



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

---

## **Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας**

**Ενότητα 4(γ): Παγκόσμιο Ενεργειακό Ισοζύγιο**

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.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

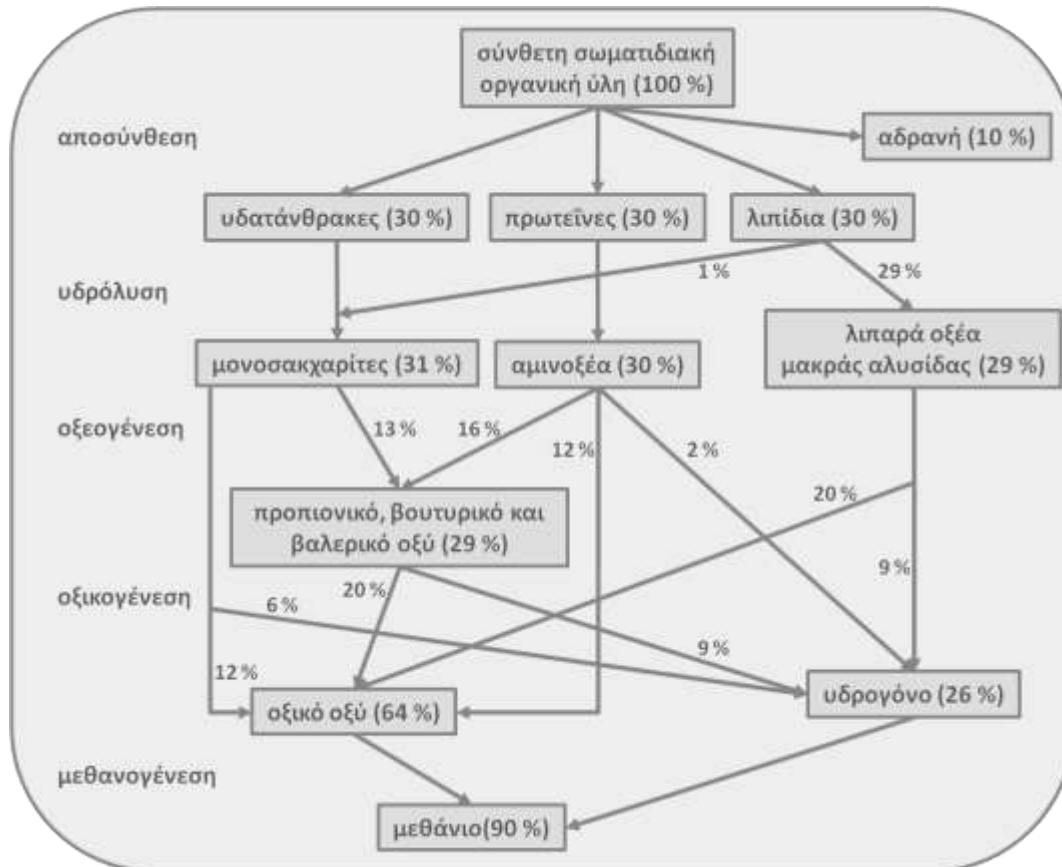


## Περιεχόμενα

1. Αναερόβια Χώνευση Βιομάζας (Παραγωγή Βιοαερίου) .....	4
2. Περιγραφή της Διεργασίας .....	6
3. Απόδοση της Αναερόβιας Χώνευσης .....	8
3.1 Παράδειγμα .....	10
4. Συμπαγωγή σε κινητήρες εσωτερικής καύσης (μηχανές Diesel) βιοαερίου ..	12
4.1 Παράδειγμα .....	15
5. Οικονομικά της συμπαγωγής από αεριοποίηση βιομάζας .....	18
5.1 Παράδειγμα .....	18

# 1. Αναερόβια Χώνευση Βιομάζας (Παραγωγή Βιοαερίου)

Η αναερόβια χώνευση είναι ένα σύνολο από βιοχημικές αντιδράσεις, που συντελούνται από μικροοργανισμούς οι οποίοι λειτουργούν απουσία οξυγόνου, μέσω των οποίων τα πολύπλοκα οργανικά μόρια βιομάζας μετατρέπονται σε απλούστερα χημικά μόρια (κυρίως οργανικά οξέα) και τελικά σε μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, υδρόθειο, υδρογόνο κ.α.



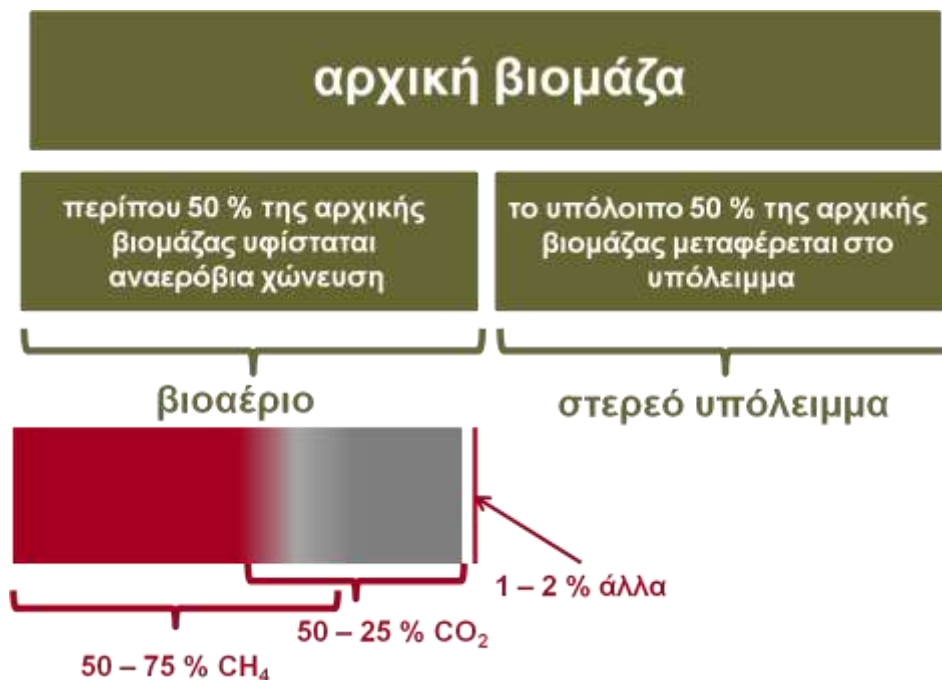
Η αναερόβια χώνευση είναι μια σύνθετη βιοχημική διεργασία που λαμβάνει χώρα σε διαδοχικά στάδια τα οποία συχνά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Κάθε στάδιο διεξάγεται από μια ομάδα μικροοργανισμών που αναπτύσσεται με διαφορετικό ρυθμό και εμφανίζει διαφορετικό βαθμό ευαισθησίας σε περιβαλλοντικές συνθήκες (pH, μερική πίεση υδρογόνου κλπ.) σε σχέση με άλλες ομάδες μικροοργανισμών. Η διεργασία μπορεί να θεωρηθεί συνοπτικά ότι είναι το σύνολο των παρακάτω σταδίων:

- Αποσύνθεση κατά την οποία η σύνθετη σωματιδιακή ύλη βιομάζας αποσυντίθεται στα οργανικά πολυμερή από τα οποία απαρτίζεται (υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια)
- Υδρόλυση, κατά την οποία τα οργανικά πολυμερή υδρολύονται (αποπολυμερίζονται) μέσω εξωκυτταρικών ενζύμων προς τα αντίστοιχα μονομερή

(σάκχαρα, αμινοξέα, λιπίδια), τα οποία μπορούν να προσληφθούν από τους μικροοργανισμούς για περαιτέρω αποδόμηση

- Οξεογένεση, όπου τα απλά μονομερή μετατρέπονται σε μείγμα πτητικών λιπαρών οξέων (βαλερικό, βουτυρικό, προπιονικό, οξικό κ.α.), αλκοολών και άλλων απλούστερων οργανικών ενώσεων, καθώς και αέρια προϊόντα (διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο)
- Οξικογένεση κατά την οποία τα πτητικά λιπαρά οξέα με αλυσίδα μεγαλύτερη από εκείνη του οξικού (βαλερικό, βουτυρικό, προπιονικό κ.α.) και τα άλλα οργανικά μόρια που παράγονται στο στάδιο της οξεογένεσης μετασχηματίζονται σε οξικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο από τα οξικογόνα βακτήρια και τέλος
- Μεθανογένεση, όπου η παραγωγή του μεθανίου επιτυγχάνεται από δύο ξεχωριστές ομάδες μικροοργανισμών: (α) τους οξικοκρήστες μεθανογόνους που αναπτύσσονται με το οξικό οξύ και παράγουν περίπου το 70% του βιοαερίου και (β) τους υδρογονοκρήστες μεθανογόνους που καταναλώνουν υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα

Το αέριο προϊόν της διεργασίας (βιοαέριο) αποτελείται κατά 98 – 99 % κ.ο. από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα και 1 – 2 % κ.ο. από μονοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία, υδρόθειο και ίχνη άλλων αερίων. Η αναλογία μεθανίου/διοξειδίου στο βιοαέριο κυμαίνεται από 1/1 έως 3/1. Στο υπόλειμμα της διεργασίας (στερεό + υγρό, το πρώτο με τη μορφή λάσπης και το δεύτερο ως αιώρημα σωματιδίων σε ακάθατο νερό με αυξημένο COD), εμφανίζεται υψηλή συγκέντρωση από μεταλλικά άλατα (προέρχονται από το ανόργανο μέρος της βιομάζας, αυτό που κατά τις θερμοχημικές διεργασίες συνιστά την τέφρα), που το καθιστούν λίπασμα. Τα ισοζύγια μάζας της αναερόβιας χώνευσης παριστάνονται ενδεικτικά στο σχήμα που ακολουθεί.



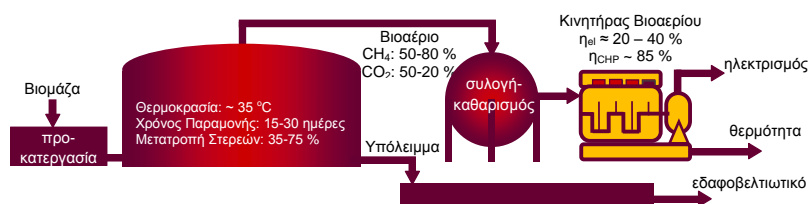
Γενικά, βιομάζα οποιουδήποτε τύπου μπορεί να υποστεί αναερόβια χώνευση, προς παραγωγή βιοαερίου, εξαιτίας όμως του αργού μεταβολισμού της λιγνίνης, αποφεύγεται η ξυλώδης βιομάζα. Επίσης, για το λόγο ότι η διεργασία συμβαίνει στην

υγρή φάση και σε μεγάλη περίσσεια νερού (συγκέντρωση ολικών στερεών 0,5 – 25 % κ.β.), προτιμώνται οι τύποι εκείνοι βιομάζας που περιέχουν υψηλά ποσοστά υγρασίας όπως τα:

- χλωρά αγροτικά υπολείμματα,
- χλωρή βιομάζα ποώδων ενεργειακών καλλιεργειών,
- ζωικά απόβλητα.

ή μίγματα των παραπάνω. Όσον αφορά στα ζωικά απόβλητα και την ενεργό ιλύ, μεγάλο μέρος της αρχικής φυτικής ύλης έχει ήδη χωνευθεί είτε αναερόβια – στο στομάχι του ζώου ή του ανθρώπου – είτε αερόβια – στις δεξαμενές αερισμού – και για το λόγο αυτό έχει χαμηλή απόδοση σε μεθάνιο (το καύσιμο συστατικό του βιοαερίου), έτσι η χώνευση των συγκεκριμένων πρώτων υλών πραγματοποιείται πρωτίστως για την κατεργασία και την αδρανοποίηση του αποβλήτου και κατά δεύτερο λόγο για την παραγωγή ενέργειας.

## 2. Περιγραφή της Διεργασίας



Μία τυπική μονάδα αναερόβιας χώνευσης για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής/θερμικής ισχύος φαίνεται στο σχήμα (ενδεικτικά για συν-χώνευση αγροτικών και ζωικών απορριμμάτων) και τα κύρια μέρη της είναι:



- **Την προκατεργασία της βιομάζας**, η οποία, ανάλογα με το είδος της πρώτης ύλης ενδέχεται να περιλαμβάνει την αποθήκευση της (αγροτικά απόβλητα από την εσοδεία έως την χρήση της), την άλεση της (φυτική βιομάζα, απόβλητα σφαγείων), την εξυγίανση της κατά την παραμονή σε θερμοκρασίες πάνω από 70 °C για το απαραίτητο χρονικό διάστημα ώστε να καταστραφούν τυχόν παθογόνοι μικροοργανισμοί (ζωικά απόβλητα), την αρχική εξωκυτταρική υδρόλυση, την ανάμιξη διαφόρων πρώτων υλών, την αραίωση ή την πύκνωση των στερεών, τη ρύθμιση του pH, την προθέρμανση της κ.α.
- **Την δεξαμενή ή τις δεξαμενές αναερόβιας χώνευσης**, όπου λαμβάνει χώρα η αναερόβια χώνευση σε επιλεγμένη θερμοκρασία και χρόνο παραμονής της βιομάζας στον χωνευτή. Το βιοαέριο εξέρχεται από την οροφή του αντιδραστήρα, προς τη μονάδα παραγωγής ισχύος, ενώ το στερεό υπόλειμμα εξέρχεται από τον πυθμένα, προς τις δεξαμενές ξήρανσης του.
- **Τον καθαρισμό και τη συλογή του βιοαερίου**, η οποία εξυπηρετεί την εξισορρόπηση της παροχής στην μονάδα συμπαραγωγής και περιλαμβάνει και σύστημα κατιονισμού του με νερό για την απομάκρυνση της αμμωνίας και του υδροθείου.
- **Μονάδα συμπαραγωγής:** πρόκειται για συστοιχία κινητήρων εσωτερικής καύσης βιοαερίου (για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος) και εναλλακτών για την παραγωγή βιομηχανικής (σε υψηλή θερμοκρασία) ή οικιακής (σε χαμηλή θερμοκρασία) θερμότητας. Στην ίδια μονάδα περιλαμβάνονται και οι μετασχηματιστές σύνδεσης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος με το δίκτυο της περιοχής.
- **Δεξαμενές ξήρανσης στερεού υπολείμματος:** το στερεό υπόλειμμα της αναερόβιας χώνευσης οδηγείται σε δεξαμενές διαδοχικής ξήρανσης, από όπου μπορεί είτε να ληφθεί σε ρευστή μορφή (για απευθείας καταιονισμό σε αγροτικές εκτάσεις) είτε να συσκευασθεί, σε ξηρή μορφή και να διατεθεί στο εμπόριο ως λίπασμα.

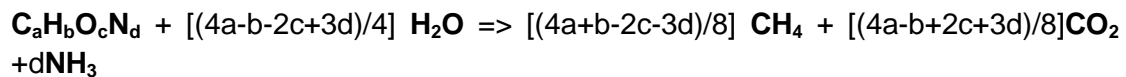


Η εμπορική διάθεση της παραγόμενης **θερμότητας** (η θερμική ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ψυκτικές ανάγκες παρακείμενων θερμοκηπίων) και του **λιπάσματος**, αποτελούν κρίσιμα σημεία για την **οικονομική βιωσιμότητα** της εγκατάστασης. Όσον αφορά στην πρώτη, η κατασκευή δικτύων τηλεθέρμανσης παρακείμενων οικισμών ενδέχεται να αποτελεί μία ακριβή και χρονοβόρα εκδοχή, ενώ στην περίπτωση αυτή πρέπει να ληφθεί πρόνοια ώστε η μονάδα να χωροθετηθεί σε μικρή απόσταση από οικισμούς ικανούς να απορροφήσουν, σε συμφέρουσα τιμή, τη θερμική της παραγωγή.



### 3. Απόδοση της Αναερόβιας Χώνευσης

Η γενική αντίδραση που περιγράφει την αναερόβια χώνευση είναι:



αποτελείται, όμως, από μεγάλο πλήθος ενδιάμεσων ενζυμικών αντιδράσεων, οι οποίες επιτελούνται από ποικιλία μικροβιακών πληθυσμών και διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. αντιδράσεις **ενζυμικής οξεογένεσης**, οι οποίες διακρίνονται σε:
  - αντιδράσεις **εξωκυτταρικής ενζυμικής υδρόλυσης**, κατά τις οποίες οι μικροοργανισμοί εκλύουν ένζυμα για την υποβάθμιση (διάσπαση) των μεγαλομορίων της βιομάζας (πολυσακχαρίτες (κυτταρίνη και λιγνίνη), πρωτεΐνες, λίπη κ.α.) σε μικρότερα μόρια, τα οποία μπορούν να καταναλωθούν ως τροφή από τους ίδιους, και
  - σε αντιδράσεις **ενδοκυτταρικής ενζυμικής οξεογένεσης**, κατά τις οποίες τα μικρότερα αυτά μόρια καταναλώνονται από τους μικροοργανισμούς και εκλύονται από το πεπτικό τους σύστημα ως πτητικά οργανικά (λιπαρά) οξέα (κυρίως προπιονικό, βουτυρικό, βαλερικό αλλά και μικρές ποσότητες οξικού οξέος) και μικρότερες ποσότητες αλκοολών και αμινών.
2. αντιδράσεις **ενζυμικής οξικογένεσης**, στις οποίες τα παραπάνω οξέα μετασχηματίζονται, κατά την πέψη τους από άλλες ομάδες μικροοργανισμών, σε οξικό οξύ (κατά το στάδιο αυτό εκλύεται και υδρογόνο), και



3. αντιδράσεις **ενζυμικής μεθανογένεσης**, όπου μία τρίτη ομάδα μικροοργανισμών καταναλώνει το οξικό οξύ (αλλά και τις αλκοόλες και τις αμίνες) και με τη βοήθεια του υδρογόνου και του διοξειδίου του άνθρακα παράγει μεθάνιο.

Ένα μέρος του άνθρακα της βιομάζας χαρακτηρίζεται ως σταθερό (fixed) και δεν συμμετέχει στις βιοχημικές αντιδράσεις της αναερόβιας χώνευσης. Ο σταθερός αυτός άνθρακας αποτελεί περίπου το **40 % του ολικού άνθρακα της βιομάζας** ή το **20 % των ολικών στερεών** που τροφοδοτούνται στον αναερόβιο χωνευτή

Έχει βρεθεί ότι ο ρυθμός αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει μέγιστο σε δύο θερμοκρασιακές περιοχές και με βάση το κριτήριο αυτό οι διεργασίες αναερόβιας χώνευσης διακρίνονται σε:

- **μεσόφιλες**, που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή των 35 °C, και
- **θερμόφιλες**, που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή των 55 °C.

Οι θερμόφιλες διεργασίες είναι σχετικά ταχύτερες από τις μεσόφιλες και επιτυγχάνουν υψηλότερες μετατροπές στερεών, για τον ίδιο **υδραυλικό χρόνο παραμονής** (υψηλότερη μετατροπή στερεών και υψηλότερη παραγωγή βιοαερίου για τον ίδιο όγκο χωνευτή). Το πλεονέκτημα τους, όμως, αυτό ισοσταθμίζεται από το αυξημένο ενεργειακό κόστος της διεργασίας, για τη θέρμανση της πρώτης ύλης και του νερού που την αραιώνει, καθώς και υψηλότερο πάγιο κόστος για τη θερμική μόνωση των δεξαμενών.

Εκτός από τον παραπάνω διαχωρισμό, οι διεργασίες αναερόβιας χώνευσης, ως προς τη συγκέντρωση ολικών στερεών στην τροφοδοσία των δεξαμενών τους, διακρίνονται σε:

χαμηλών στερεών	με κατά βάρος συγκέντρωση στερεών	< 10 %
ημι-ξηραμένων στερεών	>>	10 – 25 %
υψηλών στερεών	>>	> 25 %

με τις συνήθεις πρακτικές εφαρμογές να κυμαίνονται σε συγκεντρώσεις στερεών της τάξης του 3 – 8 % κ.β. Οι βέλτιστες συγκεντρώσεις στερεών που τροφοδοτούνται στον αναερόβιο χωνευτή καθορίζονται από την τεχνολογία του (δεξαμενή συνεχούς τροφοδοσίας και πλήρους ανάδευσης, εμβολικής ροής, με πληρωτικό υλικό, ενός ή πολλαπλών σταδίων κ.α.), το είδος της πρώτης ύλης και τη φυσική κατάσταση της βιομάζας (υγρά ρεύματα υψηλού οργανικού φορτίου, μέγεθος σωματιδίων κ.α.) και την επάρκεια της ανάμιξης.

Τα στερεά της πρώτης ύλης διακρίνονται στο κλάσμα εκείνο που μπορεί να μετατραπεί σε βιοαέριο και ονομάζονται **πτητικά στερεά** (volatile solids – VS) και στο κλάσμα εκείνο που δεν μπορεί να μετατραπεί κατά τη διεργασία (ανόργανα, λιγνίνη, μεγάλα σωματίδια τα οποία οι μικροοργανισμοί δεν μπορούν να μεταβολίσουν, παρά μόνο επιφανειακά, στο χρόνο στον οποίο το μίγμα βιομάζας/νερού παραμένει στον αναερόβιο χωνευτή. Το κλάσμα πτητικών στερεών για τους συνήθεις τύπους βιομάζας είναι της τάξης του 90 %.

Ο **υδραυλικός χρόνος παραμονής** (Hydraulic Retention Time – HRT) του μίγματος βιομάζας/νερού καθορίζει και τη συνολική μετατροπή των πτητικών

στερεών σε βιοαέριο και καθορίζεται από ποικιλία παραγόντων όπως το είδος της βιομάζας, τη θερμοκρασία της διεργασίας, το χρόνο αναπαραγωγής των μικροοργανισμών, κ.α. Υποθέτοντας δύο φάσεις στο χωνευτή, μια στερεά και μια υγρή, υπάρχουν δύο χρόνοι παραμονής,  $T_i$  και  $T_s$ , οι οποίοι τείνουν να είναι ίσοι στην παρουσία ομοιογενούς τροφοδοσίας, χωρίς ανακύκλωση λάσπης και με καλή ανακίνηση. Με βάση εμπειρικά δεδομένα της βιβλιογραφίας, η μετατροπή των πτητικών στερεών, ως προς τον υδραυλικό χρόνο παραμονής, για διεργασίες χαμηλών στερεών δίνεται από τις συσχετίσεις:

$$\text{μεσόφιλη διεργασία:} \quad \% \text{ μετατροπή VS} = 17,9 \times \ln \text{HRT} - 3,9$$

$$\text{θερμόφιλη διεργασία:} \quad \% \text{ μετατροπή VS} = 19,8 \times \ln \text{HRT} + 14,9$$

όπου HRT ο υδραυλικός χρόνος παραμονής σε ημέρες. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής καθορίζει τον όγκο του αναερόβιου χωνευτή για δεδομένη ογκομετρική παροχή μίγματος βιομάζας/νερού:

$$V_{\text{υγρή φάσης}} = Q \times \text{HRT}$$

και για τις συνήθεις τροφοδοσίες κυμαίνεται στο διάστημα 5 – 30 ημέρες (συνηθέστερα 10 – 20). Ο χωνευτής εκτός από την υγρή φάση περιέχει και έναν επιπλέον όγκο για την έκλυση του βιοαερίου. Σε πρακτικές εφαρμογές, ο όγκος αυτός είναι περίπου το 1/3 του όγκου της υγρής φάσης, οπότε ο συνολικός όγκος του χωνευτή είναι:

$$V_{\text{χωνευτή}} = 4/3 V_{\text{υγρή φάσης}}$$

### 3.1 Παράδειγμα

Να υπολογιστεί ο όγκος χωνευτή που απαιτείται για να επιτευχθεί 50 % μετατροπή των ολικών στερεών βιομάζας τυπικής σύστασης, σε μεσόφιλη διεργασία με φορτίο ολικών στερεών 5 % κ.β. Επίσης να υπολογιστεί η ετήσια παραγωγή βιοαερίου και η ειδική θερμογόνος δύναμη του. Η διαθέσιμη, για αναερόβια χώνευση βιομάζα ανέρχεται σε 40.000 τν/έτος και το πτητικό της μέρος (ξηρή βιομάζα μείον ανόργανο μέρος μείον σταθερός άνθρακας) αντιστοιχεί στο 80 % κ.β. των ολικών στερεών.

#### Λύση

Θεωρώντας τυπική σύσταση βιομάζας:

υγρασία 10 %

τέφρα 5 %

άνθρακας 43 %

οξυγόνο 37 %

υδρογόνο 5 %

Οι 40.000 τν/έτος τυπικής βιομάζας αποτελούνται από:

10 % υγρασία ή  $0,1 \cdot 40.000 = 4.000$  τν νερό

90 % ολικά στερεά ή  $0,9 \cdot 40.000 = 36.000$  τν στερεά

5 % τέφρα ή  $0,05 \cdot 40.000 = 2.000$  τν ανόργανα

πτητικά στερεά  $0,8 \cdot 90 = 72$  % ή 28.800 τν πτητικά στερεά

σταθερός άνθρακας  $90 - 5 - 72 = 13$  % ή  $0,13 \cdot 40.000 = 5.200$  τν σταθερού άνθρακα.

Το 90 % των ολικών στερεών αποτελείται:

από το 5 % τέφρα ή 5,6 % τέφρα

13 % σταθερό άνθρακα ή 14,4 % σταθερό άνθρακα

72 % πτητικά στερεά ή 80,0 % πτητικά στερεά

90 % της ολικής βιομάζας ή 100 % ολικών στερεών

Η σύσταση των πτητικών στερεών είναι:

43 – 13 = 30 % άνθρακα ή 41,7 % άνθρακα

37 % οξυγόνο 51,4 % οξυγόνο

5 % υδρογόνο 6,9 % υδρογόνο

72 % πτητικά 100 % πτητικά

και η ποσότητα των πτητικών στερεών που μετατρέπεται σε βιοαέριο:  $50 \% \cdot 90 \% = 45$  % ολικής βιομάζας ή  $0,45 \cdot 40.000 = 18.000$  τν/έτος. Η ποσότητα αυτή αποτελεί το  $45/72 = 62,5$  % των πτητικών στερεών και υδραυλικός χρόνος παραμονής που απαιτείται για τη μεσόφιλη μετατροπή του 62,5 % των πτητικών στερεών σε βιοαέριο, είναι:

$62,5 = 17,9 \times \ln HRT - 3,9 \Leftrightarrow \ln HRT = 3,71 \Leftrightarrow HRT = 40,8$  ημέρες

Τα ολικά στερεά που τροφοδοτούνται στον χωνευτή σε μία ημέρα είναι:

$36.000$  τν/έτος /  $365$  ημέρες/έτος =  $98,6$  τν/ημέρα

Αποτελώντας το 5 % κ.β. της τροφοδοσίας, η συνολική μαζική παροχή στην είσοδο του αναερόβιου χωνευτή είναι:

$98,6/0,05 = 1.972,6$  τν/ημέρα

Θεωρώντας την πυκνότητα της τροφοδοσίας κατά προσέγγιση ίση με αυτή του νερού, η ογκομετρική παροχή στην είσοδο του αναερόβιου χωνευτή είναι  $1.972,6$  m<sup>3</sup>/ημέρα, οπότε ο όγκος της υγρής φάσης στον χωνευτή είναι:

$V_{\text{υγρή φάσης}} = Q \times HRT = 1.972,6 \times 40,8 = 80.548$  m<sup>3</sup>

ενώ ο συνολικός όγκος του χωνευτή:  $V_{\text{χωνευτή}} = 4/3 V_{\text{υγρή φάσης}} = 100.397$  m<sup>3</sup>.

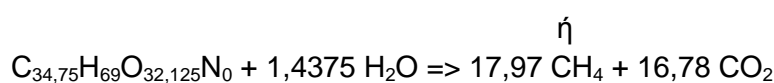
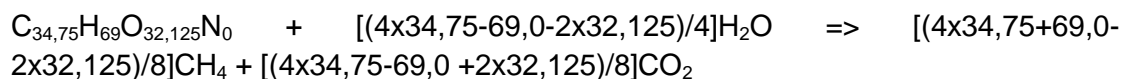
Από τη στοιχειακή σύσταση των πτητικών στερεών, προκύπτει ο ενδεικτικός μοριακός τους τύπος:

C: 41,7 % και σε 1 kg πτητικών περιέχονται 417 gr C ή 34,750 mole C

H: 6,9 % >> 69 gr H ή 69,000 mole H

O: 51,4 % >> 514 gr O ή 32,125 mole O

Οπότε, η αναερόβια χώνευση 1 kg πτητικών στερεών περιγράφεται από την αντίδραση:



Δηλαδή 1 kg χωνεμένων πτητικών στερεών παράγει:

17,97 mole CH<sub>4</sub> ή 17,97 x 22,4 = 402,5 lt CH<sub>4</sub> και

16,78 mole CO<sub>2</sub> ή 16,78 x 22,4 = 375,9,5 lt CO<sub>2</sub> ή

34,75 mole 778,4 lt βιοαερίου

και σε ένα έτος, οι 18.000 τν χωνεμένων πτητικών στερεών παράγουν **14.011.200 m<sup>3</sup> βιοαερίου**. Το 1 lt βιοαερίου περιέχει:

17,97/34,75 = 51,7 % CH<sub>4</sub> ή 517 ml CH<sub>4</sub> ή 0,02308 mole CH<sub>4</sub>

16,78/34,75 = 48,3 % CO<sub>2</sub> ή 483 ml CO<sub>2</sub> ή 0,02156 mole CO<sub>2</sub>

Θερμογόνο δύναμη του βιοαερίου είναι αυτή του μεθανίου που περιέχει και η ειδική θερμογόνο του είναι:

(0,02308 mole CH<sub>4</sub>/lt) x (802,6 kj/mole CH<sub>4</sub>) = 18,53 kj/lt βιοαερίου

όπου 802,6 kj/mole CH<sub>4</sub>, η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του μεθανίου.

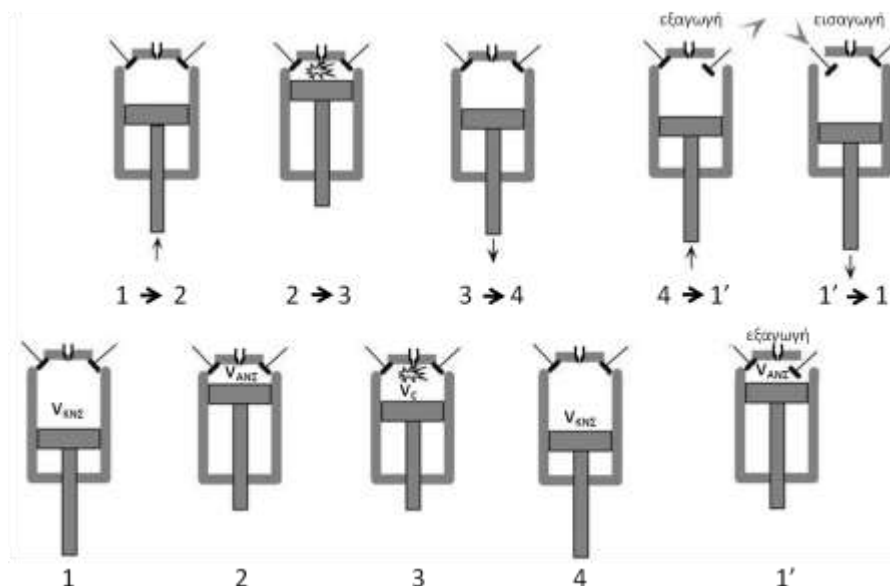
#### 4. Συμπαγωγή σε κινητήρες εσωτερικής καύσης (μηχανές Diesel) βιοαερίου

Το βιοαέριο χρησιμοποιείται είτε για την ανάμιξη του με φυσικό αέριο είτε για τη συμπαγωγή ηλεκτρικής/θερμικής ισχύος σε μηχανές εσωτερικής καύσης (κύκλους Diesel). Ο κύκλος Diesel παρουσιάζεται στο Σχήμα. Η κίνηση του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο ορίζει τέσσερις μεταβάσεις μεταξύ τεσσάρων θερμοδυναμικών καταστάσεων, του κλειστού κύκλου:

- Στην κατάσταση 1 το έμβολο βρίσκεται στην κατώτατη θέση του (Κατώτερο Νεκρό Σημείο – ΚΝΣ) και έχει αναρροφήσει αέρα υπό σταθερό όγκο (ενώ ήδη βρίσκεται στη θέση αυτή) και σε πίεση ελαφρά χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής

(περίπου 0,9 atm). Η θερμοκρασία του αναρροφούμενου αέρα είναι περίπου 25 °C υψηλότερη από την ατμοσφαιρική.

- Από την κατάσταση 1 μεταβαίνει ισεντροπικά (κατά την ιδανική διεργασία) στην κατάσταση 2 της ανώτατης θέσης του (Ανώτερο Νεκρό Σημείο – ΑΝΣ) και της μέγιστης συμπίεσης του αέρα. Η ισεντροπική αυτή μετάβαση από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ, ο αέρας θερμαίνεται σε θερμοκρασία επαρκή ( $> 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ) για την αυτανάφλεξη του καυσίμου. Λίγο πριν το έμβολο φθάσει στο ΑΝΣ εκχέεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου το καύσιμο και η κατάσταση 2 σηματοδοτεί την έναυση του καυσίμου. Κατά την ισεντροπική αυτή συμπίεση το σύστημα καταναλώνει (προσλαμβάνει) έργο  $W_{in}$ .
- Η κατάσταση 3 σηματοδοτεί τη λήξη της καύσης του καυσίμου, έτσι ώστε μεταξύ των καταστάσεων 2 και 3, η καύση του καυσίμου και η προσδοχή θερμότητας  $Q_{in}$  στον θερμικό κύκλο να έχει ολοκληρωθεί. Η καύση αυτή, παρά την αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλεί, λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση, γιατί κατά τη διάρκεια της το έμβολο υποχωρεί έως τη θέση αποκοπής (ως θέση αποκοπής ορίζεται η θέση εκείνη του εμβόλου, κατά την κάθοδο του, στην οποία ολοκληρώνεται η καύση του καυσίμου που έχει εγχυθεί στον κύλινδρο).
- Από τη θέση αποκοπής και μετά το έμβολο κατέρχεται προς το ΚΝΣ, εκτονώνοντας ισεντροπικά το αέριο που περιέχει (η κίνηση αυτή είναι που αποδίδει στον εκκεντροφόρο άξονα το έργο  $W_{out}$  του θερμικού κύκλου). Η κατάσταση 4 προκύπτει όταν το έμβολο έχει φθάσει στο ΚΝΣ με το άνοιγμα της βαλβίδας διαφυγής των απαερίων της καύσης.
- Ο κύκλος ολοκληρώνεται με τη μετάβαση από την κατάσταση 4 στην κατάσταση 1, η οποία συμβαίνει υπό σταθερό όγκο (το έμβολο βρίσκεται στο ΚΝΣ). Κατά τη μετάβαση αυτή ο κύλινδρος αδειάζει από τα προϊόντα της καύσης, απορρίπτοντας θερμότητα  $Q_{out}$  στο περιβάλλον και νέα ποσότητα αέρα εισέρχεται στο σύστημα.



Η λειτουργία (αλλά και η ενεργειακή απόδοση) του κύκλου Diesel καθορίζεται από τρεις όγκους:

- Τον **όγκο εμβολισμού**, δηλαδή τον όγκο μεταξύ του ΚΝΣ και του ΑΝΣ, που διατρέχει το έμβολο κατά την διαδρομή του, ο οποίος αντιστοιχεί στον όγκο του συστήματος όταν αυτό βρίσκεται στις καταστάσεις 1 και 4 (Vεμβολισμού =  $V_1 = V_4$ ).
- Το **νεκρό όγκο**, δηλαδή τον όγκο του κυλίνδρου πάνω από το ΑΝΣ, ο οποίος αντιστοιχεί στην κατάσταση 2 και αφορά τη θέση του εμβόλου κατά την έναρξη της καύσης (Vνεκρός =  $V_2$ ), και
- Τον **όγκο αποκοπής**, δηλαδή τον όγκο που αντιστοιχεί στην ολοκλήρωση της καύσης ή τον όγκο πάνω από το έμβολο όταν αυτό βρίσκεται στη θέση αποκοπής – ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στην κατάσταση 3 (Vαποκοπής =  $V_3$ ).

ή ακριβέστερα από τους λόγους μεταξύ των παραπάνω όγκων:

$$\text{λόγος συμπίεσης} = R = \text{Vεμβολισμού} / \text{Vνεκρός} = V_4 / V_2 = V_1 / V_2$$

$$\text{λόγος αποκοπής} = R_c = \text{Vαποκοπής} / \text{Vνεκρός} = V_3 / V_2$$

Οι λόγοι συμπίεσης και αποκοπής, στις πραγματικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης με αυτανάφλεξη (κινητήρες ντίζελ), είναι της τάξης 19 – 21 και 1 – 3, αντίστοιχα.

Για τη θερμοδυναμική ανάλυση του κύκλου Diesel, το αέριο που συμμετέχει στη διεργασία (αέρας, αέρας + καύσιμο και αέρα + καυσαέρια) θεωρείται ότι είναι αέρας και τα θερμοδυναμικά δεδομένα λαμβάνονται από τους αντίστοιχους πίνακες. Η θερμότητα που προσδίδεται ισοβαρώς στον κύκλο, κατά την καύση του καυσίμου και μεταξύ των καταστάσεων 2 και 3, είναι:

$$Q_{in} = m^*(h_3 - h_2) = C_p \times (T_3 - T_2)$$

ενώ η θερμότητα που απομακρύνεται ισόχωρα από τον κύκλο, μεταξύ των καταστάσεων 4 και 1, είναι:

$$Q_{out} = m^*(u_4 - u_1) = C_v \times (T_4 - T_1)$$

Έτσι, το καθαρό έργο που παράγεται από τον κύκλο είναι:

$$W_{net} = W_{out} - W_{in} = Q_{in} - Q_{out}$$

Οι σχέσεις  $P - V - T$  που διέπουν τη λειτουργία του κύκλου είναι:

$$\text{ισοβαρή μεταβολή:} \quad (P_2 \times V_2)/T_2 = (P_3 \times V_3)/T_3$$

$$\text{ισόχωρη μεταβολή:} \quad (P_1 \times V_1)/T_1 = (P_4 \times V_4)/T_4$$

$$\text{ισεντροπικές μεταβολές:} \quad T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{\gamma-1} \quad P_2/P_1 = (V_1/V_2)^{\gamma}$$

$$T_4/T_3 = (V_3/V_4)^{\gamma-1} \quad P_4/P_3 = (V_3/V_4)^{\gamma}$$

Όπου  $\gamma$  ο λόγος  $C_p/C_v$  για τον αέρα ( $\gamma = C_p/C_v = 1,005/0,718 = 1,4$  – θεωρείται ιδανικός). Η παραπάνω θερμοδυναμική ανάλυση οδηγεί στον υπολογισμό του έργου και της απόδοσης του ιδανικού (ισεντροπικού) κύκλου Diesel. Το έργο και η απόδοση των πραγματικών κινητήρων εσωτερικής καύσης με αυτανάφλεξη κυμαίνονται στο 70 % των αντίστοιχων ισεντροπικών μηχανών.

## 4.1 Παράδειγμα

Το βιοαέριο του προηγούμενου παραδείγματος τροφοδοτείται σε κινητήρα εσωτερικής καύσης με αυτανάφλεξη, ο οποίος λειτουργεί με λόγο συμπίεσης 20, λόγο αποκοπής 2,2 και απόδοση 90 % του ιδανικού. Να υπολογιστούν η παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ισχύς, το κλάσμα της θερμικής ισχύος που πρέπει να ανακυκλωθεί στη διεργασία αναερόβιας χώνευσης για την προθέρμανση της τροφοδοσίας, η απόδοση του κινητήρα και η συνολική απόδοση της διεργασίας ως προς τη ΚΘΔ της βιομάζας που τροφοδοτήθηκε στον χωνευτή.

### Λύση

Αρχικά υπολογίζονται οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις στις τέσσερις καταστάσεις του ιδανικού κύκλου:

**Κατάσταση 1:**  $P_1 = 0,9 \text{ atm} \rightarrow u_1 = 230,58 \text{ kJ/kg}$

$T_1 = 323 \text{ K}^1$   $v_{r1} = 516,48$

Μετάβαση 1 – 2:  $v_{r1}/v_{r2} = V_1/V_2 = 20 \Leftrightarrow v_{r2} = 516,48/20 = 25,804$

**Κατάσταση 2:**  $v_{r2} = 25,804 \rightarrow u_2 = 752,05 \text{ kJ/kg}$

$h_2 = 1.036,78 \text{ kJ/kg}$

$T_2 = 991,87 \text{ K}$

Μετάβαση 2 – 3:  $P_3 = P_2$

$V_2/T_2 = V_3/T_3 \Rightarrow T_3 = T_2 \times (V_3/V_2) = 991,87 \times 2,2 = 2.182,12 \text{ K}$

**Κατάσταση 3:**  $T_3 = 2.182,12 \text{ K} \rightarrow h_3 = 2.480,71 \text{ kJ/kg}$

$v_{r3} = 2,070$

$u_3 = 1.855,02 \text{ kJ/kg}$

Μετάβαση 3 – 4:  $v_{r3}/v_{r4} = V_3/V_4 = 2,2V_2/V_1 = 2,2/20 = 0,11 \Leftrightarrow v_{r4} = v_{r3}/0,11 = 18,821$

**Κατάσταση 4:**  $v_{r4} = 18,821 \rightarrow u_4 = 846,63 \text{ kJ/kg}$

Λαμβάνοντας ως βάση το 1 sec, στον κινητήρα τροφοδοτούνται:

$14.011.200 \text{ m}^3 \text{ βιοαερίου/έτος} / 31.536.000 \text{ sec/έτος} = 444,3 \text{ lt βιοαερίου/sec}$  ή

$0,517 \times 444,3 = 229,7 \text{ lt CH}_4/\text{sec}$  τα οποία αντιστοιχούν σε  $10,26 \text{ mol CH}_4/\text{sec}$

Κατά την καύση της παραπάνω ποσότητας  $\text{CH}_4$  παράγονται:

$(10,26 \text{ mol CH}_4/\text{sec}) \times (802,6 \text{ kJ/mole CH}_4) = 8.231,57 \text{ kJ/sec}$

Δηλαδή:  $Q_{in} = 8.231,57 = m \cdot (h_3 - h_2) \Leftrightarrow 8.231,57 = m \cdot (2.480,71 - 1.036,78) \Leftrightarrow m = 5,700 \text{ kgαέρα/sec}$ .

και η παραγόμενη θερμική ισχύς του ιδανικού κύκλου είναι:

$Q_{out} = m \cdot (u_4 - u_1) = 5,700 \cdot (846,63 - 230,58) = 3.511,99 \text{ kJ/sec} = 3,512 \text{ MW}$

---

<sup>1</sup> 25 °C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C ή 298 K).

και παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του ιδανικού κύκλου είναι:

$$W_{net} = Q_{in} - Q_{out} = 8.231,57 - 3.511,99 = 4.719,58 \text{ kJ/sec} = 4,720 \text{ MW}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ηλεκτρική απόδοση του πραγματικού κινητήρα είναι το 70 % του ιδανικού κύκλου, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς γίνεται:

$$W_{net,πραγματική} = 0,7 \times 4.719,58 = 3.303,71 \text{ kW} = 3,304 \text{ MW}$$

και η παραγόμενη θερμική ισχύς:

$$Q_{out,πραγματική} = Q_{in} - W_{net,πραγματική} = 8.231,57 - 3.303,71 = 4.927,86 \text{ kW} = 4,928 \text{ MW}$$

Οπότε η απόδοση του κινητήρα είναι:  $\eta = 3,304/8,232 = 0,401$  ή 40,1 %

Στον αναερόβιο χωνευτή εισέρχονται 1.972,6 τν αποβλήτου / ημέρα (22,8 kg/sec), οι οποίοι αποτελούνται κυρίως από νερό, οπότε η θερμοχωρητικότητα τους μπορεί να θεωρηθεί ίση με του νερού. Αν η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος του έτους θεωρηθεί 15 °C, η θερμική ισχύς που πρέπει να δαπανηθεί προκειμένου η θερμοκρασία της τροφοδοσίας να ανέβει στους 35 οC (θερμοκρασία λειτουργίας του μεσόφυλου χωνευτή), είναι:

$$Q_{recycle} = 22,8 \times 4,23 \times (35 - 15) = 1.931 \text{ kJ/sec} = 1.931 \text{ kW}$$

Δηλαδή το  $1.931/4.927 = 0,39$  ή 39 % της παραγόμενης θερμικής ισχύος πρέπει να ανατροφοδοτηθεί στη διεργασία για την προθέρμανση της τροφοδοσίας της.

Η Α.Θ.Δ. της ξηρής και ελεύθερης τέφρας βιομάζας είναι:

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

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

Ένα kg που τροφοδοτείται στον χωνευτή περιέχει 85 % οργανικό μέρος με ΑΘΔ:

$$0,85 \times 17.666 = 15.016 \text{ kJ}$$

Το οργανικό αυτό μέρος περιέχει 5 % κ.β. υδρογόνο ή  $0,05 \times 850 = 42,5 \text{ mol H/kg}$ , τα οποία κατά την καύσης του παράγουν 21,25 mole νερού. Επίσης η ίδια βιομάζα 10 % υγρασία ή 100 γρ νερού (5,55 mole νερού) ανά kg τροφοδοτούμενης βιομάζας. Οπότε η ΚΘΔ ενός kg βιομάζας είναι:

$$K\Theta\Delta = 15.016 - (21,25 + 5,55) \times 40,7 = 13.925 \text{ kJ/kg βιομάζας}$$

όπου 40,7 kJ/mole η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού.

Τα ολικά στερεά που τροφοδοτούνται στον χωνευτή σε ένα sec είναι:

$$98,6 \text{ τν/ημέρα} / 24 \text{ h/ημέρα} / 3600 \text{ sec/h} = 1,14 \text{ kg/sec}$$

τα οποία αντιστοιχούν σε  $1,14 / 0,9 = 1,27 \text{ kg βιομάζας με } 10 \% \text{ υγρασία}$ . Η ΚΘΔ της τροφοδοσίας αυτής είναι:

$$1,27 \text{ kg βιομάζας} \times 13.925 \text{ kJ/kg βιομάζας} = 17.638 \text{ kJ/sec} = 17.638 \text{ kW}$$

Οπότε, η ηλεκτρική απόδοση της ολοκληρωμένης διεργασίας χώνευσης – κινητήρα βιοαερίου είναι:



3.304 kW / 17.638 kW = 0,187 ή 18,7 % της ΚΘΔ της τροφοδοτούμενης βιομάζας.

## 5. Οικονομικά της συμπαραγωγής από αεριοποίηση βιομάζας

Η Γερμανία αποτελεί τον κυρίαρχο παραγωγό βιοαερίου στην Ευρώπη και λόγω της κλιμάκωσης των επιδοτήσεων στη χώρα αυτή πολλοί πάροχοι τεχνολογίας έχουν βελτιστοποιήσει το κόστος εξοπλισμού για ολοκληρωμένες μονάδες ονομαστικής ισχύος 500 kWe. Εγκαταστάσεις μεγαλύτερης δυναμικότητας συχνά να αποτελούνται από επιμέρους βελτιστοποιημένες μονάδες των 500 kWe, των οποίων το κόστος εκτιμάται σε 1,25 εκ. €. 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 αναερόβια χώνευση του προηγούμενου παραδείγματος, θεωρώντας ότι η πρώτη ύλη αποτελείται κατά 50 % από βιομάζα ενεργειακών καλλιεργειών, που φθάνει στη μονάδα στην τιμή των 65 €/tn και το 50 % αφορά σε ζωικά απόβλητα μηδενικού κόστους.

#### Λύση

Η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή είναι:

$$3,304 \text{ MWe} \times 24 \text{ h/ημέρα} \times 365 \text{ ημέρες/έτος} = 28.941 \text{ MWh/έτος}$$

Η ετήσια παραγωγή θερμότητας είναι:

$$(4,927 - 1,931) \text{ MWth} \times 24 \text{ h/ημέρα} \times 365 \text{ ημέρες/έτος} = 26.245 \text{ MWh/έτος}$$

Για ονομαστική ισχύ 3,5 MWe το κόστος εγκατάστασης είναι:  $7 * 1,25 = 8.750.000 \text{ €}$

από το οποίο η επιδότηση είναι 3.500.000 € και τα ίδια κεφάλαια 5.250.000 €

η απόσβεση είναι 10 % των ιδίων κεφαλαίων: 525.000 €

το κόστος εργασίας είναι: 60.000 €/MWe δηλαδή 210.000 €

τα λοιπά κόστη είναι: 40.000 €/MWe δηλαδή 140.000 €

οπότε η ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας δίνει:

πάγια επένδυση, € 8.750.000

ίδια συμμετοχή, € 5.250.000

#### έσοδα

έσοδα ηλεκτρικής ενέργειας, €/έτος 6.366.909 (τιμή διάθεσης ηλεκτρικής MWh: 220 €)

έσοδα θερμικής ενέργειας, €/έτος 524.899 (τιμή διάθεσης θερμικής MWh: 20 €)

<b>σύνολο εσόδων, €/έτος</b>	<b>6.891.808</b>	
λειτουργικά έξοδα		
πρώτη ύλη, €/έτος	1.300.000	
εργασία, €/έτος	210.000	
λοιπά, €/έτος	140.000	
<b>σύνολο λειτουργικών εξόδων, €/έτος</b>	<b>1.650.000</b>	
χρηματο-οικονομικά έξοδα		
αποσβέσεις, €/έτος	525.000	
<b>σύνολο χρηματο-οικονομικών εξόδων, €/έτος</b>	<b>525.000</b>	

κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων		
EBTD, €/έτος	5.241.808	
κέρδη προ φόρων (ΚΠΦ), €/έτος	4.716.808	
καθαρά κέρδη, €/έτος	3.065.925	(αφαιρέθηκε φόρος 35 % επί των ΚΠΦ)

<b>χρόνος αποπληρωμής ιδίων, έτη</b>	<b>1,7</b>
<b>χρόνος αποπληρωμής ιδίων με βάση το EBTD, έτη</b>	<b>1,0</b>