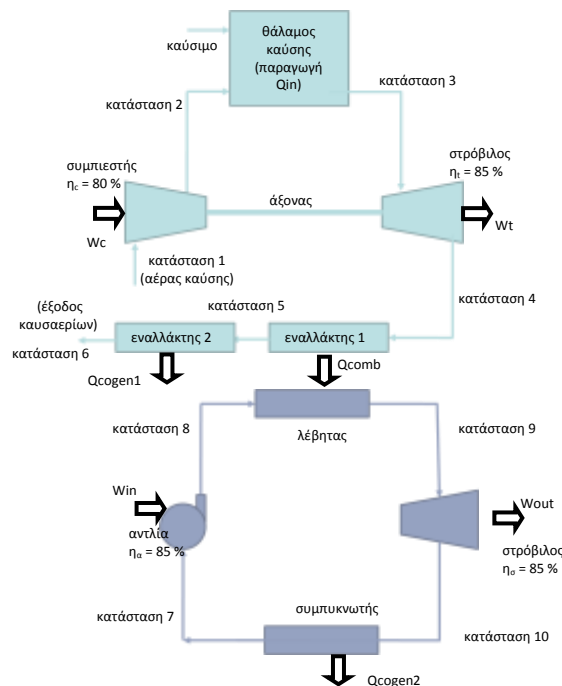
όπου $393,9 \text{ kJ/kg}$ η ειδική ενθαλπία του αέρα στους $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Οπότε:
 $Q_{out} = H_{4, \text{πραγματική}} - H_{out} = 15.999,86 - 5.605,20 = 10.394,67 \text{ kJ}$

Έτσι, με βάση υπολογισμών το 1 sec (1 kg βιομάζας στην είσοδο του αεριοποιητή):

- η ηλεκτρική παραγωγή είναι: $P_{el} = W_t - W_c = 10.284,92 - 4.934,89 = 5.350,03 \text{ kW}$
- η θερμική παραγωγή είναι: $P_{th} = Q_{out} = 10.394,67 \text{ kW}$
- η ηλεκτρική απόδοση της
- συνδυασμένης διεργασίας είναι: $\eta_{el} = P_{el} / K\Theta\Delta_{\text{βιομάζας}} = 5.350,03 / 16.095,53 = 33,2 \%$
- η θερμική απόδοση της
- συνδυασμένης διεργασίας είναι: $\eta_{th} = P_{th} / K\Theta\Delta_{\text{βιομάζας}} = 10.394,67 / 16.095,53 = 64,6 \%$
- και η απόδοση συμπαραγωγής της
- συνδυασμένης διεργασίας είναι: $\eta_{\text{cogeneration}} = \eta_{el} + \eta_{th} = 33,2 + 64,6 = 97,8 \%$

4. Ηλεκτροπαραγωγή σε συνδυασμένους κύκλους αεριο-ατμο-στροβίλου

Ο συνδυασμένος κύκλος αεριο-ατμο-στροβίλου αποτελείται από έναν κύκλο Brayton και έναν κύκλο Rankine, σε σειρά, όπου η θερμότητα που απορρίπτεται από τον εναλλάκτη του πρώτου χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή στον δεύτερο, όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Στην περίπτωση αυτή η θερμότητα που μεταφέρεται από τον Εναλλάκτη 1 του αεριοστροβίλου στο λέβητα του ατμοστροβίλου θα πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία που να επιτρέπει τη μεταφορά αυτή, δηλαδή υψηλότερη από τη θερμοκρασία με τη οποία εξέρχεται ο υπέρθερμος υδρατμός από τον λέβητα του ατμοστροβίλου. Στην πράξη η θερμοκρασία εξόδου των αερίων από τον εναλλάκτη 1 είναι περίπου 50 °C υψηλότερη από τη θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 9.

4.1 Παράδειγμα

Στο προηγούμενο παράδειγμα, αν η θερμότητα των απαερίων του από τον αεριοστρόβιλο χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή επιπρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας σε ατμοστρόβιλο, ο οποίος λειτουργεί με υπέρθερμο ατμό στους 600 °C και πίεση 30 MPa, να υπολογιστούν η ηλεκτρική και η θερμική παραγωγή, οι αποδόσεις σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια καθώς και η απόδοση συμπαραγωγής του συνδυασμένου κύκλου. Στον ατμοστρόβιλο, η απόδοση της αντλίας και του στροβίλου θεωρούνται ίσες με 85 % και η απόρριψη θερμότητας για συμπαραγωγή από τον συμπυκνωτή γίνεται στους 80 °C.

Λύση

Στην περίπτωση αυτή, η θερμοκρασία εξόδου των απαερίων του αεριοστροβίλου από τον εναλλάκτη 1 θα πρέπει να είναι 50 °C υψηλότερη από τη θερμοκρασία του υδρατμού στην έξοδο του λέβητα, δηλαδή 650 °C. Η ειδική ενθαλπία του αέρα στη θερμοκρασία αυτή είναι 659,84 kJ/kg και η ενθαλπία του ρεύματος 5 είναι:

$$H_5 = 14,23 \text{ kg} * 659,84 \text{ kJ/kg} = 9.390,74 \text{ kJ}$$

οπότε η θερμότητα που μεταφέρεται από τον αεριοστρόβιλο στον ατμοστρόβιλο είναι:

$$Q_{\text{comb}} = H_{4_{\text{πραγματική}}} - H_5 = 15.999,86 - 9.390,74 = 6.609,12 \text{ kJ}$$

και η παραγωγή θερμότητας από τον αεριοστρόβιλο είναι:

$$Q_{\text{cogen1}} = H_5 - H_6 = 9.390,74 - 5.605,20 = 3.785,54 \text{ kJ}$$

όπου 5.605,20 kJ η ενθαλπία του ρεύματος εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη 2, η οποία έχει υπολογιστεί στο προηγούμενο παράδειγμα. Η θερμότητα που αποδίδεται στον κύκλο Rankine χρησιμοποιείται για να παράγει υπέρθερμο ατμό σε $T_9 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ και $P_9 = 30 \text{ MPa}$, από συμπιεσμένο νερό σε $P_8 = 30 \text{ MPa}$. Δεν είναι όμως γνωστή η θερμοκρασία της Κατάστασης 8 και υπολογίζεται ως εξής.

Αφού η απόρριψη θερμότητας για συμπαραγωγή γίνεται στους 80 °C η θερμοκρασία του συμπυκνωτή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 15 °C υψηλότερη, προκειμένου η μεταφορά θερμότητας να διευκολύνεται και να συμβαίνει με πρακτικά αξιοποιήσιμο ρυθμό. Η ειδική ενθαλπία του κορεσμένου νερού στην Κατάσταση 7 ($T_7 = 80 + 15 = 95 \text{ }^\circ\text{C}$ και $P_7 = 84,55 \text{ kPa}$) είναι 397,96 kJ/kg. Θεωρώντας το νερό πρακτικά ασυμπιέστο (ο ειδικός του όγκος δεν μεταβάλλεται από την Κατάσταση 7 στην Κατάσταση 8 και παραμένει σταθερός και ίσος με τον ειδικό όγκο στην Κατάσταση 7 – 0,001040 m³/kg), το ειδικό έργο που καταναλώνει η αντλία είναι:

$$w_{IN} = v \cdot \Delta P / 0,85 = 0,001040 \cdot (30.000 - 84,55) / 0,85 = 36,60 \text{ kJ/kg}$$

Με βάση την παραπάνω τιμή του πραγματικού ειδικού έργου, η πραγματική ειδική ενθαλπία στην Κατάσταση 8 είναι:

$$H_{8\text{πραγματική}} = h_7 + w_{IN} = 397,96 + 36,60 = 434,56 \text{ kJ/kg νερού}$$

Οπότε, η μαζική παροχή νερού/ατμού μέσω του λέβητα (και όλου του κύκλου Rankine) είναι:

$$M_{H_2O} = \frac{6.609,12 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}}{(3443,9 - 434,56) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2,196 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Η ειδική ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 9 είναι 3443,9 kJ/kg και η ειδική εντροπία 6,2331 kJ/kgK. Θεωρώντας ότι ο στρόβιλος λειτουργεί ιδανικά (ισεντροπικά) η ειδική εντροπία του κορεσμένου μίγματος ατμού/νερού στην κατάσταση 10 (95 °C) θα πρέπει να είναι επίσης 6,2331 kJ/kgK. Η ειδική εντροπία του κορεσμένου ατμού και του κορεσμένου υγρού στη θερμοκρασία αυτή είναι αντίστοιχα 7,4159 kJ/kgK και 1,25 kJ/kgK. Οπότε η ποιότητα (το κλάσμα ατμού) του κορεσμένου μίγματος στην έξοδο του στρόβιλου και στην περίπτωση της ιδανικής λειτουργίας του είναι:

$$X = (6,2331 - 1,25) / (7,4159 - 1,25) = 0,81$$

και η ειδική του ενθαλπία:

$$h_{10} = 0,81 \cdot 2.668,1 + 0,19 \cdot 397,96 = 2.232,62 \text{ kJ/kg}$$

όπου 2.668,1 η ειδική ενθαλπία του κορεσμένου ατμού στην Κατάσταση 10. Το ηλεκτρικό έργο που αποδίδει ο στρόβιλος του κύκλου Rankine είναι:

$$W_{out} = \eta_{\sigma} \times M_{H_2O} \times (h_9 - h_{10}) = 0,85 \times 2,196 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (3.443,9 - 2.232,62) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2.261,19 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

και το έργο που καταναλώνει η αντλία:

$$W_{IN} = 2,196 \cdot 36,60 = 80,38 \text{ kJ/sec}$$

Οπότε η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον ατμοστρόβιλο είναι:

$$W_{el} = 2.261,19 - 80,38 = 2.180,80 \text{ kWe} = 2,181 \text{ MWe}$$

Η πραγματική ενθαλπία του ρεύματος εξόδου από τον στρόβιλο είναι:

$$H_{10\text{πραγματική}} = H_9 - W_{out} = 2,196 \cdot 3.443,9 - 2.180,80 = 5.382,70 \text{ kJ/sec}$$

ενώ η παραγωγή θερμότητας από τον συμπυκνωτή, είναι:

$$Q_{cogen2} = H_{10\text{πραγματική}} - M_{H_2O} \cdot h_7 = 5.382,70 - 2,196 \cdot 397,96 = 4.508,70 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

Έτσι, στον συνδυασμένο κύκλο αέριο-ατμο-στρόβιλου:

$$\text{η ηλεκτρική παραγωγή είναι: } P_{elcomb} = 5,350 + 2,261 = 7,611 \text{ MW}$$

$$\text{η θερμική παραγωγή είναι: } P_{thcomb} = 3,786 + 4,509 = 8,294 \text{ MW}$$

η ηλεκτρική απόδοση της συνδυασμένης διεργασίας είναι:

$$\eta_{elcomb} = P_{elcomb} / K\Theta\Delta_{\text{βιομάζας}} = 7,611 / 16,096 = 47,3 \%$$

η θερμική απόδοση της συνδυασμένης διεργασίας είναι:

$$\eta_{thcomb} = P_{thcomb} / K\Theta\Delta_{\text{βιομάζας}} = 8,294 / 16,096 = 51,5 \%$$

και η απόδοση συμπαραγωγής της συνδυασμένης διεργασίας είναι:

$$\eta_{\text{cogeneration comb}} = \eta_{elcomb} + \eta_{thcomb} = 47,3 + 51,5 = 98,8 \%$$

5. Οικονομικά της συμπαραγωγής από αεριοποίηση βιομάζας

Το κόστος εγκατάστασης μίας μονάδας ολοκληρωμένης μονάδας αεριοποίησης βιομάζας και συμπαραγωγής ηλεκτρικής θερμικής ισχύος σε συνδυασμένο κύκλο αέριο-ατμο-στροβίλου (Biomass Gasification Combined Cycle – BIGCC) δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Πάγια επένδυση: } \text{ΠΕ} = 7.675 - 1.235 \ln \Delta \quad [€/kWe]$$

όπου Δ η ονομαστική δυναμικότητα της μονάδας σε MWe, ενώ οι θέσεις εργασίας που δημιουργεί εκτιμάται σε 3 εργαζόμενους / MWe. Θεωρώντας μέσο ετήσιο κόστος ανά εργαζόμενο τα 20.000 € (περιλαμβανομένων των ασφαλιστικών εισφορών) το κόστος εργατικών εκτιμώνται στα 60.000 €/MWe. Αντίστοιχα, τα κόστη συντήρησης, διοίκησης, ασφάλειας, βοηθητικών κ.α. εκτιμώνται στα 2/3 του κόστους εργασίας, δηλαδή 40.000 €/MWe. Το επενδυτικό περιβάλλον στην Ελλάδα προβλέπει κρατική επιχορήγηση 40 % της αρχικής επένδυσης.

5.1 Παράδειγμα

Να εκτιμηθούν οι προοπτικές οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας συμπαραγωγής από αεριοποίηση – συνδυασμένο κύκλο των παραπάνω παραδειγμάτων, θεωρώντας ότι η βιομάζα (ενεργειακών καλλιεργειών) διατίθεται από τον παραγωγό στην τιμή των 50 €/tn.

Λύση

Η ετήσια λειτουργία της μονάδας απαιτεί:

$$1 \text{ (kg βιομάζας/sec)} \times 3600 \text{ (sec/h)} \times 24 \text{ (h/ημέρα)} \times 365 \text{ (ημέρες/έτος)} = 31536000 \text{ kg βιομάζας / έτος} = 31536 \text{ tn βιομάζας / έτος}$$

Θεωρώντας μέση παραγωγή βιομάζας 3 τν/στρ, για την τροφοδοσία της μονάδας απαιτούνται 10512 στρ. Έτσι, η τροφοδοσία της μονάδας θα προέρχεται, κατά προσέγγιση από μία ακτίνα 1829 μέτρων γύρω από τη μονάδα και το κόστος μεταφοράς της μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Οπότε το κόστος πρώτης ύλης είναι 1.576.800 €.

Η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή είναι:

$$7,611 \text{ MWe} \times 24 \text{ h/ημέρα} \times 365 \text{ ημέρες/έτος} = 66.672 \text{ MWh/έτος}$$

Η ετήσια παραγωγή θερμότητας είναι:

$$8,294 \text{ MWth} \times 24 \text{ h/ημέρα} \times 365 \text{ ημέρες/έτος} = 72.655 \text{ MWh/έτος}$$

Για ονομαστική ισχύ 7,5 MWe:

το κόστος εγκατάστασης είναι: $7.675 - 1.235 \ln 7,5 = 5.187 \text{ €/kWe}$ δηλαδή 38.899.461 €

από το οποίο η επιδότηση είναι 15.559.784 € και τα ίδια κεφάλαια είναι: 23.339.676 €

η απόσβεση είναι 10 % των ιδίων κεφαλαίων: 2.333.968 €

το κόστος εργασίας είναι: 60.000 €/MWe δηλαδή 450.000 €

τα λοιπά κόστη είναι: 40.000 €/MWe δηλαδή 300.000 €

οπότε η ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας δίνει:

πάγια επένδυση, € 38.899.461
ίδια συμμετοχή, € 23.339.676

έσοδα

έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας, €/έτος 10.000.854 (τιμή διάθεσης ηλεκτρικής MWh: 150€)

έσοδα θερμικής ενέργειας, €/έτος 1.453.109 (τιμή διάθεσης θερμικής MWh: 20 €)

σύνολο εσόδων, €/έτος 11.453.963

λειτουργικά έξοδα

πρώτη ύλη, €/έτος 1.576.800

εργασία, €/έτος 450.000

λοιπά, €/έτος 300.000

σύνολο λειτουργικών εξόδων, €/έτος 2.326.800

χρηματο-οικονομικά έξοδα

αποσβέσεις, €/έτος 2.333.968

σύνολο χρηματο-οικονομικών εξόδων, €/έτος 2.333.968

κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων	
EBTD, €/έτος	9.127.163
κέρδη προ φόρων (ΚΠΦ), €/έτος	6.793.195
καθαρά κέρδη, €/έτος	4.415.577 (αφαιρέθηκε φόρος 35 % επί των ΚΠΦ)

χρόνος αποπληρωμής ιδίων, έτη	5,3
χρόνος αποπληρωμής ιδίων	
με βάση το EBTD, έτη	2,6