



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας

Ενότητα 4(α) : Η βιομάζα ως καύσιμο

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 Βιομάζα	4
1.1 Θερμοχημική αξιοποίηση	4
1.2 Βιοχημική αξιοποίηση	5
1.3 Μετεστεροποίηση.....	5
1.4 Αλκοολική ζύμωση	5
2. Δυναμικό βιομάζας	7
2.1 Στην ΕΕ.....	8
2.2 Στην Ελλάδα	9
3. Ενεργειακές Καλλιέργειες	11
4. Η πρωτογενής βιομάζα ως καύσιμο.....	13
4.1 Παράδειγμα.....	15
4.2 Παράδειγμα.....	15
5. Κόστος συλλογής και μεταφοράς πρωτογενούς βιομάζας.....	16
5.1 Κόστος μεταφοράς	17
6. Καύση Βιομάζας	19
6.1 Τεχνολογίες καύσης στερεών καυσίμων.....	20
6.1.1 Καυστήρες σταθερής κλίνης:	20
6.1.2 Καυστήρες ρευστοστερεάς κλίνης	21
6.1.3 Καυστήρες σκόνης	22
6.2 Απόδοση καύσης	23
6.2.1 Παράδειγμα.....	25
6.2.2 Παράδειγμα.....	27
6.3 Ηλεκτροπαραγωγή σε θερμικές μηχανές Rankine	28
6.3.1 Παράδειγμα.....	29
6.4 Οικονομικά της συμπαραγωγής από βιομάζα.....	30
6.4.1 Παράδειγμα.....	31

1. Τι είναι η Βιομάζα

Ως Βιομάζα θεωρείται κάθε οργανική ύλη που είναι διαθέσιμη σε ανανεώσιμη βάση, περιλαμβανομένων των ενεργειακών καλλιεργειών, των υποπροϊόντων ή καταλοίπων των δασικών προϊόντων, των παραπροϊόντων ή των υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών, των ζωικών αποβλήτων, του οργανικού κλάσματος των αστικών απορριμμάτων και των υδρόβιων φυτών. Η βιομάζα είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί, όποια κατεργασία και αν υποστεί, κατά την καύση της, το διοξείδιο του άνθρακα που εκλύει είναι ακριβώς ίσο με το διοξείδιο του άνθρακα που δέσμευσε από την ατμόσφαιρα το φυτό για να αναπτυχθεί (το σύνολο του άνθρακα που περιέχει ένα φυτό προέρχεται από την ατμόσφαιρα). Ακόμη και η βιομάζα μη φυτική προέλευσης (ζωικά και αστικά απόβλητα) περιέχουν άνθρακα από το μεταβολισμό της φυτικής ύλης που κατανάλωσε ο οργανισμός ως τροφή. Από τα αστικά απορρίμματα βιομάζα θεωρούνται μόνο εκείνα φυτικής ή ζωικής προέλευσης (υπολείμματα τροφών, χαρτί, προϊόντα ξύλου). Ο όρος βιομάζα περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία πρώτων υλών, οι οποίες αξιοποιούνται ενεργειακά με μεγάλο πλήθος τεχνολογιών:

1.1 Θερμοχημική αξιοποίηση

- Τα αγροτικά υπολείμματα,
- Οι ενεργειακές καλλιέργειες,
- Τα δασικά υπολείμματα,
- Τα προϊόντα ανανεώσιμης υλοτομίας,
- Το οργανικό μέρος των απορριμμάτων,
- Η ξηρή ενεργός ύλη.

Είτε υπόκεινται σε καύση για την παραγωγή θερμότητας ή τη συμπαραγωγή σε αμοστροβίλους.

Είτε υπόκεινται σε αεριοποίηση και το παραγόμενο αέριο (αέριο σύνθεσης) τροφοδοτείται για συμπαραγωγή σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, σε αεριοστροβίλους, σε αμοστροβίλους ή συνδυασμένου κύκλου αεριο-αμοστροβίλων.

Υπόκεινται σε πυρόλυση σε υγρό βίο-έλαιο (ή βιο-αργό) το οποίο είτε καίγεται για την παραγωγή θερμότητας είτε τροφοδοτείται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης για συμπαραγωγή.

1.2 Βιοχημική αξιοποίηση

- Τα μη-ξυλώδη αγροτικά υπολείμματα,
- Οι μη-ξυλώδεις ενεργειακές καλλιέργειες,
- Τα αστικά απόβλητα (ενεργός ύλη),
- Τα ζωικά απόβλητα,
- Το οργανικό κλάσμα των αστικών απορριμμάτων.

Υφίστανται αναερόβια χώνευση προς βιοαέριο το οποίο καίγεται για συμπαραγωγή σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.

1.3 Μετεστεροποίηση

Τα φυτικά έλαια (ελαιούχοι σπόροι).

Υφίστανται μετεστεροποίηση προς βιοντίζελ και καίγονται ως καύσιμο κίνησης σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.

1.4 Αλκοολική ζύμωση

η σακχαρούχος πράσινη ύλη

Υφίστανται αλκοολική ζύμωση προς βιοαιθανόλη.

οι σακχαρούχοι ή οι αμυλούχοι σπόροι

>>

τα αγροτικά υπολείμματα

Υφίστανται διαδοχική υδρόλυση και αλκοολική ζύμωση προς βιοαιθανόλη.

οι ενεργειακές καλλιέργειες

>>

η σακχαρούχος πράσινη ύλη	Υφίστανται αλκοολική ζύμωση προς βιοαιθανόλη.
τα δασικά υπολείμματα	>>
τα προϊόντα ανανεώσιμης υλοτομίας	>>
Τα βιοκαύσιμα διακρίνονται σε στερεά:	Ξύλο, αγροτικά υπολείμματα, ενεργειακές καλλιέργειες, οργανικό κλάσμα απορριμμάτων.
υγρά:	βιο-έλαιο ή βιο-αργό βιοντίζελ βιο-αιθανόλη Fischer-Tropsch ντίζελ
και αέρια:	αέριο σύνθεσης βιο-αέριο

Το μέσο ενεργειακό περιεχόμενο των **ξηρών** στερεών βιομάζας (δασικά και αγροτικά υπολείμματα) είναι της τάξης των **16 - 22 MJ/kg ξηρής φυτικής ύλης**, ενώ το αντίστοιχο του ξηρού ορυκτού άνθρακα ανέρχεται σε ~27 MJ/kg και του αργού πετρελαίου σε ~30 MJ/kg. Ο λιγνίτης, ο οποίος κατά μέσο όρο περιέχει 50 % υγρασία και 10 – 20 % αδρανή, διαθέτει θερμογόνο δύναμη της τάξης των 5 MJ/kg.

Το **βιοντίζελ** (από τη μετεστεροποίηση φυτικών ελαίων) διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο (ΚΘΔ) της τάξης των 35 MJ/lt ή 40.000 MJ/tn (πυκνότητα βιοντίζελ 0,88 kg/lt) ή 0,95 τιπ/tn, σε σχέση με το ορυκτό ντίζελ το οποίο διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο της τάξης των 38 MJ/lt ή 44.000 MJ/tn (πυκνότητα 0,86 kg/lt) ή 1,05 τιπ/tn. Το **βιοέλαιο** (ή βιοπετρέλαιο από την πυρόλυση στερεών βιοκαύσιμων) διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο από 12 - 18 MJ/lt, ή 10.000 – 15.000 MJ/tn (πυκνότητα 1,2 kg/lt) ή 0,2 – 0,35 τιπ/tn. Η **βιοαιθανόλη** (από την αλκοολική ζύμωση σακχαρούχων, αμυλούχων και κυταρινούχων φυτικών υλών) διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο (ΚΘΔ) της τάξης των 20 MJ/lt ή 25.000 MJ/tn (πυκνότητα 0,79 kg/lt) ή 0,60 τιπ/tn, σε σχέση με τη βενζίνη η οποία διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο της τάξης των 32 MJ/lt ή 46.000 MJ/tn (πυκνότητα 0,69 kg/lt) ή 1,10 τιπ/tn.

Το **βιοαέριο** (από την αναερόβια ζύμωση ζωικών και αστικών αποβλήτων και φυτικών πρώτων υλών) διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο (ΚΘΔ) της τάξης των 22 MJ/m³ ή 6 kWh/m³ ή 0,50 τιπ/m³, σε σχέση με το φυσικό αέριο το οποίο διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο της τάξης των 37 MJ/m³ ή 10 kWh/m³ ή 0,90 τιπ/m³. Το **αέριο από την αεριοποίηση** στερεών βιοκαυσίμων διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο από 5 -20 MJ/m³, ανάλογα με το μέσο αεριοποίησης (αέρας < οξυγόνο < ατμό).

2. Δυναμικό βιομάζας

Η εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας είναι ένα περίπλοκο ζήτημα, το οποίο συμπυκνώνεται στο δίλημμα χρήσης γης για ενέργεια ή τροφή. Το δίλημμα αυτό επηρεάζεται από:

- την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού,
- την εξέλιξη των διατροφικών συνηθειών,
- τη διαθεσιμότητα νερού στις διάφορες περιοχές του πλανήτη, και
- την παραγωγικότητα της διατροφικής γεωργίας,
- τη γεωγραφική κατανομή της παραγωγής τροφής και τα οικονομικά του παγκόσμιου εμπορίου.

ενώ η αύξηση της παραγωγής βιοενέργειας έχει τα πλεονεκτήματα:

- του περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου και της αναστολής υπερθέρμανσης του πλανήτη,
- της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε τοπικό/εθνικό επίπεδο,
- της εξισορρόπησης του ισοζυγίου εισαγωγών/εξαγωγών με τον περιορισμό των εισαγωγών πετρελαίου και πιθανώς της αύξησης των εξαγωγών βιομάζας από χώρες με πλεόνασμα,
- την ενίσχυση τοπικών οικονομιών και της κοινωνικής/περιφερειακής συνοχής γιατί η παραγωγή ενέργειας από βιομάζα είναι έντασης εργασίας.

Στο πλαίσιο αυτό το παγκόσμιο τεχνικό δυναμικό βιομάζας εκτιμάται σήμερα ως εξής:

-	Min - max	ave
Ενεργειακές καλλιέργειες σε υφιστάμενη αγροτική γη	0 – 17.000 Mtoe	(2.000 – 8.000 Mtoe)
>> >> σε οριακή γη	1.500 – 2.500 Mtoe	
Αγροτικά υπολείμματα	500– 1.500 Mtoe	-
Ζωικά απόβλητα	100– 1.500 Mtoe	
Αστικά απόβλητα/απορρίμματα	100– 1.500 Mtoe	-
ΣΥΝΟΛΟ	2.700 – 24.000 Mtoe	(4.700 – 15.000 Mtoe)

Δηλαδή εκτιμάται περίπου στο **25 – 250 %** του παγκόσμιου ενεργειακού ισοζυγίου (με ποιο πιθανή εκτίμηση στο **50 – 150 %**). Το δυναμικό αυτό διαρθρώνεται γεωγραφικά ως εξής:

		Min - max	% ολ. βιομάζας
Ενεργειακές καλλιέργειες:	Κεντρική Αφρική	750 – 7.500	10 – 25
	Λ. Αμερική	1.200 – 5.250	15
	Ρωσία	1.100 – 4.500	15
	Β. Αμερική	500 – 4.000	5 – 15
	Ωκεανία	900 – 2.500	5 – 15
	Ινδία και Α. Ανατολή	600 – 4.000	5 – 15
	Ευρώπη	200 – 1.400	3 – 5
	Β. Αφρική	50 – 750	1 – 2
Απορρίμματα/Υπολείμματα /Απόβλητα: (Mtoe)	Β. Αμερική	300 – 450	1 – 5
	Κεντρική Αφρική	350 – 450	1 – 5
	Λ. Αμερική	300 – 350	1 – 5
	Ινδία και Α. Ανατολή	400 – 500	2 – 5
	Ευρώπη	150 – 200	1 – 2
	Β. Αφρική	250 – 300	1 – 3
	Ρωσία	120 – 150	1 – 2
	Ωκεανία	50– 120	1

Από τη γεωγραφική αυτή κατανομή φαίνεται ότι οι ενεργειακές καλλιέργειες αναμένεται να αποτελέσουν το 60 – 75 % του παγκόσμιου δυναμικού βιομάζας και τα απορρίμματα/υπολείμματα και απόβλητα το 25 – 40 %. Από το δυναμικό, όμως, των ενεργειακών καλλιεργειών αυτό σε υφιστάμενες καλλιεργήσιμες εκτάσεις είναι και αυτό που τίθεται σε μεγαλύτερη αμφισβήτηση λόγω της έλλειψης τροφίμων που μπορεί να προκαλέσει. Το δυναμικό αυτό αφορά στο 85 % του συνολικού δυναμικού ενεργειακών καλλιεργειών.

2.1 Στην ΕΕ

Το τεχνικό δυναμικό βιομάζας κυμαίνεται από 350 – 1600 Mtoe (20 – 85 % του ενεργειακού της ισοζυγίου), από τα οποία 10 – 30 % αναμένεται να προέλθουν από απορρίμματα/υπολείμματα και απόβλητα (τα τελευταία αποτελούν το 8 – 10 % του

ενεργειακού της ισοζυγίου). Συγκεκριμένα:

ενεργειακές καλλιέργειες σε υφιστάμενη αγροτική γη	1200 Mtoe ή 65 % του Εν. Ισοζ.
ενεργειακές καλλιέργειες σε οριακές εκτάσεις	200 Mtoe ή 10 % του Εν. Ισοζ.
αγροτικά υπολείμματα / ζωικά απόβλητα	105 Mtoe ή 5 % του Εν. Ισοζ.
αστικά απορρίμματα	95 Mtoe ή 5 % του Εν. Ισοζ.
αστικά απόβλητα	5 Mtoe ή 0,2 % του Εν. Ισοζ.

2.2 Στην Ελλάδα

Η υποκατάσταση υφιστάμενων καλλιεργειών βιομηχανικών φυτών με παθητικά οικονομικά, από ενεργειακές καλλιέργειες με απόδοση 3 τν ξηρής βιομάζας /στρ / έτος, το δυναμικό βιομάζας που μπορεί να προκύψει είναι:

	έκταση, εκ. στρ	ξ. βιομ., εκ. τν/α	ενεργ. περ., Mtoe/a	% εθν. εν. ισοζ
βαμβάκι	3,7	11	4,5	13,0
καπνός	0,5	1,5	0,6	1,8
ζαχαρότευτλα	0,4	1,2	<u>0,5</u>	<u>1,5</u>
			=5,6 Mtoe/a	=16,3 %

Αν μάλιστα στις εκτάσεις αυτές προστεθούν και τα 9 εκ. στρ. δημητριακών, η επιπλέον ετήσια παραγωγή ξηρής βιομάζας θα είναι περίπου 27 εκ. τν ξ. βιομάζας / έτος, με ενεργειακό περιεχόμενο 10 Mtoe, το οποίο αντιστοιχεί στο 30 % του εθνικού ενεργειακού ισοζυγίου.

Οι οριακές εκτάσεις εκτιμώνται σε 4,5 εκ. στρ, οι οποίες μπορούν να αποδώσουν περίπου 9 εκ. τν ξηρή βιομάζα (θεωρώντας μέση απόδοση ενεργειακών καλλιεργειών σε οριακές εκτάσεις τους 2 τν ξηρής βιομάζας ανά στρέμμα) με θερμικό δυναμικό περίπου 3,5 Mtoe (10 % του ενεργειακού της ισοζυγίου).

Τα υπολείμματα υφιστάμενων καλλιεργειών, κατά είδος καλλιέργειας, ανέρχονται σε:

	Εκ. τν/έτος				% εθν. εν. ισοζ.
Άχυρο δημητριακ ών	2,0	x	0,4 toe/τν	=0,8 Mtoe/a	2,4
Κλαδέματα ελιάς	1,5	x	0,4 toe/τν	=0,6 Mtoe/a	1,8
Μίσχοι βαμβακιού	1,5	x	0,4 toe/τν	=0,6 Mtoe/a	1,8
Κλαδέματα δέντρων	0,8	x	0,4 toe/τν	=0,3 Mtoe/a	0,9
Κλαδέματα καλαμποκι ού	0,6	x	0,4 toe/τν	=0,2 Mtoe/a	0,6
Κλαδέματα αμπελλιού	0,5	x	0,4 toe/τν	= <u>0,2 Mtoe/a</u>	<u>0,6</u>
-	-	-	-	=2,7 Mtoe/a	=8,1 %

δηλαδή είναι σε θέση να καλύψουν περίπου το 8 % του εθνικού ενεργειακού ισοζυγίου (5 % αν δεν ληφθεί υπόψη το άχυρο δημητριακών και τα κλαδέματα καλαμποκιάς που χρησιμοποιούνται για ζωοτροφές).

Η στρεμματική απόδοση σε ξηρή βιομάζα των υφιστάμενων καλλιεργειών είναι:

Αραβόσιτος:	3.000	kg/στρ/ έτος	ή	1,20 τιπ /στρ/ έτος
Οπωροφόρα Δέντρα:	1.000	>>	>>	0,40 >>
Ρύζι:	400	>>	>>	0,16 >>
Αμπέλια:	200	>>	>>	0,08 >>
Δημητριακά:	150	>>	>>	0,06 >>
Ελιά:	150	>>	>>	0,06 >>
Βαμβάκι:	100	>>	>>	0,04 >>

Επίσης στην Ελλάδα εκτρέφονται:

	εκ. κεφάλια	στ. απόβ., εκ. τν / έτος	εν. περ., Mtoe/a	% του Εν. Ισοζ
βοοειδή	0,65	1,5	0,6	1,8
χοίροι	1,00	0,2	0,1	0,3
αιγοπρόβατα	14,0	1,3	<u>0,5</u>	<u>1,5</u>
			=1,2 Mtoe/a	=3,6 %

Τέλος, τα στερεά αστικά απορρίμματα (**2 kg/ ημέρα/ κάτοικο από τα οποία το 65 % είναι ανανεώσιμη οργανική ύλη, με σύσταση παραπλήσια της ξηρής βιομάζας**) στη χώρα ανέρχονται σε 7,5 εκ. τν /έτος με ενεργειακό περιεχόμενο 2 Mtoe/a (το οποίο αντιστοιχεί στο 1,5 % του εθνικού ενεργειακού ισοζυγίου), ενώ η παραγόμενη ενεργός ύλη ανέρχεται σε 0,3 εκ. τν / έτος με ενεργειακό περιεχόμενο 0,1 Mtoe/a (το οποίο αντιστοιχεί στο 0,3 % του εθνικού ενεργειακού ισοζυγίου).

Έτσι το ολικό τεχνικό δυναμικό βιομάζας στη χώρα μπορεί να ανέλθει σε:

ενεργειακές καλλιέργειες σε υφιστάμενη αγροτική γη

16 Mtoe ή 45 % του Εν. Ισοζ.

ενεργειακές καλλιέργειες σε οριακές εκτάσεις

3,5 Mtoe ή 10 % του Εν. Ισοζ.

αγροτικά υπολείμματα

2,7 Mtoe ή 8 % του Εν. Ισοζ.

ζωικά απόβλητα

1,2 Mtoe ή 3,6 % του Εν. Ισοζ.

αστικά απορρίμματα

2 Mtoe ή 5,5 % του Εν. Ισοζ.

αστικά απόβλητα

0,1 Mtoe ή 0,3 % του Εν. Ισοζ.

= 25 Mtoe ή 75 % του Εν. Ισοζ.

3. Ενεργειακές Καλλιέργειες

Οι ενεργειακές καλλιέργειες είναι καλλιέργειες που αποσκοπούν είτε στην παραγωγή ξηρής βιομάζας, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο (για την παραγωγή θερμότητας ή τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού/θερμότητας), είτε για την παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων (βιοντίζελ ή βιοαιθανόλης).

Οι κυριότερες ενεργειακές καλλιέργειες παραγωγής στερεών βιοκαυσίμων και οι μέσες στρεμματικές τους αποδόσεις σε ξηρή βιομάζα, είναι:

Ευκάλυπτος (δ)	3,5 τν/στρ/έτος	ή 1,40 τικ/ στρ/ έτος
Μουριά (δ)	3,5 >>	1,40 >>
Ψευδακακία (δ)	3,0 >>	1,20 >>
Καλάμι (π)	3,0 >>	1,20 >>
Σόργο (μ)	3,0 >>	1,20 >>
Μίσχανθος (π)	3,0 >>	1,20 >>
Αγριαγκινάρα (π)	3,0 >>	1,20 >>
Switchgrass (π)	2,5 >>	1,00 >>
Κενάφ (μ)	2,5 >>	1,00 >>
Ελαιοκράμβη (μ)	0,8 >>	0,30 >>

(δ: δενδρώδεις, π: πολυετείς, μ: μονοετείς).

Οι κυριότερες ενεργειακές καλλιέργειες παραγωγής βιοντίζελ, είναι:

	Σπόρος χγ /στρ	Έλαιο χγ /στρέμμα	βιοντίζελ ^ε , λτ /στρέμμα (πυκνότητα: 0,88 χγ/ λτ)
ελαιοκράμβη	100 – 300 ^α	36 - 150	40 - 170
ηλίανθος	100 – 200 ^β	36 - 75	40 - 85
σόγια	150 – 250 ^γ	25 - 50	30 - 55
βαμβάκι	100 – 150 ^δ	18 - 32	20 - 35

- α περιεκτικότητα σπόρου σε έλαιο 30 - 50 % κβ.
- β περιεκτικότητα σπόρου σε έλαιο 30 - 35 % κβ.
- γ περιεκτικότητα σπόρου σε έλαιο 15 - 20 % κβ.
- δ περιεκτικότητα σπόρου σε έλαιο 15 - 20 % κβ.
- ε η κατά βάρος μετατροπή του ελαίου σε βιοντίζελ είναι 1/1.

Οι κυριότερες ενεργειακές καλλιέργειες παραγωγής βιοαιθανόλης και οι μέσες στρεμματικές τους αποδόσεις σε βιοκαύσιμο, είναι:

- **Υδατανθρακικές πρώτες ύλες:**

	απόδοση	υδατάνθρακες	αιθανόλη	
	τν/στρ	%	λτ/τν	λτ/στρ
πατάτες	2,0	15 % (άμυλο)	100	200
τεύτλα	6,0	15 % (σάκχαρα)	100	600
ζαχαροκάλαμο	8,0	15 % (σάκχαρα)	80	640
γλυκό σόργο	0,4	70 % (σάκχαρα)	400	160
αραβόσιτος	0,4	65 % (άμυλο)	400	260
σιτάρι	0,2	65 % (άμυλο)	400	130
κριθάρι	0,2	65 % (άμυλο)	400	130

- **Λιγνοκυτταρινικές πρώτες ύλες:**

	ξηρό βάρος	αιθανόλη	
	τν/στρ	λτ/τν	λτ/στρ
αραβόσιτος (υπολ.)	2,00	250	500
σόργο (βλαστός)	3,00	250	750
άχυρο σιταριού	0,15	300	45
άχυρο κριθαριού	0,15	300	45

4. Η πρωτογενής βιομάζα ως καύσιμο

Η πρωτογενής στερεή βιομάζα (ξύλο, άχυρο, βλαστοί, φύλα, υπολείμματα βιομηχανίας ξύλου, χαρτιού και διατροφής, ζωικά και αστικά απόβλητα, οργανικό κλάσμα αστικών απορριμμάτων, στερεά ενεργού ιλύος – εξαίρεση αποτελούν τα έλαια για την παραγωγή βιοντίζελ και τα σάκχαρα/άμυλο για την παραγωγή

βιοαιθανόλης), αποτελείται:

από το οργανικό μέρος: 0,5 – 90 % κ.β.
το ανόργανο μέρος: 0,1 – 35 % κ.β. και
νερό: 99,5 – 10 % κ.β.

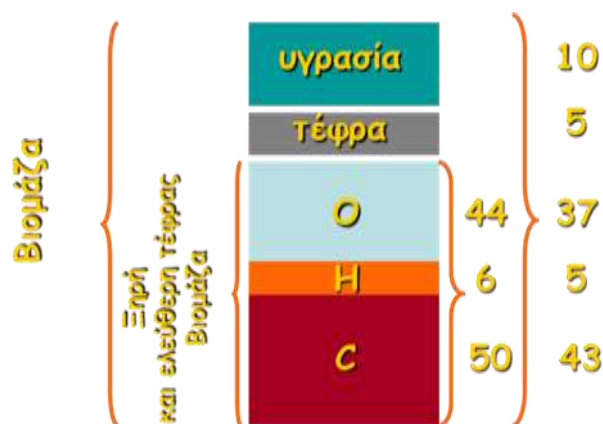
Ειδικά στη ξυλώδη, τη φυσικά ξηραμένη αγροτική βιομάζα, τα ξηρά ζωικά απόβλητα, το οργανικό κλάσμα αστικών απορριμμάτων και τα ξηρά στερεά ενεργού ιλύος, τα παραπάνω διαστήματα περιορίζονται σε:

οργανικό μέρος: 55 – 90 % κ.β.
το ανόργανο μέρος: 5 – 35 % κ.β. και
νερό: 10 – 60 % κ.β.

Το οργανικό μέρος της βιομάζας (η ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα) αποτελείται κυρίως από άνθρακα, οξυγόνο και υδρογόνο καθώς και μικρές ποσότητες αζώτου (0,3 – 0,5 % κ.β) και θείου (0,2 – 0,3 % κ.β.):

άνθρακας 45 – 60 % κ.β. τυπική τιμή: 50 % κ.β.
οξυγόνο 40 – 45% κ.β. τυπική τιμή: 44 % κ.β.
άνθρακας 5 – 7 % κ.β. τυπική τιμή: 6 % κ.β.

Η τυπική σύσταση της βιομάζας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Η Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ) της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ΑΘΔ = 33890,4 \times C + 144180,6 \times (H - O/8) \text{ kJ/kg}$$

Η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΚΘΔ) της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας υπολογίζεται από την ΑΘΔ αφαιρώντας τη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης του ατμού που παράγεται από την καύση (ο ατμός όταν υγροποιείται αποδίδει θερμότητα 40,7 kJ/mole ατμού).

4.1 Παράδειγμα

Να υπολογισθεί η ΑΘΔ και η ΚΘΔ της τυπικής βιομάζας. Η τυπική βιομάζα περιέχει 10 % κ.β. υγρασία, 5 % κ.β. τέφρα και 85 % κ.β. ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα. Η ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα τυπικά περιέχει 50 % κ.β. άνθρακα, 44 % κ.β. οξυγόνο και 6 % κ.β. υδρογόνο. Η ΑΘΔ της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας είναι:

$$ΑΘΔ = 33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,06 - 0,44/8) = 17.666 \text{ kJ/kg ξηρής βιομάζας}$$

Οπότε, η συγκεκριμένη βιομάζα έχει ΑΘΔ:

$$0,85 \text{ kg ξηρής βιομάζας/kg βιομάζας} \times 17.666 \text{ kJ/kg ξηρής βιομάζας} = 15.016 \text{ kJ/kg βιομάζας}$$

Το 1 kg βιομάζας (υγρή) περιέχει:

10 % υγρασία ή 100 γρ νερού ή $100/18 = 5,5$ mol νερού (18 gr/mol το ΜΒ του νερού) και 850 γρ ξ. βιομάζας x 6% κβ υδρογόνο = 51 γρ ατομικού υδρογόνου ή $51/2 = 25,5$ mol H_2

τα οποία κατά την καύση τους ($H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons H_2O$) παράγουν 25,5 mol νερού. Τα συνολικά mol ατμού που προκύπτουν μετά την καύση 1 kg βιομάζας είναι:

5,5 mol από την εξάτμιση της υγρασίας της βιομάζας και 25,5 mol από την καύση του υδρογόνου της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας

δηλαδή συνολικά $5,5 + 25,5 = 31$ mol ατμού, με συνολική λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης: $31 \text{ mol} \times 40,7 \text{ kJ/mol} = 1.262 \text{ kJ}$

Έτσι, η ΚΘΔ της συγκεκριμένης βιομάζας είναι:

$$ΚΘΔ = 15.016 \text{ kJ/kg βιομάζας} - 31 \text{ mol } H_2O/\text{kg βιομάζας} \times 40,7 \text{ kJ/mol } H_2O \\ = 13.754 \text{ kJ/kg βιομάζας}$$

4.2 Παράδειγμα

Να υπολογισθεί η θερμότητα σχηματισμού του οργανικού μέρους (της ξηρής και ελεύθερης τέφρας – ξ. βιομάζας) της τυπικής βιομάζας. Δίνονται η ενθαλπία σχηματισμού του διοξειδίου του άνθρακα και του νερού 393,5 και 285,8 kJ/mol αντίστοιχα.

Λύση

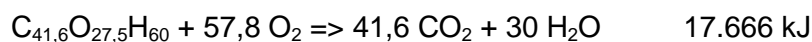
Η τυπική ξηρή και ελεύθερη τέφρας βιομάζα περιέχει 50 % κ.β. άνθρακα, 44 % κ.β. οξυγόνο και 6 % κ.β. υδρογόνο. Η ΑΘΔ της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας είναι:

$$ΑΘΔ = 33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,06 - 0,44/8) = 17.666 \text{ kJ/kg ξ. βιομάζας}$$

Η ΑΘΔ είναι ίση με τη θερμότητα που εκλύεται κατά την πλήρη καύση 1 kg ξ. βιομάζας. 1 kg ξ. βιομάζας περιέχει:

500 gr C	ή	41,6 mol C
440 gr O	ή	27,5 mol O
60 gr H	ή	60 mol H

Οπότε η αντίδραση καύσης 1 kg ξ. βιομάζας μπορεί να γραφτεί ως εξής:



Η θερμότητα που εκλύεται από την παραπάνω αντίδραση είναι:

$$17.666 = 41,6 \Delta H_{CO_2} + 30 \Delta H_{H_2O} - \Delta H_{\xi, \text{βιομάζας}}$$

$$\text{και } \Delta H_{\xi, \text{βιομάζας}} = 41,6 \cdot 393,5 + 30 \cdot 285,8 - 17.666 = 7.277,6 \text{ kJ/kg.}$$

5. Κόστος συλλογής και μεταφοράς πρωτογενούς βιομάζας

Με εξαίρεση τα απορρίμματα και την ύλη (για το οποία υφίστανται ήδη εκτεταμένα δίκτυα συλλογής και μεταφοράς τους), το υψηλό κόστος συλλογής και μεταφοράς:

- αγροτικών παραπροϊόντων
- εσοδειών ενεργειακών καλλιεργειών και
- προϊόντων υλοτομίας

αποτελεί έναν από τους κυριότερους ανασταλτικούς λόγους επέκτασης της ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας. Το κόστος συλλογής, ουσιαστικά αφορά την τιμή πώλησης της πρωτογενούς βιομάζας από τον παραγωγό (γεωργό ή υλοτόμο) και περιλαμβάνει τόσο τα καλλιεργητικά κόστη (στην περίπτωση της αγροτικής βιομάζας) όσο και το κέρδος του παραγωγού από την παραγωγή και διάθεση της.

Όσον αφορά στο κόστος οδικής μεταφοράς (για μικρές και μέσες αποστάσεις και όχι διεθνές εμπόριο), αυτό υπολογίζεται, κατά μέσο όρο, ως εξής:

Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού	40	τόνοι
Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού	130	m ³
Μέση ταχύτητα	65	Km/h
Χρήση καυσίμου (Diesel)	45	L/100 km
Κόστος καυσίμου	1,5	€/lt
<u>Οδηγός + συντήρηση + απόσβεση φορτηγού + κέρδος</u>		<u>25 €/h</u>
Κόστος ανά km 1,06 €/km		

Το κόστος φόρτωσης και εκφόρτωσης είναι ευάλωτο σε διακυμάνσεις και υπολογίζεται με βάση τον όγκο σε περίπου 0,50 €/m³.

5.1 Κόστος μεταφοράς

Οι μορφές πρωτογενούς βιομάζας και οι ιδιότητες που επηρεάζουν το κόστος μεταφοράς τους είναι:

-	Φαινόμενη Πυκνότητα (kg/m ³)	Υγρασία (%)	ΚΘΔ (kWh/tn)	Πυκνότητα ενέργειας (kWh/m ³)
Ξύλο	250	10%	4000 – 5000	775 – 1190
Πριονίδι	200	10%	4000 – 5000	660 – 1000
Άχυρο	130	10%	4000 – 5000	430 – 650
Πελλέτες ξύλου	650	10%	4000 – 5000	2860 - 3250
Πελλέτες άχυρου	600	10%	4000 – 5000	2650 - 3000

Οπότε, το κόστος μεταφοράς για το **ξύλο** (φαινόμενη πυκνότητα 0,25 tn/m³), υπολογίζεται ως εξής:

Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 40 τόνοι ή 160 m³
 Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 130 m³ ή 32,5 τόνοι
 Κόστος φορτο-εκφόρτωσης: 65 €
 Κόστος μεταφοράς σε 100 km με επιστροφή: 212 € άρα 277 €

ή $277/32,5 = 8,5 \text{ €/tn}/100 \text{ χλμ}$ (1,7 – 2,1 €/MWh/100 χλμ). Για **πριονίδι** (φ. πυκνότητα 0,20 tn/m³):

Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού: 40 τόνοι ή 200 m³
 Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 130 m³ ή 26 τόνοι

Κόστος φορτο-εκφόρτωσης: 65 €
 Κόστος μεταφοράς σε 100 km με επιστροφή 212 € άρα 277 €

ή $277/26 = 10,7 \text{ €/tn}/100 \text{ χλμ}$ (2,1 – 2,7 €/MWh/100 χλμ). Για **άχυρο** (φαινόμενη πυκνότητα 0,13 tn/m³):

Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 40 τόνοι ή 308 m³
 Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 130 m³ ή 16,9 τόνοι

Κόστος φορτο-εκφόρτωσης: 65 €
 Κόστος μεταφοράς σε 100 km με επιστροφή 212 € άρα 277 €

ή $277/16,9 = 16,4 \text{ €/tn}/100 \text{ χλμ}$ (3,3 – 4,1 €/MWh/100 χλμ). Για τις **πελλέτες ξύλου** (φ. πυκν. 0,65 tn/m³):

Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 40 τόνοι ή 62 m³
 Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού 130 m³ ή 84,5 τόνοι

Κόστος φορτο-εκφόρτωσης: 31 €
Κόστος μεταφοράς σε 100 km με επιστροφή 212 € άρα 243€

ή $243/40 = 6,1$ €/tn/100 χλμ (1,2 – 1,5 €/MWh/100 χλμ). Για τις **πελλέτες άχυρου** (φ. πυκν. $0,65$ tn/m³):

Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού	40	τόνοι	ή	65 m ³
Μέγιστη χωρητικότητα φορτηγού	130	m ³	ή	78 τόνοι

Κόστος φορτο-εκφόρτωσης: 32 €
Κόστος μεταφοράς σε 100 km με επιστροφή 212 € άρα 243 €

ή $243/40 = 6,1$ €/tn/100 χλμ (1,2 – 1,5 €/MWh/100 χλμ).

Έτσι, τα **καυσόξυλα** διατίθενται σήμερα στην αγορά προς 50 – 120 €/tn και θεωρώντας ότι η ΚΘΔ τους είναι της τάξης των 4 – 5 MWh/tn, το κόστος ενέργειας από καυσόξυλα ανέρχεται σε **10 – 30 €/MWh**, περιλαμβάνοντας στην παραπάνω τελική τιμή διάθεσης τους στον λιανικό καταναλωτή το κόστος παραγωγής τους (υλοτόμηση), το κόστος μεταφοράς τους σε μέσες αποστάσεις (έως 100 χλμ), ΦΠΑ 23 % και τα αντίστοιχα κέρδη (του υλοτόμου και του μεταφορέα).

Για σύγκριση, θεωρώντας τη μέση τιμή διάθεσης του **ντίζελ θέρμανσης** στην περιοχή των 1.000 €/m³ και ότι το θερμικό του περιεχόμενο ανέρχεται σε 10,5 MWh/m³, το κόστος θερμικής MWh από ντίζελ θέρμανσης κυμαίνεται στα **95 €/MWh**. Στις περιοχές που υπάρχει δίκτυο φυσικού αερίου, το κόστος της θερμικής MWh τιμολογείται δια νόμου 20 % φθηνότερα της θερμικής MWh από ντίζελ θέρμανσης, δηλαδή στην περιοχή των **76 €/MWh**.

Το **άχυρο των δημητριακών** (και του αραβόσιτου) χρησιμοποιείται σήμερα για ζωοτροφή και διατίθεται από τους παραγωγούς στο διάστημα τιμών 60 – 70 €/tn. Η μεταφορά κοστολογείται σε 16,4 €/tn/100 χλμ και προσθέτοντας ΦΠΑ 23 % το άχυρο μπορεί να φθάσει ως καύσιμο στον τελικό καταναλωτή σε τιμές της τάξης των 94 – 106 €/tn. Το θερμικό περιεχόμενο του άχυρου είναι 4 MWh/tn, οπότε το κόστος της θερμικής MWh από άχυρο αναμένεται να κυμαίνεται στο διάστημα **24 – 27 €/MWh**.

Αντίστροφα, για να είναι συμφέρουσα η χρήση της βιομάζας από ενεργειακές καλλιέργειες, ειδικά όσον αφορά στη χρήση της ως καύσιμο οικιακής θέρμανσης, θα πρέπει το κόστος της θερμικής MWh να είναι της τάξης των 95 €/MWh (η των 76 €/MWh στις περιοχές δικτύου Φ/Α). Θεωρώντας το θερμικό περιεχόμενο της βιομάζας ενεργειακών καλλιεργειών στις 4 – 5 MWh /tn, η τιμή που η βιομάζα θα φθάνει στον καταναλωτή θα πρέπει να κυμαίνεται στο διάστημα 380 – 475 €/tn (304 – 380 €/tn, στις περιοχές με φυσικό αέριο). Θεωρώντας επίσης ΦΠΑ 23 % και ότι το κόστος μεταφοράς της θα είναι παραπλήσιο με αυτό του άχυρου (16,4 €/tn/100 χλμ), η τιμή διάθεσης της βιομάζας των ενεργειακών καλλιεργειών από τον παραγωγό θα πρέπει να είναι 290 – 370 €/tn (230 – 290 €/tn, στις περιοχές με φυσικό αέριο). Τα οικονομικά των ενεργειακών καλλιεργειών φαίνονται στον Πίνακα 1, δείχνοντας ότι οι καλλιέργειες αυτές είναι ιδιαίτερα αποδοτικές, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μέγιστες οικονομικές αποδόσεις των δημητριακών και του βαμβακιού με δυσκολία αγγίζουν τα 100 €/στρ (συχνά είναι αρνητικές), ενώ η ιδιαίτερα κερδοφόρα καλλιέργεια της ελιάς παρουσιάζει κέρδη της τάξης των 200 €/στρ.

-	απόσβ . εγκ. φυτεία ς			ετήσια έξοδα			Σύνολο εξόδων		
	ελάχ	μέσο	μέγ	ελάχ	μέσο	μέγ	ελάχ	μέσο	μέγ
σόργο							88	136	161
κενάφ	-	-	-	-	-	-	160	-	170
αγριαγκινάρα		11,3			15,9		26,4	27,2	32,5
μίσχανθος	14,9	-	46,0	24,7	-	44,4	39,6	-	86,7
καλάμι	24,2	-	33,2	18,7	-	29,2	52,9	53,4	84
switchgrass	-	10,0	-	22,1	-	26,8	32,1	-	36,8
ιτιά	14,5	-	32,0	15,4	-	25,1	30,0	38,5	58,0
λεύκα	-	14,5	-	-	24,0	-	35,0	-	56,0
ακακία							35,0	50,0	63,0
ευκάλυπτος	-	-	-	-	-	-	35,0	43,0	56,0

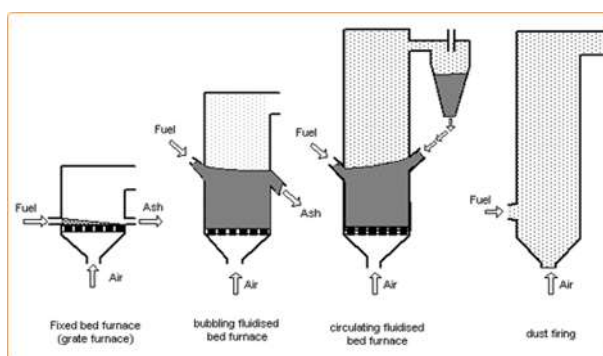
Η ΔΕΗ κοστολογεί την εξόρυξη λιγνίτη (θερμογόνο δύναμη 1,4 MWh/tn) στα 10 €/tn ή 7,1 €/MWh, ενώ διαθέτει την ηλεκτρική MWh στον τελικό καταναλωτή προς 54 € (το κόστος του λιγνίτη αποτελεί το 13 % του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο 87 % είναι τα λειτουργικά έξοδα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, του διοικητικού μηχανισμού της ΔΕΗ και του κέρδους της). Επίσης, 1 tn λιγνίτη εκλύει 0,5 tn CO₂, κατά την καύση του. Έτσι, με κόστος δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ τα 15 €/tn, το κόστος λιγνίτη αυξάνεται στα 25 €/tn ή 17,1 €/MWh (λαμβάνοντας υπόψη το κόστος δικαιωμάτων διοξειδίου, το κόστος του λιγνίτη αποτελεί το 32 % του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας). Θεωρώντας μέση ΚΘΔ της βιομάζας με 10 % υγρασία (όπως συλλέγεται από το χωράφι και φθάνει στον τελικό καταναλωτή), 4,5 MWh λtn, 1 tn βιομάζας μπορεί να υποκαταστήσει 4,5/1,4 = 3,2 tn λιγνίτη, κόστους 3,2*25 = 80,4 € (περιλαμβανομένων των δικαιωμάτων διοξειδίου). Αυτή είναι και η τιμή (80,4 €/tn βιομάζας) στην οποία η ΔΕΗ θα μπορούσε να προμηθεύεται βιομάζα ενεργειακών καλλιεργειών, χωρίς αυτό να έχει καμία επίπτωση στην τιμή που διαθέτει την ηλεκτρική ενέργεια στον τελικό καταναλωτή.

6. Καύση Βιομάζας

Είναι η πλέον διαδεδομένη διεργασία μετατροπής της βιομάζας σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια και αφορά στο 90 % της ενέργειας από βιομάζα παγκοσμίως. Σε σχέση με τις υπόλοιπες θερμοχημικές διεργασίες (αεριοποίηση και πυρόλυση) είναι η πλέον απλή και μπορεί εύκολα να ενταχθεί σε υπάρχουσες υποδομές παραγωγής και διανομής ενέργειας. Η έρευνα στον τομέα αυτό αφορά στην εξέλιξη της

τεχνολογίας, την αύξηση των αποδόσεων, την περικοπή του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας και τον περιορισμό της εκπομπής αερίων ρύπων, προκειμένου να παραμείνει ανταγωνιστική με τις ανερχόμενες τεχνολογίες της αεριοποίησης και της πυρόλυσης. Η συνδυασμένη καύση βιομάζας και ορυκτών ανθράκων αποτελεί εναλλακτική με υψηλές αποδόσεις και περιορισμού των εκλυόμενων ρύπων. Η καύση βιομάζας αποσκοπεί είτε στην παραγωγή θερμότητας (οικιακή ή βιομηχανική) σε λέβητες, είτε στην συμπαραγωγή ηλεκτρικής θερμικής ισχύος με τη χρήση ατμοστροβίλων (κύκλος Rankine).

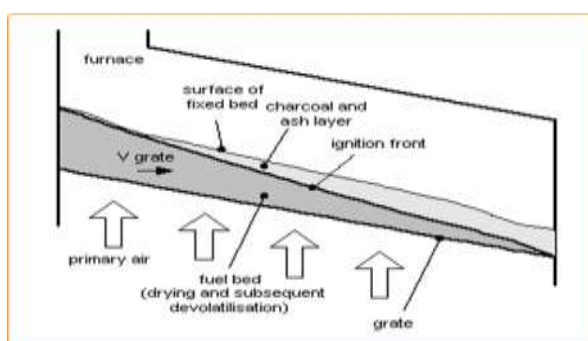
6.1 Τεχνολογίες καύσης στερεών καυσίμων



Οι τεχνολογίες καύσης στερεών βιοκαυσίμων (και καυσίμων) διακρίνονται σε αυτές σταθερής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης και καύση σκόνης.

6.1.1 Καυστήρες σταθερής κλίνης:

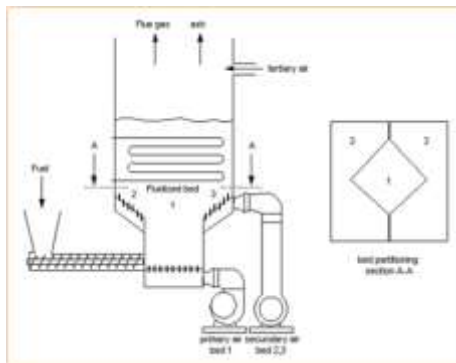
Το πρωτεύον ρεύμα αέρα διέρχεται μέσω της σταθερής κλίνης, στην οποία συμβαίνουν οι διεργασίες της ξήρανσης της πρώτης ύλης, της αεριοποίησης της και της καύσης του στερεού υπολείμματος (ξυλοκάρβουνο).



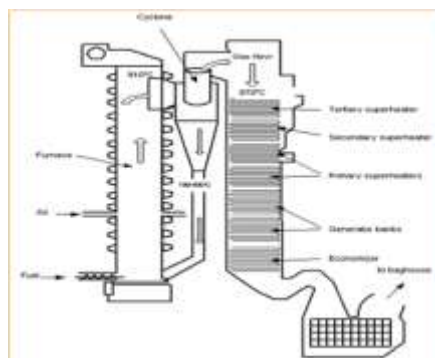
Τα καύσιμα αέρια από την αεριοποίηση καίγονται με την παροχή επιπλέον αέρα (δευτερεύον ρεύμα αέρα), το οποίο τροφοδοτείται πάνω από την κλίνη. Οι καυστήρες σχάρας είναι κατάλληλοι για πρώτες ύλες βιομάζας με υψηλή υγρασία, μεταβλητό μέγεθος των σωματιδίων καυσίμου και υψηλό ποσοστό στάχτης. Η ρύθμιση και ο σχεδιασμός αφορούν στην ομοιόμορφη κατανομή καυσίμου και χόβολης, και επάρκεια πρωτεύοντος αέρα σε όλη την έκταση της κλίνης. Κακός σχεδιασμός συνεπάγεται τήξη (πυρόλυση) των καυσίμων συστατικών, παραγωγή ιπτάμενων

στερεών και αύξηση της περισσειας O_2 για πλήρη καύση. Οικονομική και λειτουργικά ασφαλής τεχνολογία από μικρά / μέσα συστήματα έως 5 MWth. Κατάλληλοι για καύσιμα με χαμηλή συγκέντρωση σε στάχτη (ξύλο, πριονίδι, πελλέτες) και μικρά σωματίδια (έως 50 mm) - υψηλή συγκέντρωση σε στάχτη (φλοιοί, άχυρο, βλαστοί δημητριακών) απαιτεί αποτελεσματικότερα συστήματα απομάκρυνσης της. Ικανοποιητική λειτουργία σε συνθήκες υποτροφοδοσίας.

6.1.2 Καυστήρες ρευστοστερεάς κλίνης

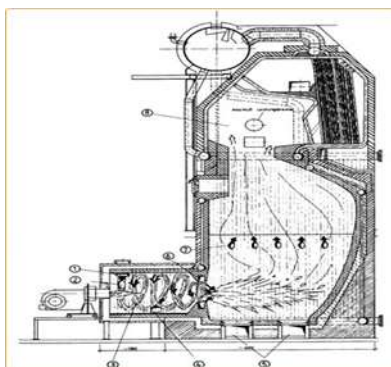


Αφορούν σε αυτο-αναμιγνυόμενο αιώρημα αερίου – στερεού κατά την τροφοδοσία πρωτεύοντος αέρα από το κάτω μέρος της κλίνης (η ταχύτητα του αέρα καύσης, για ρευστοαιώρηση της κλίνης κυμαίνεται 1,0 έως 2.5 m/s). Η κλίνη αποτελείται κατά 90 – 98 % από θερμό, αδρανές, κοκκώδες στερεό (πυριτική άμμος ή δολομίτης, διαμέτρου έως 1 mm). Η έντονη ανάδευση και μεταφορά θερμότητας, δημιουργεί συνθήκες πλήρους καύσης με χαμηλή περίσσεια αέρα. Η θερμοκρασία καύσης διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα (800-900°C) για την αποφυγή σχηματισμού πυροσυσσωματωμάτων, μέσω εσωτερικών εναλλακτών θερμότητας, ανακύκλωση των θερμών αερίων, ή την έκχυση νερού (στις μονάδες σταθερής κλίνης η θερμοκρασία είναι συνήθως 100 – 200 °C υψηλότερη). Λόγω της ανάμιξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μίγματα καυσίμου (π.χ. ξύλο και άχυρο, βιομάζα και άνθρακας), υφίστανται όμως περιορισμοί ως προς το μέγεθος των σωματιδίων και απαιτείται προ-κατεργασία καυσίμου. Εξαιτίας του υψηλού κόστους εγκατάστασης, είναι κατάλληλη για μονάδες πάνω από 20 MWth, ενώ μειονέκτημα τους αποτελεί η λειτουργία με μειωμένη τροφοδοσία βιομάζας (απαιτεί την απομάκρυνση μέρους της κλίνης).



Ειδική περίπτωση των καυστήρων ρευστοστερεάς κλίνης είναι οι καυστήρες ανακυκλούμενης κλίνης. Με αύξηση της ταχύτητας ρευστοαιώρησης σε 5 έως 10 m/s και χρήση μικρότερων σωματιδίων (0.2 to 0.4 mm) η κλίνη παρασύρεται από το αέριο ρεύμα τα σωματίδια συλλέγονται σε κυκλώνα και επανατροφοδοτούνται στην κλίνη. Η υψηλότερη τύρβη επιτρέπει την καλύτερη μεταφορά θερμότητας και την ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας σε όλη την έκταση της κλίνης. Μειονέκτημα το υψηλότερο κόστος, το οποίο καθιστά του καυστήρες αυτού του είδους οικονομικά βιώσιμους σε μονάδες άνω των 30 MWth.

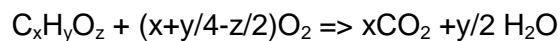
6.1.3 Καυστήρες σκόνης



Κατάλληλοι για καύσιμα διαθέσιμα σε μορφή σκόνης (> 2 mm –σκόνη από κοπή ξύλου). Τα σωματίδια ψεκάζονται με το ρεύμα πρωτεύοντος αέρα και υπάρχει η πιθανότητα δημιουργίας εκρηκτικών συνθηκών. Επιτυγχάνεται υψηλός ρυθμός έκλυσης θερμότητας και επιτρέπεται η εύκολη μεταβολή του φορτίου του καυστήρα. Χρησιμοποιείται σε μονάδες 2 έως 8 MW. Η στάχτη παρασύρεται και καθιζάνει σε θάλαμο μετά τον καυστήρα και η καύση πραγματοποιείται με χαμηλή περίσσεια αέρα ενώ επιτυγχάνεται και καλός έλεγχος χρόνου παραμονής καυσίμου.

6.2 Απόδοση καύσης

Η τέλεια (πλήρη) καύση της βιομάζας (αλλά και των ορυκτών στερεών καυσίμων), οδηγεί αποκλειστικά στην παραγωγή CO₂ (από την πλήρη καύση του στοιχειακού άνθρακα) και H₂O (από την πλήρη καύση του στοιχειακού υδρογόνου) – η καύση των μικρών ποσοτήτων θείου και αζώτου θεωρείται αμελητέα, στην ανάλυση που θα ακολουθήσει. Επίσης, θεωρητικά, για την πλήρη καύση της βιομάζας επαρκεί η τροφοδοσία του οξυγόνου που προβλέπεται από τη στοιχειομετρία της αντίστοιχης αντίδρασης:



όπου x, y, z η αναλογία moles (και όχι βάρους) στον ενδεικτικό μοριακό τύπο C_xH_yO_z της βιομάζας. Στην πράξη η καύση δεν είναι τέλεια (σχηματίζονται και μικρές ποσότητες CO) ακόμη και αν χρησιμοποιηθεί περίσσεια οξυγόνου, το οποίο δεν τροφοδοτείται στον καυστήρα καθαρό αλλά ως αέρας. Έτσι τα προϊόντα της καύσης (τα απαέρια του καυστήρα), εκτός από CO₂, H₂O και CO, περιέχουν το οξυγόνο που δεν αντέδρασε (την περίσσεια οξυγόνου) και το N₂ του αέρα που χρησιμοποιήθηκε για την καύση.

Η θερμότητα που παράγεται στον καυστήρα απομακρύνεται από αυτόν (και διοχετεύεται προς θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος) με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας. Ο εναλλάκτης τροφοδοτείται με τα θερμά απαέρια της καύσης και αποτελείται από σύστημα σωληνώσεων, στο εσωτερικό των οποίων ρέει το μέσο απαγωγής της θερμότητας τους (συνήθως νερό ή ατμός) – το σύστημα καυστήρα εναλλάκτη ονομάζεται λέβητας. Η θερμότητα μεταφέρεται από τα απαέρια της καύσης (τα οποία ψύχονται) προς το νερό ή τον ατμό.

Η απόδοση των λεβήτων δεν είναι 100 % (το σύστημα καυστήρα-εναλλάκτη δεν αποδίδει το σύνολο της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου στον τελικό καταναλωτή). Οι συνήθεις διεργασίες καύσης έχουν απόδοση από 10 % (ανοικτές εστίες, θερμάστρες, τζάκια) – 95 % (βιομηχανικοί λέβητες). Οι απώλειες θερμότητας από μία διεργασία καύσης αφορούν:

- στην αισθητή θερμότητα των απαερίων στην έξοδο του λέβητα – η απώλεια αυτές θα μπορούσαν να μηδενιστούν στην περίπτωση που τα απαέρια είχαν αποδώσει το σύνολο της αισθητής τους θερμότητας στο νερό ή τον ατμό του λέβητα, και εξέρχονταν από αυτόν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (συνήθως η θερμοκρασία εξόδου των απαερίων είναι πάνω από 100 °C, για την αποφυγή συμπύκνωσης του νερού στην καμινάδα),
- στη λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης (εξάτμισης του νερού) – το νερό εξέρχεται από τη διεργασία σε μορφή ατμού και σε μικρότερο βαθμό,
- στην κακή του μόνωση.

Έτσι το ισοζύγιο ενέργειας ενός καυστήρα είναι:

**αισθητή θερμότητα + θερμότητα που = αισθητή θερμότητα + λανθάνουσα +
ωφέλιμη στην είσοδο παράγεται στην έξοδο θερμότητα κατά την καύση.**

Η αισθητή θερμότητα μίας ουσίας (στερεής πχ βιομάζα ή τέφρα, υγρής πχ ενός υγρού καυσίμου ή του νερού, ή αέριας π.χ. των συστατικών του αερίου μίγματος των απαερίων της καύσης ή του αέρα που τροφοδοτείται στον καυστήρα) θεωρείται μηδέν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:

$$S_{th}^i = \int_{298}^T c_p^i dT$$

όπου c_p^i η θερμοχωρητικότητα της ουσίας i , η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και για τα βασικά συστατικά καύσης της βιομάζας είναι:

$$C_p^{O_2} = 0,035 + 1,08 \times 10^{-6} T - 785,3/T^2 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{N_2} = 0,027 + 4,18 \times 10^{-6} T \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{H_2} = 0,028 + 3,39 \times 10^{-6} T \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{CO_2} = 0,043 + 1,15 \times 10^{-5} T - 818,0/T^2 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{CO} = 0,028 + 5,02 \times 10^{-6} T \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{H_2O,g} = 0,034 + 6,28 \times 10^{-7} T + 5,4 \times 10^{-9} \times T^2 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{H_2O,l} = 0,075 \text{ kJ/degmol}$$

$$C_p^{\xi \text{ ηρης βιομάζας}} = 0,103 + 0,0039 T \text{ kJ/degkg}$$

Η θερμότητα που παράγεται από την καύση (η οποία είναι σε κάποιο ποσοστό ατελής – παράγεται μικρή ποσότητα CO) υπολογίζεται από τη διαφορά της ενθαλπίας σχηματισμού των προϊόντων και των αντιδρώντων. Η ενθαλπία σχηματισμού των συνήθων προϊόντων της καύσης είναι:

$$\Delta H_{CO_2}^{\circ} = 393,5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{CO}^{\circ} = 110,5 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{H_2O,l}^{\circ} = 285,8 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_{H_2O,g}^{\circ} = 241,8 \text{ kJ/mol}$$

ενώ για τα στοιχεία O_2 , H_2 και N_2 είναι μηδέν.

6.2.1 Παράδειγμα

Σε καυστήρα ρευστοστερεάς κλίνης εισέρχονται υπολείμματα κοπής ξύλου με στοιχειακή σύσταση:

C	36	
H	4	
O	32	
H ₂ O	25	
στάχτη	3	% kg/kg

και με ρυθμό 1 kg/s. Τα απαέρια εξέρχονται σε θερμοκρασία 150 °C και περιέχουν 1 % CO. Θεωρώντας 25 % περίσσεια αέρα, στην τροφοδοσία, να υπολογιστεί η ωφέλιμη θερμότητα και η απόδοση του καυστήρα ως προς την ΑΘΔ και την ΚΘΔ της τροφοδοσίας.

Λύση

Ισοζύγιο Θερμότητας: θερμότητα που παράγεται θερμότητα κατά την καύση = ωφέλιμη + λανθάνουσα + απώλειες

Η θερμότητα που παράγεται κατά την καύση μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά της ενθαλπίας των προϊόντων της αντίδρασης μείον την ενθαλπία των αντιδρώντων (βιομάζα και αέρας). Για το λόγω αυτό αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η ενθαλπία σχηματισμού της βιομάζας από την Α.Θ.Δ. της:

$$A\Theta\Delta = 33.890,4 \times C + 144.180,6 \times \left(H - \frac{O}{8}\right) \text{ kJ/kg}$$

Η στοιχειακή σύσταση της ξηρής βιομάζας είναι:

$$C : 36 / (36 + 4 + 32) = 36 / 72 = 0,500 \text{ ή } 50,0 \%$$

$$H : 4 / 72 = 0,055 \text{ ή } 5,5 \%$$

$$O : 32 / 72 = 0,444 \text{ ή } 44,4 \% \text{ κ.β.}$$

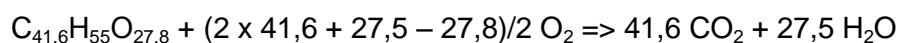
Οπότε η θερμογόνο δύναμη της ξηρής πρώτης ύλης είναι:

$$33.890,4 \times 0,5 + 144.180,6 \times (0,055 - 0,444/8) = 16.873 \text{ kJ/kg}$$

1 kg ξηρής βιομάζας περιέχει:

- 500 gr C ή 41,6 mol C
- 55 gr H ή 55 mol H και
- 444 gr O ή 27,8 mol O

Οπότε η στοιχειομετρία της αντίδρασης πλήρους καύσης, στη βάση του 1 kg ξηρής βιομάζας, είναι:



και το ισοζύγιο ενέργειας είναι: $16.873 = 41,6 \times 393,5 + 27,5 \times 285,8 - \Delta H_{\text{βιομάζας}}$

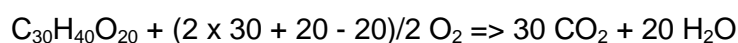
$$\text{Οπότε: } \Delta H_{\text{βιομάζας}} = 41,6 \times 393,5 + 27,5 \times 285,8 - 16.873 = 7.356,1 \text{ kJ/kg}$$

Για να υπολογιστεί η σύσταση των απαερίων, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η περίσσεια αέρα που χρησιμοποιείται. Ο στοιχειομετρικός αέρας που απαιτείται για πλήρη καύση, στη βάση 1 sec (1 kg τροφοδοσίας ή 720 gr ξηρής βιομάζας), υπολογίζεται ως εξής:

τα 720 gr ξηρής βιομάζας περιέχουν:

- 360 gr C ή 30 mol C
- 40 gr H ή 40 mol H και
- 320 gr O ή 20 mol O

οπότε, η στοιχειομετρία της πλήρους καύσης είναι:



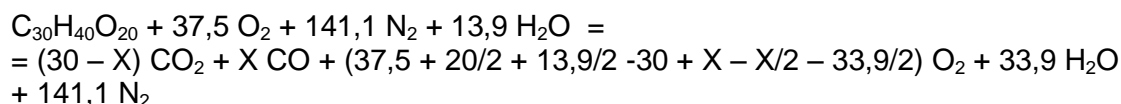
και το θεωρητικό O_2 που απαιτείται είναι 30 mol / sec. Η αντίστοιχη ποσότητα αέρα είναι:

$$30 \text{ mol O}_2 + 79/21 \times 30 \text{ mol N}_2 = 142,9 \text{ mol}$$

Για 25 % περίσσεια αέρα η συνολική ποσότητα αέρα που τροφοδοτείται είναι:

$$(1 + 0,25) \times 142,9 = 178,6 \text{ mol}$$

Με βάση τα παραπάνω, η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στον καυστήρα (στη βάση 1 sec) είναι:



Οπότε τα συνολικά mol στην έξοδο είναι:

$$30 - X + X + 7,5 + X/2 + 33,9 + 141,1 = 212,5 + X/2$$

το 1 % των οποίων είναι CO, δηλαδή:

$$X = 0,01 (212,5 + X/2) \Leftrightarrow X = 2,14$$

Οπότε η έξοδος αποτελείται από 27,86 mol CO_2 , 2,14 mol CO, 8,57 mol O_2 , 33,9 mol H_2O και 141,1 mol N_2 . Η θερμότητα που παράγεται από την αντίδραση (στη βάση 1 sec και σε πρότυπες συνθήκες) είναι:

$$\begin{aligned} &27,86 \times \Delta H_{\text{CO}_2} + 2,14 \times \Delta H_{\text{CO}} + 20 \times \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{\text{βιομάζας}} = \\ &= 27,86 \times 393,5 + 2,14 \times 110,5 + 20 \times 285,8 - 5.296,3 = \\ &= 11.619,0 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο} \end{aligned}$$

Η θερμότητα που απομακρύνεται με τα απαέρια είναι (λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους δύο πρώτους όρους των εξισώσεων της θερμοχωρητικότητας):

$$= 27,86 \times [0,043 \times (423 - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (423^2 - 298^2)] +$$

$$\begin{aligned}
& + 2,14 \times [0,028 \times (423 - 298) + (5,02/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] + \\
& + 33,9 \times [0,034 \times (423 - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (423^2 - 298^2)] + \\
& + 8,57 \times [0,035 \times (423 - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] + \\
& + 141,1 \times [0,027 \times (423 - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (423^2 - 298^2)] = \\
& = 27,86 \times (5,38 + 0,52) + 2,14 \times (3,5 + 0,23) + 33,9 \times (4,25 + 0,03) + 8,57 \times (4,38 + \\
& 0,05) + 141,1 \times (3,38 + 0,19) = 164,4 + 8,0 + 145,1 + 38,0 + 503,7 = 859,2 \text{ kJ/kg} \\
& \text{βιομάζας στην είσοδο,}
\end{aligned}$$

και η λανθάνουσα θερμότητα είναι:

$$33,9 \times 40,7 = 1.379,7 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο.}$$

Οπότε η ωφέλιμη θερμότητα είναι:

$$11.619,4 - 859,2 - 1.379,7 = 9380,5 \text{ kJ/kg βιομάζας στην είσοδο}$$

Η Α.Θ.Δ. της βιομάζας που εισέρχεται στον καυστήρα σε 1 sec, είναι:

$$16.873,0 \times 0,72 = 12.148,6 \text{ kJ/kg βιομάζας}$$

και η αντίστοιχη Κ.Θ.Δ.: $12.148,6 - 33,9 \times 40,7 = 10.768,9 \text{ kJ/kg βιομάζας}$

οπότε η απόδοση του καυστήρα, είναι: $\eta_{th} = 9.380,5/12.148,6 = 77,2 \%$ της Α.Θ.Δ της τροφοδοσίας και $\eta_{th} = 9.380,5/10.768,9 = 87,1 \%$ της Κ.Θ.Δ της τροφοδοσίας.

6.2.2 Παράδειγμα

Στο προηγούμενο παράδειγμα να υπολογιστεί η θερμοκρασία καύσης (η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να εξέλθει ο ατμός από το λέβητα.

Λύση

Η θερμοκρασία καύσης υπολογίζεται από το ισοζύγιο ενέργειας μεταξύ της εισόδου του καυστήρα και της εξόδου του (δηλαδή πριν τα απαέρια αποδώσουν οποιαδήποτε θερμότητα στο νερό του εναλλάκτη του λέβητα):

Ισοζύγιο Θερμότητας: θερμότητα που = ωφέλιμη + λανθάνουσα παράγεται θερμότητα κατά την καύση.

Η θερμότητα που παράγεται από την καύση είναι 11.619,0 kJ/kg βιομάζας στην είσοδο, ενώ η λανθάνουσα θερμότητα είναι 1.379,7 kJ/kg βιομάζας στην είσοδο. Η ωφέλιμη θερμότητα στην περίπτωση αυτή είναι η αισθητή θερμότητα που περιέχουν τα απαέρια, πριν αυτά ψυχθούν στον εναλλάκτη του λέβητα, και με βάση το παραπάνω ισοζύγιο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
& \text{ωφέλιμη θερμότητα} = 11.619,0 - 1.379,7 \Leftrightarrow \\
& 27,86 \times [0,043 \times (T - 298) + (1,15/2) \times 10^{-5} \times (T^2 - 298^2)] +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+ 2,14 \times [0,028 \times (T - 298) + (5,02/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\
&+ 33,9 \times [0,034 \times (T - 298) + (6,28/2) \times 10^{-7} \times (T^2 - 298^2)] + \\
&+ 8,57 \times [0,035 \times (T - 298) + (1,08/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] + \\
&+ 141,1 \times [0,027 \times (T - 298) + (4,18/2) \times 10^{-6} \times (T^2 - 298^2)] = 10.239,3 \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Leftrightarrow 1,20 \times (T - 298) + 16,0 \times 10^{-5} \times (T^2 - 88804) + \\
&+ 0,059 \times (T - 298) + 5,37 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) + \\
&+ 1,15 \times (T - 298) + 106,4 \times 10^{-7} \times (T^2 - 88804) + \\
&+ 0,30 \times (T - 298) + 4,63 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) + \\
&+ 3,81 \times (T - 298) + 294,9 \times 10^{-6} \times (T^2 - 88804) = 10.239,3 \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\Leftrightarrow 1,20 \times T - 357,6 + 16,0 \times 10^{-5} \times T^2 - 14,2 + \\
&+ 0,059 \times T - 17,58 + 5,37 \times 10^{-6} \times T^2 - 0,48 + \\
&+ 1,15 \times T - 342,7 + 106,4 \times 10^{-7} \times T^2 - 0,94 + \\
&+ 0,30 \times T - 89,4 + 4,63 \times 10^{-6} \times T^2 - 0,41 + \\
&+ 3,81 \times T - 1135,4 + 294,9 \times 10^{-6} \times T^2 - 26,2 = 10.239,3 \Leftrightarrow
\end{aligned}$$

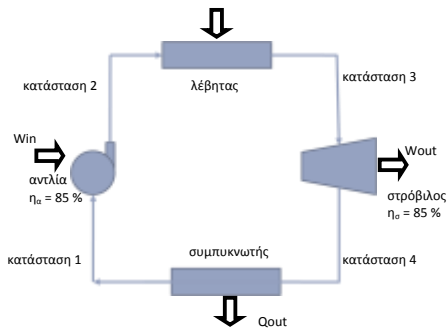
$$\Leftrightarrow 47,55 \times 10^{-5} \times T^2 + 6,52 \times T - 1984,9 = 10.239,3 \Leftrightarrow 47,55 \times 10^{-5} \times T^2 + 6,52 \times T - 12.224,2$$

$$T = (-6,52 \pm (6,52^2 + 4 \times 47,55 \times 10^{-5} \times 12.224,2)^{1/2}) / (2 \times 47,55 \times 10^{-5}) = 1671,2 \text{ K} = 1398,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

6.3 Ηλεκτροπαραγωγή σε θερμικές μηχανές Rankine

Οι θερμικές μηχανές Rankine είναι οι γνωστοί ατμοστρόβιλοι των ατμο-ηλεκτρικών σταθμών. Μία τέτοια θερμική μηχανή αποτελείται από τα τέσσερα διαδοχικά στάδια:

1. της παροχής νερού μέσω αντλίας, η οποία δαπανά έργο W_{in} , για να τροφοδοτεί το νερό αυτό στον λέβητα υπό υψηλή πίεση – ο βαθμός απόδοσης της αντλίας είναι συνήθως 90 %.
2. στο λέβητα, το νερό λαμβάνει θερμότητα Q_{in} και μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό στην πίεση που αναπτύσσει η αντλία.
3. ο υπέρθερμος ατμός, υπό πίεση, εκτονώνεται στο στρόβιλο και παράγει έργο ηλεκτρικό W_{out} μέσω της γεννήτριας στην οποία είναι συνδεδεμένος – ο βαθμός απόδοσης του στρόβιλου είναι 90 % και ο ατμός εξέρχεται κορεσμένος στην πίεση του συμπυκνωτή.
4. όπου μεταπίπτει στην κατάσταση του κορεσμένου υγρού, στην ίδια πίεση, αποδίδοντας θερμότητα προς το περιβάλλον (στους 25 °C).



όπως φαίνεται στο Σχήμα.

Με βάση τις παραπάνω διεργασίες το ρευστό του ατμοστρόβιλου (νερό/ατμός) διέρχεται από τέσσερις διαδοχικές καταστάσεις:

- κατάσταση 1: κορεσμένο νερό σε θερμοκρασία T_1 και πίεση P_1 – η θερμοκρασία T_1 , στους πλέον προηγμένους στρόβιλους, είναι $15\text{ }^\circ\text{C}$ πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, για να εξασφαλίζεται επαρκής ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς αυτό και η πίεση P_1 είναι η πίεση ισορροπίας στη θερμοκρασία αυτή (αν το περιβάλλον βρίσκεται στους $25\text{ }^\circ\text{C}$, η θερμοκρασία T_1 είναι $40\text{ }^\circ\text{C}$ και η πίεση ισορροπίας υγρού/ατμού $P_1 = 7,384\text{ kPa}$).
- κατάσταση 2: συμπιεσμένο νερό σε θερμοκρασία $T_2 = T_1$ και πίεση P_2 – η πίεση P_2 , στους πλέον προηγμένους στρόβιλους, είναι 30 MPa .
- κατάσταση 3: υπέρθερμος ατμός σε θερμοκρασία T_3 και πίεση $P_3 = P_2$ – η θερμοκρασία T_3 , στους πλέον προηγμένους στρόβιλους, είναι $650\text{ }^\circ\text{C}$.
- κατάσταση 4: μίγμα κορεσμένου υγρού/ατμού (κλάσμα ατμού $80 - 100\%$) σε θερμοκρασία $T_4 = T_1$ και πίεση $P_4 = P_1$.

6.3.1 Παράδειγμα

Ο καυστήρας του προηγούμενου παραδείγματος χρησιμοποιείται για την υπερθέρμανση ατμού στους $600\text{ }^\circ\text{C}$ και την τροφοδοσία του σε ατμοστρόβιλο. Να υπολογιστεί η ονομαστική ισχύς και η απόδοση της διάταξης καυστήρα – ατμοστρόβιλου, αν η πίεση λειτουργίας του τελευταίου είναι 30 MPa και η απόρριψη θερμότητας γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $25\text{ }^\circ\text{C}$. Η απόδοση της αντλίας και του στρόβιλου θεωρούνται ίσες με 85% και το κλάσμα ατμού μετά τον στρόβιλο 90% .

Λύση

Η θερμότητα που αποδίδεται στον κύκλο Rankine είναι $9380,5\text{ kJ/kg}$ βιομάζας στην είσοδο ή $9380,5\text{ kJ/sec}$, αφού η τροφοδοσία του καυστήρα είναι $1\text{ kg βιομάζας / sec}$. Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για να παράγει υπέρθερμο ατμό σε $T_3 = 600\text{ }^\circ\text{C}$ και $P_3 = 30\text{ MPa}$, από συμπιεσμένο νερό σε θερμοκρασία $T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ και $P_2 = 30\text{ MPa}$.

Η ενθαλπία του νερού στην κατάσταση 2 είναι $193,89\text{ kJ/kg}$ και η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 είναι $3443,9\text{ kJ/kg}$. Οπότε η μαζική παροχή

νερού/ατμού μέσω του λέβητα (και όλου του κύκλου Rankine) είναι:

$$M_{H_2O} = \frac{9380,5 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}}{(3443,9 - 193,89) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Το ηλεκτρικό έργο που αποδίδει ο στρόβιλος του κύκλου Rankine είναι:

$$W_{out} = \eta_{\sigma} \times M_{H_2O} \times (H_3 - H_4) = 0,85 \times 2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (3443,9 - 2333,6) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2718,0 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

όπου H_3 η ειδική ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 και H_4 η ειδική ενθαλπία του μίγματος κορεσμένου ατμού (90 %) και υγρού (10 %) στην κατάσταση 4:

$$H_4 = 0,9 \times 2574,3 + 0,1 \times 167,57 = 2333,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Αντίστοιχα, το έργο που προσδίδει η αντλία στο κύκλο είναι:

$$W_{IN} = \frac{M_{H_2O} \times (H_2 - H_1)}{\eta_{\alpha}} = \frac{2,88 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (193,89 - 167,57) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,85} = 89,2 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

Οπότε η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον ατμοστρόβιλο είναι:

$$W_{el} = 2718,0 - 89,2 = 2628,8 \text{ kWe} = 2,63 \text{ MWe}$$

Η απόδοση του ατμοστροβίλου είναι: $\eta_{el} = 100 \times (2628,8/9380,5) = 28,0 \%$

ενώ η συνολική απόδοση της διεργασίας ηλεκτροπαραγωγής από την καύση βιομάζας είναι:

$$\eta_{total} = 100 \times (2628,8/10768,5) = 24,4 \%$$

6.4 Οικονομικά της συμπαραγωγής από βιομάζα

Το κόστος εγκατάστασης μίας μονάδας καύσης βιομάζας και συμπαραγωγής ηλεκτρικής θερμικής ισχύος σε ατμοστρόβιλο δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Πάγια επένδυση: } \text{ΠΕ} = 4029 - 643 \ln \Delta \text{ [€/ kWe]}$$

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.

6.4.1 Παράδειγμα

Να εκτιμηθούν οι προοπτικές οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας συμπαραγωγής από καύση βιομάζας των παραπάνω παραδειγμάτων, θεωρώντας ότι η βιομάζα (ενεργειακών καλλιεργειών) διατίθεται από τον παραγωγό στην τιμή των 50 €/τν. Η παραγωγή θερμότητας αφορά σε νερό θερμοκρασίας 80 °C, από τον συμπυκνωτή του ατμοστροβίλου.

Λύση

Η ετήσια λειτουργία της μονάδας απαιτεί:

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

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 παραγωγή θερμότητας από τον συμπυκνωτή είναι μηδενική, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας του.

Αντίστοιχα, η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή είναι:

$$2,63 \text{ MWe} \times 24 \text{ h/ημέρα} \times 365 \text{ ημέρες/έτος} = 23.039 \text{ MWh/έτος}$$

(ηλεκτρική απόδοση: 24,4 %, θερμική απόδοση: 0 %, απόδοση συμπαραγωγής: 24,4 %)

Για ονομαστική ισχύ 3 MWe:

- το κόστος εγκατάστασης είναι: $4029 - 643 \ln 3 = 3322 \text{ €/kWe}$ δηλαδή 9.967.777 €
- από το οποίο η επιδότηση είναι 3.987.111 € και τα ίδια κεφάλαια είναι: 5.980.666 €

η απόσβεση είναι 10 % των ιδίων κεφαλαίων: 598.066 €
το κόστος εργασίας είναι: 60.000 €/MWe δηλαδή 180.000 €
τα λοιπά κόστη είναι: 40.000 €/MWe δηλαδή 120.000 €
οπότε η ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας δίνει:

πάγια επένδυση, € 9.967.777

ίδια συμμετοχή, € 5.980.666

έσοδα

έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας, €/έτος 1.843.104 (τιμή διάθεσης ηλεκτρικής MWh: 80 €)

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

σύνολο εσόδων, €/έτος 1.843.104

λειτουργικά έξοδα

πρώτη ύλη, €/έτος 1.576.800

εργασία, €/έτος 180.000

λοιπά, €/έτος 120.000

σύνολο λειτουργικών εξόδων, €/έτος 1.876.800

χρηματο-οικονομικά έξοδα

αποσβέσεις, €/έτος 598.066

σύνολο χρηματο-οικονομικών εξόδων, €/έτος 598.066

κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων

EBTD, €/έτος 33.696

κέρδη προ φόρων, €/έτος

καθαρά κέρδη, €/έτος

χρόνος αποπληρωμής ιδίων, έτη

χρόνος αποπληρωμής ιδίων

με βάση το EBTD, έτη

Για τη συμπαραγωγή θερμότητας και από το συμπυκνωτή του κύκλου Rankine, θα πρέπει αυτός να λειτουργεί στους 95 °C (15 °C διαφορά για την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας στο νερό ψύξης των 80 °C), ελαττώνοντας την ηλεκτρική απόδοση της μονάδας. Στην περίπτωση αυτή:

- Η θερμότητα που αποδίδεται στον κύκλο Rankine είναι 9380,5 kJ/sec, αφού η τροφοδοσία του καυστήρα είναι 1 kg βιομάζας / sec και χρησιμοποιείται για να παράγει υπέρθερμο ατμό σε $T_3 = 600$ °C και $P_3 = 30$ MPa, από συμπιεσμένο νερό σε θερμοκρασία $T_2 = 95$ °C και $P_2 = 30$ MPa.
- Η ενθαλπία του συμπιεσμένου νερού στην κατάσταση 2 είναι 421,1 kJ/kg (βρίσκεται με γραμμική παρεμβολή) και η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 είναι 3443,9 kJ/kg. Οπότε η μαζική παροχή νερού/ατμού μέσω του λέβητα (και όλου του κύκλου Rankine) είναι:

$$M_{H_2O} = \frac{9380,5 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}}{(3443,9 - 421,09) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 3,10 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Το ηλεκτρικό έργο που αποδίδει ο στρόβιλος του κύκλου Rankine είναι:

$$W_{out} = \eta_{\sigma} \times M_{H_2O} \times (H_3 - H_4) = 0,85 \times 3,10 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (3443,9 - 2441,1) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2642,4 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

όπου H_3 η ειδική ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην κατάσταση 3 και H_4 η ειδική ενθαλπία του κορεσμένου ατμού στην κατάσταση 4:

$$H_4 = 0,9 \times 2668,1 + 0,1 \times 397,96 = 2441,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Αντίστοιχα, το έργο που προσδίδει η αντλία στο κύκλο είναι:

$$W_{IN} = \frac{M_{H_2O} \times (H_2 - H_1)}{\eta_{\alpha}} = \frac{3,10 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (421,1 - 397,96) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,85} = 84,4 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

Οπότε η καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον ατμοστρόβιλο είναι:

$$W_{el} = 2642,4 - 84,4 = 2558,0 \text{ kWe} = 2,56 \text{ MWe}$$

ενώ η παραγωγή θερμότητας από τον συμπυκνωτή, είναι:

$$M_{H_2O} \times (H_4 - H_1) = 3,10 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times (2441,1 - 397,96) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 6333,7 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$$

(ηλεκτρική απόδοση: 24,0 %, θερμική απόδοση: 58,8 %, απόδοση συμπαραγωγής: 82,8 %).

Η παραγωγή θερμότητας από τον συμπυκνωτή είναι:

$$6,33 \text{ MW} \times 24 \text{ h/d} \times 365 \text{ d/a} = 55.451 \text{ MWh}$$

και η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή είναι:

$$2,56 \text{ MWe} \times 24 \text{ h/ημέρα} \times 365 \text{ ημέρες/έτος} = 22.426 \text{ MWh/έτος}$$

οπότε η ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας δίνει:

πάγια επένδυση, € 9.967.777

ίδια συμμετοχή, € 5.980.666

έσοδα

έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας, €/έτος 1.790.405 (τιμή διάθεσης ηλεκτρικής MWh: 80 €)

έσοδα θερμικής ενέργειας, €/έτος 1.109.020 (τιμή διάθεσης θερμικής MWh: 20 €)

σύνολο εσόδων, €/έτος 2.899.425

λειτουργικά έξοδα

πρώτη ύλη, €/έτος 1.576.800

εργασία, €/έτος 180.000

λοιπά, €/έτος 120.000

σύνολο λειτουργικών εξόδων, €/έτος 1.876.800

χρηματο-οικονομικά έξοδα

αποσβέσεις, €/έτος 598.066

σύνολο χρηματο-οικονομικών εξόδων, €/έτος 598.066

κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων

EBTD, €/έτος 1.022.625

κέρδη προ φόρων (ΚΠΦ), €/έτος 424.559

καθαρά κέρδη, €/έτος 275.963 (αφαιρέθηκε φόρος 35 % επί των ΚΠΦ)

χρόνος αποπληρωμής ιδίων, έτη 22

χρόνος αποπληρωμής ιδίων

με βάση το EBTD, έτη 6.