

# 2016

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής  
και Διοίκησης  
Πολυτεχνείο Κρήτης

**Διπλωματική εργασία**

Υπό

Δαβή Χρήστο

Επιβλέπων καθηγητής: Κονσολάκης Μιχάλης

**Ενεργειακή εκμετάλλευση βιομάζας προς παραγωγή  
ηλεκτρικής ενέργειας: παρούσα κατάσταση &  
προοπτικές.**

Χανιά 2016

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου ως προπτυχιακός φοιτητής της Σχολής Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας τον κ. Κονσολάκη Μιχάλη για την συνδρομή του στην ολοκλήρωση της εργασίας, για την καθοδήγησή του και τις πολύτιμες συμβουλές του. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους που με στηρίζουν σε κάθε βήμα της ζωής μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στη βιομάζα .....	7
1.1 Τι είναι βιομάζα.....	7
1.2 Πηγές Προέλευσης της Βιομάζας:.....	8
1.3 Τα χαρακτηριστικά της βιομάζας .....	11
1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα της βιομάζας .....	12
Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στα Βιοκαύσιμα .....	14
2. Είδη Βιοκαυσίμων .....	14
2.1. Βιοντίζελ .....	14
2.1.1 Ορισμός του βιοντίζελ.....	14
2.1.2 Ιδιότητες και Καύση .....	18
2.1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα βιοντίζελ .....	21
2.1.4 Η παραγωγή του βιοντίζελ και η διεργασία μετεστεροποίησης .....	22
2.2. Pellet (Πέλλετ) .....	28
2.2.1 Ορισμός του Pellet .....	28
2.2.2 Παραγωγή του Pellet.....	29
2.2.3 Στάδια παραγωγής .....	31
2.2.4 Πλεονεκτήματα του Pellet.....	34
2.4. Βιοαιθανόλη .....	36
2.4.1 Ορισμός της βιοαιθανόλης .....	36
2.4.2 Στάδια παραγωγής βιοαιθανόλης.....	37
2.5.Βιοαέριο .....	39
2.5.1 Ορισμός Βιοαερίου .....	39
2.5.2 Χρήση Βιοαερίου .....	40
2.5.3 Παραγωγή βιοαερίου από οργανικά υπολείμματα.....	40
2.5.4 Πως λειτουργεί μια εγκατάσταση βιοαερίου .....	43
2.5.5 Χρήση βιοαερίου στην Ελλάδα .....	44
2.5.6 Πλεονεκτήματα και οφέλη από τη χρήση του βιοαερίου .....	44
Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	46
3.1 Μέθοδοι ενεργειακής μετατροπής της βιομάζας.....	46
3.1.1 Μηχανική Επεξεργασία .....	47
3.1.2 Οδοί Ρευστοποίησης .....	47

3.1.3 Πυρόλυση (θέρμανση απουσία αέρα).....	48
3.1.4 Απευθείας Καύση.....	48
3.1.5 Ανθρακοποίηση.....	50
3.1.6 Αεριοποίηση.....	51
3.1.7 Κυψέλες καυσίμου ( fuel cells).....	56
3.1.8 Συστήματα συμπαραγωγής.....	62
Κεφάλαιο 4:Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	70

## Περίληψη

Η τεχνολογική εξέλιξη και η ανάπτυξη του βιοτικού επιπέδου στη σύγχρονη εποχή, έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας, οι οποίες βασίζονται ως επί το πλείστον στα ορυκτά καύσιμα ως πρώτη ύλη, είναι εξαιρετικά ρυπογόνες με αποτέλεσμα τη μεγάλη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Συνέπεια αυτού, σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για ενέργεια, αποτελεί η ανάγκη εξεύρεσης νέων εναλλακτικών πηγών ενέργειας, οι οποίες θα είναι φιλικές στο περιβάλλον. Η βιομάζα αποτελεί μια από τις αρχαιότερες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, εάν σκεφτούμε ότι η πρώτη πηγή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος για να ικανοποιήσει τις καθημερινές ανάγκες του (θέρμανση, προετοιμασία φαγητού) ήταν η καύση των ξύλων.

Ως ενεργειακή πηγή η βιομάζα θεωρείται μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξαιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων που παρέχει η χρήση της. Ειδικότερα, υπάρχουν πολλοί τρόποι αξιοποίησης της βιομάζας με σκοπό την μετατροπή της σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια ή/και στην παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (π.χ. βιοντίζελ, βιοαιθανόλη). Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της βιομάζας είναι η επαναχρησιμοποίηση υποπροϊόντων χαμηλής προστιθέμενης αξίας, όπως τα απορρίμματα και τα υπολείμματα αγροτικών καλλιεργειών. Επιπλέον, με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν αναπτυχθεί νέες διεργασίες αποδοτικότερης εκμετάλλευσης της βιομάζας, με το κόστος, ωστόσο, παραγωγής ενέργειας από βιομάζα να παραμένει σχετικά υψηλό.

Στην αρχή της εργασίας παρουσιάζεται μια γενική περιγραφή της βιομάζας, η οποία περιλαμβάνει τις πηγές προέλευσης και τα παράγωγα της βιομάζας. Στη συνέχεια, αναλύονται επιμέρους τα βιοκαύσιμα ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Ένα σημαντικό κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά στην ανασκόπηση των μεθόδων ενεργειακής εκμετάλλευσης της βιομάζας. Οι πιο βασικές μέθοδοι είναι η αεριοποίηση, η πυρόλυση, οι κυψελίδες καυσίμου, η απευθείας καύση και τα συστήματα συμπαραγωγής. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι τρόποι εφαρμογής των μεθόδων αυτών με στόχο την αποδοτική χρήση τους. Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## **Abstract**

The technological evolution and the development of living standards in the modern community, has led to greater demands of energy consumption. Traditional energy sources use mainly fossil fuels as raw material, which are, however, highly polluting resulting in major environmental issues. In this regard, the development of highly efficient and environmentally friendly energy sources is of paramount importance towards a sustainable future.

As an energy source, biomass is considered as one of the most important renewable energy sources due to its various advantages. There are many ways of biomass utilization, involving among others its conversion to electricity and/or thermal energy as well as its transformation to high value added products (e.g. biodiesel, bioethanol). One of the major advantages of biomass is the utilization of low cost raw material as a reusable energy. Moreover, technology evolution provides new techniques for a more efficient use of biomass, despite the fact that currently the cost of “biomass energy” is still relatively high.

In the present thesis, an introduction to biomass sources is at first presented. Then the different biofuels that can be produced by biomass are analyzed in terms of energy efficiency. In the next chapter, the different methods of biomass exploitation are analyzed, with particular emphasis on gasification, fuel cells, cracking, direct combustion and cogeneration systems. In the last chapter the main findings of the present work are summarized, whereas some suggestions for future research are also presented.

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στη βιομάζα

## 1.1 Τι είναι βιομάζα.

Ορισμός:

Η βιομάζα είναι η παλαιότερη πηγή ενέργειας την οποία την χρησιμοποιούσε ακόμη και ο πρωτόγονος άνθρωπος για να ζεσταθεί. Η καύση των ξύλων που αποτελεί ένα είδος βιομάζας δημιουργούσε ενέργεια την οποία την χρησιμοποιούσε ο άνθρωπος για να ζεσταθεί και να μαγειρέψει.

Στον όρο της βιομάζας εντάσσουμε οποιοδήποτε υλικό παραγόμενο από ζωντανούς οργανισμούς όπως τα προϊόντα του δάσους, τα υπολείμματα καλλιεργειών, τα κτηνοτροφικά απόβλητα, τα απόβλητα τροφίμων κ.λπ. όλα αυτά που αναφέρουμε μπορούν μέσω κατάλληλων θερμοχημικών διεργασιών να μετατραπούν σε βιοκαύσιμα ή ακόμη και να παράγουν απευθείας ενέργεια [1].



Η βιομάζα είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης. Η ενέργεια της βιομάζας ή αλλιώς βιοενέργεια ή πράσινη ενέργεια αποτελεί τη δευτερογενής ηλιακή ενέργεια καθώς οι φυτικοί οργανισμοί με τη βοήθεια του ήλιου και των θρεπτικών συστατικών του εδάφους μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και το νερό σε σάκχαρα και οξυγόνο. Η διεργασία αυτή μπορεί να παρασταθεί σχηματικά ως εξής :



Επομένως, κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης σχηματίζονται οργανικές ενώσεις (υδρογονάνθρακες), δηλαδή η βιομάζα. Από τη στιγμή που η βιομάζα έχει σχηματιστεί, μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε πλέον ως πηγή ενέργειας. Θεωρείται μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί είναι μια αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που έχει δεσμευτεί από τα φυτά κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης [2]. Ακόμη και σήμερα υπάρχουν λαοί στην Αφρική, στην Ινδία που για να καλύψουν τις βασικές τους ανάγκες χρησιμοποιούν ξύλα, φυτικά υπολείμματα (άχυρα, πριονίδια, άχρηστους καρπούς ή κουκούτσια κ.ά.) και ζωικά απόβλητα (κοπριά, λίπος ζώων, άχρηστα αλιεύματα κ.ά.).

Γενικότερα όσα υλικά, που άμεσα ή έμμεσα προέρχονται από το φυτικό κόσμο, αλλά και τα υγρά απόβλητα και το μεγαλύτερο μέρος από τα αστικά απορρίμματα

(υπολείμματα τροφών, χαρτί κ.ά.) των πόλεων και των βιομηχανιών, έχουμε την δυνατότητα να τα επεξεργαστούμε και να τα μετατρέψουμε σε ενέργεια [1].

Λόγω του αυξημένου ενδιαφέροντος στην πράσινη ενέργεια και της οικονομικής στήριξης από ΕΕ και την Ελληνική κυβέρνηση, η αγορά βιομάζας αναμένεται να αναπτυχθεί σημαντικά. Με την αναμόρφωση της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ) της ΕΕ ευνοείται η καλλιέργεια συγκεκριμένων αγροτικών προϊόντων για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Η βιομάζα θεωρείται λοιπόν μία από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πηγή του μέλλοντος, λόγω της οικονομικής βιωσιμότητας και της φιλικότητας προς το περιβάλλον. Το 1990 ήταν ήδη ανάμεσα στις τέσσερις μεγαλύτερες πηγές ενέργειας στο κόσμο, καλύπτοντας το 13% της χρησιμοποιούμενης αρχικής ενέργειας [3].

## 1.2 Πηγές Προέλευσης της Βιομάζας:

### **Δημιουργία ενεργειακών φυτειών**

Με τον όρο ενεργειακή φυτεία ονομάζεται η φυτεία εκείνη στην οποία η παραγόμενη βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας. Στις ενεργειακές φυτείες περιλαμβάνονται :

- Γεωργικές φυτείες που τα παραγόμενα προϊόντα περιέχουν άμυλο ή σάκχαρο, το οποίο μπορεί να μετατραπεί σε αιθανόλη.
- Γεωργικές φυτείες που τα παραγόμενα προϊόντα περιέχουν έλαια κατάλληλα για την παραγωγή βιολογικού ντίζελ.
- Δασικές φυτείες που η παραγόμενη βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού είτε με καύση είτε με κάποια άλλη θερμοχημική διεργασία.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε δύο είδη ενεργειακών φυτειών που θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στην Ελλάδα:.

- Δασικές φυτείες που θα παράγουν βιομάζα και οι οποίες θα αρδεύονται με επεξεργασμένα αστικά λύματα.
- Γεωργικές φυτείες που θα παράγουν προϊόντα πλούσια σε σάκχαρα π.χ. γλυκό σόργο, τα οποία θα χρησιμεύουν σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαιθανόλης.

Μπορούμε να επεξεργαστούμε τα αστικά λύματα προκειμένου να τα χρησιμοποιήσουμε για την άρδευση δασικών εκτάσεων έτσι ώστε η παραγόμενη βιομάζα θα συλλεχθεί και θα χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας. Τα αστικά λύματα που έχουν υποστεί δευτεροβάθμια επεξεργασία καθαρισμού είναι κατάλληλα για άρδευση δασικών εκτάσεων. Από τη στιγμή που τα επεξεργασμένα αστικά λύματα διατίθενται για άρδευση δασικών εκτάσεων, θα πρέπει να ακολουθούνται ορισμένες προδιαγραφές όσο αφορά στην ποιότητα εκροής τους.



Οι προδιαγραφές αυτές ορίζονται για να αποφευχθεί η μόλυνση του εδάφους και των υπογείων νερών και για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα μόλυνσης ατόμων που εργάζονται ή επισκέπτονται τις δασικές εκτάσεις. Συνεπώς, η ποιότητα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων, όσον αφορά τις φυσικές, χημικές και μικροβιολογικές παραμέτρους, θα πρέπει να κυμαίνεται εντός ορισμένων ορίων τα οποία είναι πιο ελαστικά από εκείνα που θα πρέπει να ισχύουν στην περίπτωση που τα επεξεργασμένα αστικά λύματα αρδεύουν γεωργικές καλλιέργειες.

Η βιομάζα αφού συλλεχθεί μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά μέσω καύσης ή άλλης κατάλληλης διεργασίας. Αν δεχθούμε τη θερμογόνο δύναμη της ξηρής βιομάζας σε 3.500 Kcal/Kg και το βαθμό απόδοσης του συστήματος σε 75%, θα πρέπει να αναμένουμε ότι η παραγόμενη ωφέλιμη θερμότητα κατά την καύση ανέρχεται σε  $2.6 \cdot 10^6$  Kcal/στρέμμα και έτος, που ισοδυναμεί με 260 Kg πετρελαίου/στρέμμα και έτος [4].

Με την καύση της βιομάζας μπορεί να παράγουμε θερμότητα αλλά όμως είναι δυνατόν να παραχθεί και ηλεκτρική ενέργεια, εφόσον η βιομάζα χρησιμοποιηθεί για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Για να υπολογίσουμε την καθαρή ενέργεια θα πρέπει από την ενέργεια που προκύπτει αν από την ωφέλιμη ενέργεια που λαμβάνεται από τη βιομάζα αφαιρεθεί η ενέργεια που έχει δαπανηθεί α)για την άρδευση της φυτείας, β)για τη συλλογή της βιομάζας και γ)για τη μεταφορά της βιομάζας μέχρι το σημείο χρησιμοποίησής της. Οι ενεργειακές δαπάνες ενός τέτοιου συστήματος είναι συνήθως αρκετά μικρότερες από την ωφέλιμη ενέργεια που παράγεται από τη βιομάζα.

Αναφερόμενοι στην Ελλάδα, ο κύριος όγκος των επεξεργασμένων αστικών λυμάτων διατίθεται σε υδάτινους αποδέκτες (θάλασσα) κυρίως λόγω της γεωγραφίας της καθώς σαν παραθαλάσσια χώρα διαθέτει μεγάλο μήκος ακτών. Εφόσον τα επεξεργασμένα αστικά λύματα πρόκειται να διατεθούν στο έδαφος, η διάθεσή τους στη δασοπονία πλεονεκτεί διότι: α) για την άρδευση δασικών εκτάσεων δεν απαιτείται τόσο καλή ποιότητα εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων όσο απαιτείται στις γεωργικές εκτάσεις. β) δεν δημιουργούνται κοινωνικές αντιθέσεις για την άρδευση δασικών εκτάσεων όπως πιθανώς να συμβεί στην περίπτωση διάθεσής τους σε γεωργικές εκτάσεις [4].

Στον παρακάτω πίνακα έχουν κατηγοριοποιηθεί οι τύποι της βιομάζας με βάση την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της. Έπειτα ανάλογα με την πρώτη ύλη αναφέρονται οι γεωγραφικές περιοχές που συγκεντρώνουν υψηλό δυναμικό από τις συγκεκριμένες κατηγορίες. Παρατηρούμε από τον πίνακα ότι η κύρια εκμετάλλευση των πρώτων υλών εξαρτάται από τις ενεργειακές καλλιέργειες, από τα οργανικά υποπροϊόντα, από υπολείμματα διάφορων καλλιεργειών και από την καλλιέργεια ελαιόλαδου.

**Πίνακας 1:** Οι κατηγορίες της βιομάζας ανάλογα με τις γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας [4].

Τύπος βιομάζας	Κατηγορία	Γεωγραφικές περιοχές της Ελλάδας που έχουν υψηλό δυναμικό αυτής της συγκεκριμένης κατηγορίας βιομάζας
A	Καλλιέργεια ελαιολάδου, επεξεργασία και σχετικά προϊόντα	Λακωνία, Μεσσηνία, Ηλεία, Ηράκλειο
B	Καλλιέργεια αμπέλων - σταφυλιών	Κορινθία, Κρήτη
Γ	Καλλιέργεια δέντρων (υπολείμματα)	Ημαθία, Πέλλα, Αργολίδα
Δ	Δασοκομία (υπολείμματα)	Ευρυτανία, Ροδόπη
Ε	Υπολείμματα διάφορων καλλιεργειών	Βοιωτία, Λάρισα, Καρδίτσα, Αιτωλοακαρνανία, Έβρος
ΣΤ	Υπολείμματα θερμοκηπίων	Κρήτη
Ζ	Ενεργειακές καλλιέργειες	Σχεδόν σε όλες τις γεωργικές περιοχές
Η	Οργανικά υποπροϊόντα	Θεσσαλονίκη, Τρίκαλα, Πρέβεζα, Εύβοια, Αιτωλοακαρνανία, Χαλκίδα

Οι βασικές πρώτες ύλες της βιομάζας προέρχονται [2]:

- **Από την υλοτομία και τη βιομηχανία επεξεργασίας ξύλου**

Περιλαμβάνονται όλα τα ξυλώδη υπολείμματα που μπορεί να ληφθούν από την επεξεργασία του ξύλου (πριονίδι, ροκανίδι, θρύμματα ξύλου, κλπ.), καθώς και υπολείμματα ξυλείας που προκύπτουν κατά την υλοτόμηση των δέντρων και δεν μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω, τότε χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοενέργειας, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ή για την κάλυψη αναγκών θέρμανσης. Με αυτό τον τρόπο αξιοποιούνται τα παραπροϊόντα του ξύλου, τα οποία παραμένουν, συνήθως, ανεκμετάλλευτα.

- **Από τις γεωργικές δραστηριότητες**

Στην κατηγορία των γεωργικών δραστηριοτήτων περιλαμβάνονται όλα τα υπολείμματα από τα κλαδέματα από τα δένδρα, το άχυρο και γενικότερα ότι παραμένει στους αγρούς ανεκμετάλλευτο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά για την παραγωγή φιλικής προς το περιβάλλον ενέργειας και καύσιμης ύλης. Ακόμη όλα αυτά τα υπολείμματα τους καλοκαιρινούς μήνες αποτελούν και εστίες ανάπτυξης πυρκαγιάς, με αυτόν τον τρόπο προφυλάσσεται το περιβάλλον και ο παραγωγός έχει ένα επιπλέον έσοδο. Ακόμη, και οι ενεργειακές καλλιέργειες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας, εναλλακτικών αέριων βιοκαυσίμων (βιοαέριο) καθώς και στερεών βιοκαυσίμων (pellets). Όσον αφορά την

παραγωγή των στερεών βιοκαυσίμων έχει ξεκινήσει η εγκατάσταση δενδρωδών καλλιεργειών ταχείας ανάπτυξης.

- **Από τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες**

Από τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες το πιο σημαντικό απόβλητο είναι η ζωική κοπριά και ειδικά στην μαζική εκτροφή ζώων κυρίως βοειδών, χοίρων και πουλερικών τότε οι ποσότητες είναι υπερβολικά μεγάλες. Ο ιδανικότερος τρόπος διαχείρισης αυτών των αποβλήτων είναι η χρησιμοποίησή τους για την παραγωγή βιοενέργειας. Μέσω της τεχνολογίας και κυρίως της μεθόδου της αναερόβιας χώνευσης τα υγρά ζωικά απόβλητα μετατρέπονται σε βιοαέριο, ένα εναλλακτικό και «πράσινο» βιοκαύσιμο. Μετά την παραγωγή του, το βιοαέριο τροφοδοτείται σε σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, από την πώληση των οποίων προκύπτουν τα πολύ σημαντικά έσοδα της μονάδας βιοαερίου όμως επιπλέον έσοδα προκύπτουν και από την εμπορική εκμετάλλευση του χωνεμένου υπολείμματος της κοπριάς ως βιολογικό λίπασμα. Συμπερασματικά, η βιομάζα, που λαμβάνεται από την εκτροφή ζώων, αποτελεί μια πολύ σημαντική πηγή εσόδων για τον παραγωγό καθώς και ένα τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φιλικό για το περιβάλλον και τον άνθρωπο τρόπο.

- **Από τη βιομηχανία παραγωγής τροφίμων**

Όπως επεξεργαζόμαστε τα απόβλητα από τις κτηνοτροφικές δραστηριότητες με τον ίδιο τρόπο μέσω της αναερόβιας χώνευσης επεξεργαζόμαστε και τα απόβλητα των βιομηχανιών παραγωγής τροφίμων, είτε βρίσκονται σε στερεά ή σε υγρή μορφή. Αυτή η μέθοδος βοηθά στη μείωση της έντονης ρύπανσης που προκαλούνταν από τα υγρά απόβλητα (π.χ. τυρόγαλα, κασιόγαρο, απόβλητα σφαγείων, απόβλητα χυμοποιείων, ζυθοποιείων και βιομηχανιών επεξεργασίας φρούτων και λαχανικών) πλέον μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια και προκύπτουν πολλαπλά οφέλη: όπως ότι διακόπτεται η περιβαλλοντική υποβάθμιση των υδάτινων αποδεκτών από την λειτουργία των ρυπογόνων βιομηχανιών με τρόπο που όχι μόνο δεν κοστίζει στον παραγωγό του αποβλήτου, αλλά του προσφέρει επιπλέον έσοδα από την πώληση της εναλλακτικής ενέργειας και την αποφυγή των υψηλών προστίμων που οφείλει να πληρώνει για την ακατάλληλη διάθεση των αποβλήτων του. Αντιστοίχως για τα στερεά οργανικά απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων υπάρχουν αποτελεσματικές τεχνολογίες χρήσης τους για την παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας. Για την εγκατάσταση μιας τεχνολογικά άρτιας μονάδας παραγωγής βιοενέργειας είναι, συνήθως, αναγκαία η συνεργασία των παραγωγών των ζωικών αποβλήτων με εκείνους των οργανικών βιομηχανικών αποβλήτων για την κατασκευή μονάδας συνδυασμένης αναερόβιας χώνευσης. Πέραν των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων, τα οικονομικά οφέλη του φορέα που θα επενδύσει στην υλοποίηση μιας τέτοιας μονάδας εναλλακτικής ηλεκτροπαραγωγής είναι σημαντικά υψηλά.

### 1.3 Τα χαρακτηριστικά της βιομάζας

Η βιομάζα αποτελεί τη μόνη φυσική πηγή ενέργειας με άνθρακα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων. Η βιομάζα θεωρητικά

θεωρηθεί ανανεώσιμη για το λόγο ότι απαιτείται μόνο μια σύντομη χρονική περίοδος για να αναπληρωθεί ό,τι χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ενέργειας. Χρησιμοποιούνται σχετικοί όροι για τις διάφορες τελικές χρήσεις. Για παράδειγμα, ο όρος "βιοσχύς" περιγράφει τα συστήματα που χρησιμοποιούν πρώτες ύλες βιομάζας αντί των συνήθων ορυκτών καυσίμων (φυσικό αέριο, άνθρακας, πετρέλαιο) για ηλεκτροπαραγωγή, ενώ ως "βιοκαύσιμα" αναφέρονται κυρίως τα υγρά καύσιμα μεταφορών που υποκαθιστούν πετρελαϊκά προϊόντα, π.χ. βενζίνη ή ντίζελ.

Ένα από τα βασικά πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι αφενός ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει αφετέρου ενέργεια αποθηκευμένη με χημική μορφή αυτό της δίνει τη δυνατότητα να μετατρέπεται σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων, με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας. Σαν πλεονέκτημά της καταγράφεται και το ότι κατά την παραγωγή και την μετατροπή της δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα. Από την άλλη, σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία και χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, λόγω χαμηλής πυκνότητας και υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνεπάγονται περισσότερες δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευσή της σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει υψηλό.

Η έρευνα και η τεχνολογική πρόοδος έχουν αναπτυχθεί τόσο πολύ προωθώντας τις τεχνολογίες ενεργειακής μετατροπής της βιομάζας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι προοπτικές της βιοενέργειας αυξάνονται συνεχώς και ειδικά στις πιο προηγμένες οικονομικά χώρες, αναμένεται να καλύπτεται σημαντικό τμήμα της ενεργειακής παραγωγής μελλοντικά [5].

#### **1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα της βιομάζας**

Στα πλεονεκτήματα της βιομάζας περιλαμβάνονται:

- Η χρήση της βιομάζας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με έκλυση μεγάλης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Συνέπεια αυτού είναι η χρήση της να μη συμβάλει και να μην επιβαρύνει τη δημιουργία φαινομένου του θερμοκηπίου. Το γεγονός αυτό αποτιμάτε ως μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ). Η ποσότητα που εκλύεται απορροφάται και πάλι από τα φυτά, δημιουργώντας έναν αέναο κύκλο ανανέωσης της ενέργειας.
- Η όξινη βροχή δημιουργείται από τις εκπομπές καυσίμων που περιέχουν διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ). Η ύπαρξη θείου στις εκπομπές από την καύση των βιοκαυσίμων είναι σχεδόν ανύπαρκτη, γι αυτό θεωρούμαι ότι η χρήση τους δεν συμβάλλει στη δημιουργία του φαινομένου της όξινης βροχής.
- Στη χώρα μας κατά βάση εισάγονται οι πρώτες ύλες για την παραγωγή ενέργειας. Η βιομάζα είναι ένα προϊόν το οποίο παράγεται στη χώρα μας. Συνεπώς η χρήση της οδηγεί σε απεξάρτηση από την εισαγωγή πρώτης ύλης

καυσίμων, εξοικονομούνται χρήματα με αποτέλεσμα να έχουμε βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου.

- Για την παραγωγή της βιομάζας είναι απαραίτητη η απασχόληση των αγροτικών περιοχών σε νέες εναλλακτικές καλλιέργειες και τομείς. Συνέπεια αυτού έχουμε την αύξηση της απασχόλησης, και την ύπαρξη κινήτρων για τους κατοίκους ώστε να παραμένουν στην περιοχή τους, καθώς και την προέλευση και άλλων ανθρώπων για απασχόληση στις αγροτικές περιοχές. Αποτέλεσμα είναι η γενικότερη ανάπτυξη οικονομική και κοινωνική στις περιοχές αυτές.
- Είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [6].

Από την άλλη, η χρήση βιομάζας συνδέεται με ορισμένα μειονεκτήματα, όπως:

- Η βιομάζα καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο και έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υγρασία, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό δημιουργεί δυσχέρειες στην ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας.
- Η εποχιακή παραγωγή και διασπορά αποτελεί δυσχέρεια στην συνεχή τροφοδότηση των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας σε πρώτη ύλη.
- Με βάση τα παραπάνω επιβαρύνεται το κόστος ενεργειακής αξιοποίησης, διότι παρουσιάζονται προβλήματα εξ αιτίας της συλλογής, μεταφοράς και αποθήκευσης της βιομάζας.
- Σε σχέση με τις παραδοσιακά καύσιμα η βιομάζα απαιτεί για την μετατροπή της, σύγχρονες και βελτιωμένες τεχνολογίες οι οποίες έχουν υψηλό κόστος εξοπλισμού [6] .

## Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στα Βιοκαύσιμα

Τα βιοκαύσιμα ικανοποιούν την ανάγκη για χρήση εναλλακτικών και ανανεώσιμων καυσίμων η οποία γίνεται όλο και περισσότερο πιο επιτακτική. Τα στερεά, υγρά και αέρια καύσιμα που προέρχονται από βιομάζα αποτελούν τα βιοκαύσιμα. Ένας ορισμός που δίνεται για τα βιοκαύσιμα είναι ότι είναι εκείνα τα καύσιμα που περιέχουν τουλάχιστον κατά 80% κατά όγκο υλικά που προήλθαν από φυτικούς ή ζωικούς οργανισμούς και η συγκομιδή τους έγινε το πολύ 10 χρόνια πριν από την επεξεργασία τους. Τα βιοκαύσιμα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις μεταφορές καθώς πρόκειται να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και την εξάρτηση από εισαγόμενες πηγές ενέργειας [2].

Το πιο κοινό βιοκαύσιμο είναι το βιοντίζελ ή μεθυλεστέρας, που παράγεται κυρίως από ηλιόσπορους (ηλίανθος, ρέβα) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με ντίζελ σε ντιζελοκινητήρες. Η βιοαιθανόλη παράγεται από ζάχαρη, σελλουλόζη και άμυλο (σιτάρι, καλαμπόκι, σόργο, ζαχαρότευτλα) και χρησιμοποιείται ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με βενζίνη σε ειδικά τροποποιημένους κινητήρες. Επίσης, μπορεί να μετατραπεί σε αιθυλο-τριτοταγής-βουτυλαιθέρας (ETBE), ένα πρόσμιγμα βενζίνης που είναι περισσότερο φιλικό στο περιβάλλον από τις σημερινές εναλλακτικές λύσεις [7].

Ακόμα ένα πλεονέκτημα της χρήσης της βιομάζας ως βιοκαύσιμο, είναι η ευελιξία της. Τα βιοδιυλιστήρια μπορούν να επεξεργαστούν μεγάλη ποικιλία βιομάζας προς παραγωγή βιοκαυσίμων. Δηλαδή η παραγωγή δεν εξαρτάται από μία πρώτη ύλη αλλά παρέχεται η ελευθερία επεξεργασίας άλλων ειδών, με αποτέλεσμα την σταθεροποίηση της τιμής των βιοκαυσίμων, αντίθετα από τα συμβατικά καύσιμα που εξαρτώνται από δευτερογενείς παράγοντες (δυσκολία διύλισης, αναταραχές στις χώρες όπου γίνεται η διύλιση)[8].

Οι κανονισμοί της ΕΕ ορίζουν ότι τα κράτη μέλη θα πρέπει να αντικαταστήσουν το 20% των μεταφορικών καυσίμων με βιώσιμα βιοκαύσιμα μέχρι το 2020. Η Ελλάδα έχει δεσμευτεί να συμμορφωθεί με τους κανονισμούς αυτούς.

## 2. Είδη Βιοκαυσίμων

### 2.1. Βιοντίζελ

#### 2.1.1 Ορισμός του βιοντίζελ

Το biodiesel (ή όπως αλλιώς ονομάζεται μεθυλεστέρας) αποτελείται από μια ομάδα εστεροποιημένων φυτικών ελαίων, λιπαρών οξέων και μεθυλικών εστέρων που παράγονται από διάφορους φυτικούς ιστούς που περιέχουν έλαια. Θεωρείται εναλλακτική πηγή καυσίμου και υποκατάστατο του κοινού πετρελαίου γιατί προέρχεται είτε από φυτικές είτε από ζωικές πρώτες ύλες (π.χ. ζωικό λίπος). Μερικά παραδείγματα αναφερόμενοι στις φυτικές πρώτες ύλες είναι οι ενεργειακές

καλλιέργειες, είτε ετήσιες (π.χ. ελαιοκράμβη, ηλίανθος, σόγια), είτε πολυετείς (π.χ. φοίνικες, καρυδιές).

Το βιοντίζελ θεωρείται ένα εναλλακτικό υγρό καύσιμο μηχανών εσωτερικής καύσης, το οποίο είναι φιλικό προς το περιβάλλον και εκπέμποντας μικρά ποσοστά ρύπων (διοξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα) με αποτέλεσμα να μειώνονται οι κίνδυνοι για την υγεία του ανθρώπου. Επίσης έχει θετικές συνέπειες όταν χρησιμοποιείται ως πρόσμεικτο στους κινητήρες γιατί έχει αυξημένη διαλυτική ικανότητα και δεν αφήνει κατάλοιπα στον κινητήρα. Το κόστος ανέρχεται σήμερα γύρω στα 0,5 ευρώ ανά λίτρο καυσίμου και η τιμή του καθορίζεται από την πρώτη ύλη που έχει χρησιμοποιηθεί, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, το μέγεθος και το είδος της εγκατάστασης παραγωγής αλλά και από τις διάφορες επιμέρους διεργασίες που έχει υποστεί.

Η σύγχρονη παραγωγή βιοντίζελ ξεκίνησε στην Αυστρία το 1982 και από το 1990 ξεκίνησε η πιο εμπορική χρήση και εξαπλώθηκε στις υπόλοιπες χώρες της κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης (Γερμανία, Γαλλία, Δανία κ.α.). Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται είναι η ελαιοκράμβη για τις χώρες της Βόρειας Ευρώπης και αντίστοιχα για τις νότιες είναι ο ηλίανθος. Στην Ελλάδα χρησιμοποιείται σαν κύρια πρώτη ύλη το βαμβάκι για την παραγωγή του βιο-πετρελαίου όμως έχει αυξηθεί και η παραγωγή βιοντίζελ από ηλίανθο σε τάξης μεγέθους 50 λίτρα ανά στρέμμα. [9]

Στους παρακάτω πίνακες που ακολουθούν αποτυπώνεται η παραγωγή του βιοντίζελ στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις χρονιές 2002 και 2003 και το δυναμικό παραγωγής του βιοντίζελ μέσω των ενεργειακών καλλιεργειών της ελαιοκράμβης και του ηλίανθου. Από τον πίνακα 2 είναι αντιληπτό ότι το μεγαλύτερο κομμάτι παραγωγής το κατέχει η Γερμανία και η Γαλλία και για τις δύο χρονιές. Στον πίνακα 3 στην παραγωγή του βιοντίζελ μέσω της ελαιοκράμβης πρώτη χώρα είναι το Βέλγιο και ακολουθεί η Γαλλία με 1343 λίτρα ανά εκτάριο αντίστοιχα για τον ηλίανθο πρωτοπορεί η Ιταλία και ακολουθεί η Γερμανία με 1116 λίτρα ανά εκτάριο.

**Πίνακας :** Παραγωγή βιοντίζελ στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Πηγή: Eurostat

Χώρα - μέλος	2002	2003
Γερμανία	450.000	715.000
Γαλλία	366.000	357.000
Ιταλία	210.000	273.000
Δανία	10.000	41.000
Αυστρία	25.000	32.000
Ηνωμένο Βασίλειο	3.000	9.000
Ισπανία	0	6.000
Σουηδία	1.000	1.000
Τσεχία	68.800	70.000
Σύνολο Ε.Ε. - 25	1.133.000	1.504.000



**Πίνακας 2:** Δυναμικό παραγωγής βιοντίζελ στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Πηγή: Biomass Technology Group 2004.

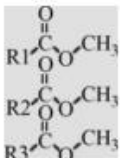
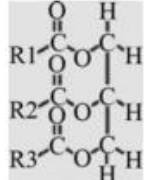
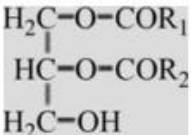
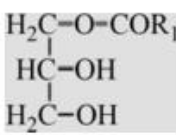
Χώρα - μέλος	Ελαιοκράμβη		Ηλίανθος	
	Λίτρα ανά εκτάριο	Τόνοι ισόποσου πετρελαίου ανά εκτάριο	Λίτρα ανά εκτάριο	Τόνοι ισόποσου πετρελαίου ανά εκτάριο
Αυστρία	1055	0,84	113	0,09
Βέλγιο	1360	1,08	-	-
Γερμανία	1327	1,05	1116	0,88
Δανία	1193	0,94	-	-
Ελλάδα	-	-	500	0,40
Ισπανία	608	0,48	429	0,34
Φιλανδία	540	0,43	-	-
Γαλλία	1343	1,06	1041	0,82
Ιρλανδία	1287	1,02	-	-
Ιταλία	1023	0,81	1156	0,92
Ολλανδία	1298	1,03	-	-
Πορτογαλία	-	-	340	0,27
Σουηδία	846	0,67	-	-
Ηνωμένο Βασίλειο	1188	0,94	-	-
Τσεχία	1105	0,88	961	0,76
Εσθονία	536	0,42	-	-
Ουγγαρία	-	-	770	0,61
Λιθουανία	662	0,52	-	-
Λετονία	627	0,5	-	-
Πολωνία	923	0,73	-	-
Σλοβακία	607	0,48	777	0,62

Ως Βιοντίζελ (Biodiesel), ορίζεται το προερχόμενο από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη καύσιμο, το οποίο αποτελείται από εστέρες μακριάς ανθρακικής αλυσίδας λιπαρών οξέων, οι οποίοι παράγονται με τη διεργασία της μετεστεροποίησης (transesterification) με μικρής ανθρακικής αλυσίδας αλκοόλες. Οι συγκεκριμένοι εστέρες έχουν συναφείς φυσικές ιδιότητες με το πετρελαϊκό προερχόμενο ντίζελ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως καύσιμο στις μεταφορές έναντι του πετρελαίου κίνησης.

Αντίθετα με ότι έχει επικρατήσει στην καθημερινή γλώσσα, ο όρος βιοντίζελ εκφράζει μια πολύ συγκεκριμένη ομάδα χημικών ενώσεων τους μεθυλεστέρες των ανώτερων λιπαρών οξέων οι οποίοι προέρχονται από οργανικά έλαια και όχι οποιοδήποτε καύσιμο οργανικής προέλευσης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες ντίζελ. Το γεγονός ότι οι μεθυλεστέρες προέρχονται από πρώτες ύλες οργανικής βάσης, οι οποίες είναι ανανεώσιμες, δικαιολογεί το χαρακτηρισμό τους ως βιοκαύσιμο. Δύο συνήθεις χημικοί τύποι του βιοντίζελ είναι:  $C_{19}H_{34}O_2$  (μεθυλικό λινελαϊκό) και  $C_{20}H_{40}O_2$  (και αιθυλικό στεατικό). Ο συνήθης χημικός τύπος για το κοινό ντίζελ είναι  $C_{12}H_{23}$  [10]. Στον πίνακα 4 που ακολουθεί φαίνονται οι διάφορες χημικές δομές των διάφορων εστέρων και ακολουθούν συνοπτικά οι φυσικές ιδιότητες του βιοντίζελ στον πίνακα 5.



**Πίνακας 3:** Χημική δομή διάφορων εστέρων [10].

Τριγλυκερίδια λίπους και λαδιού	Διγλυκερίδια	Μονογλυκερίδια	Βιοντήζελ/ Μεθυλεστέρες	Ντίζελ
				C <sub>12</sub> H <sub>23</sub>

**Πίνακας 4:** Φυσικές ιδιότητες του βιοντίζελ [10].

Φυσικές ιδιότητες του βιοντήζελ	
Κοινή ονομασία	Βιοντήζελ
Κοινή χημική ονομασία	Λιπαρά οξέα μεθυλ /αιθυλ- εστέρων
Εύρος χημικού τύπου	C14–C24 μεθυλεστέρες ή C15–25H28–48O2
Εύρος κινηματικού ιξώδους (mm <sup>2</sup> /s, στους 313 K)	3.3–5.2
Εύρος πυκνότητας (kg/m <sup>3</sup> , στους 288 K)	860–894
Εύρος σημείου βρασμού (K)	>457
Εύρος σημείου ανάφλεξης (K)	420–450
Εύρος απόσταξης (K)	470–600
Τάση ατμών (mm Hg, στους 295 K)	<5
Διαλυτότητα στο νερό	Αδιάλυτο στο νερό
Φυσική εμφάνιση	Ανοιχτό με σκούρο κίτρινο, καθαρό υγρό
Οσμή	Ελαφριά μουχλιασμένη και σαπωνώδης οσμή
Βιοδιασπασιμότητα	Πιο βιοδιασπώμενο από το πετρελαϊκό ντήζελ
Δραστικότητα	Σταθερό, αλλά να αποφεύγονται να δυνατά μέσα οξείδωσης

### 2.1.2 Ιδιότητες και Καύση

Εκτός από το γεγονός ότι το βιοντίζελ πλεονεκτεί ως ανανεώσιμο καύσιμο, εμφανίζει παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες με το συμβατικό ντίζελ. Το βιοντίζελ παρουσιάζει μικρότερο σημείο ανάφλεξης  $64^{\circ}\text{C}$  σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ  $150^{\circ}\text{C}$  οπότε το καθιστά ασφαλέστερο στη χρήση, πολύ μικρότερη περιεκτικότητα θείου αλλά μεγαλύτερη λιπαντική ικανότητα λόγω του οξυγόνου που περιέχει και μεγαλύτερο αριθμό κετανίου.

Το βιοντίζελ έχει καλές λιπαντικές ιδιότητες συγκρινόμενο με το πετρελαϊκό ντίζελ και συγκεκριμένα με το ντίζελ πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Αυτό είναι και το πιο σημαντικό του πλεονέκτημα γιατί μειώνονται οι φθορές στη μηχανή και στο σύστημα έγχυσης. Στα ορυκτά καύσιμα προσπαθούν να μειώσουν την περιεκτικότητα σε θείο, όμως με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι λιπαντικές ενώσεις του υδρογονοεπεξεργασμένου προϊόντος και κατ' επέκταση μειώνεται η λίπανση του κινητήρα και αντίστοιχα και ο χρόνος ζωής του. Τα διυλιστήρια προκειμένου να αντιμετωπίσουν το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιούν πανάκριβα και ταυτόχρονα μη βιοαποικοδομήσιμων πρόσθετα για την επαναφορά της λιπαντικότητας του καυσίμου. Η προσθήκη, όμως, του βιοντίζελ στο πετρελαϊκό ντίζελ ακόμα και σε περιεκτικότητες μικρότερες ακόμη και από 1% κ.β. επαναφέρει τη λιπαντική ικανότητα του καυσίμου, με αποτέλεσμα να παρατείνεται η ζωή του πετρελαιοκινητήρα, να προστατεύεται το περιβάλλον από τα πρόσθετα λίπανσης και ταυτόχρονα να εξοικονομούνται αρκετά χρήματα [11].

Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα του βιοντίζελ σε οξυγόνο (~11%) συμβάλλει σημαντικά στην απόδοση της καύσης. Επιπρόσθετα, η χρήση βιοντίζελ μπορεί να επιμηκύνει το χρόνο ζωής της μηχανής καθώς έχει καλύτερες λιπαντικές ιδιότητες από ότι το ορυκτό ντίζελ. Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) του βιοντίζελ είναι σχετικά υψηλή. Η HHV του βιοντίζελ (39-41 MJ/kg) είναι ελαφρώς χαμηλότερη από αυτή της βενζίνης (46 MJ/kg), του ορυκτού ντίζελ (43 MJ/kg) αλλά υψηλότερη από τον άνθρακα (32-37 MJ/kg) [12, 13].

Ο αριθμός κετανίου (CN) χρησιμοποιείται ευρέως ως μια παράμετρος ποιότητας των καυσίμων ντίζελ. Σχετίζεται με τον χρόνο καθυστέρησης ανάφλεξης και την ποιότητα καύσης. Ένας μεγάλος αριθμός κετανίου δείχνει καλύτερες ιδιότητες ανάφλεξης. Ο αριθμός κετανίου μετριέται από την μέθοδο ISO 5156, η οποία συνιστάται και για ντίζελ και για βιοντίζελ με κατώτερα όρια 46 και 51 αντίστοιχα. Παρόλα αυτά μπορεί να γίνει και θεωρητική εκτίμηση του αριθμού κετανίου χωρίς να γίνονται εκτενείς δοκιμές σε μηχανές. Ο αριθμός κετανίου του βιοντίζελ ποικίλει από 48 (βιοντίζελ από σταφύλι) έως 61 (βιοντίζελ από φοίνικα) αναλόγως από την πηγή προέλευσής του. Ο μεγαλύτερος αριθμός κετανίου που παρουσιάζει το βιοντίζελ έναντι του συμβατικού ντίζελ αντισταθμίζει το γεγονός ότι κατά την καύση του το βιοντίζελ απελευθερώνει λίγο μικρότερη ενέργεια από την ενέργεια που απελευθερώνει το συμβατικό ντίζελ. Έτσι, η απόδοση ενός πετρελαιοκινητήρα που κινείται με καθαρό βιοντίζελ κυμαίνεται τουλάχιστον στα επίπεδα του συμβατικού ντίζελ. Επίσης, το βιοντίζελ είναι κατάλληλο για τους ήδη υπάρχοντες πετρελαιοκινητήρες, όπου δεν χρειάζεται να γίνει σχεδόν καμία μετατροπή ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί αμιγές βιοντίζελ [14,15].

Η βιοδιασπασιμότητα του βιοντίζελ έχει προταθεί ως λύση για το πρόβλημα των απορριμμάτων. Βιοδιασπώμενα καύσιμα, όπως το βιοντίζελ, έχουν ένα επεκταμένο εύρος πιθανών εφαρμογών και είναι και φιλικά προς το περιβάλλον. Για αυτό υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα διασπώμενα καύσιμα ντίζελ, τα οποία διασπώνται πιο γρήγορα από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Το βιοντίζελ δεν είναι τοξικό και διασπάται γύρω στις τέσσερις φορές πιο γρήγορα από το πετρελαϊκό ντίζελ. Η περιεκτικότητά του σε οξυγόνο βελτιώνει της διεργασία της βιοδιάσπασης, οδηγώντας σε ένα αυξημένο επίπεδο γρήγορης βιοδιάσπασης. Οι μεθυλεστέρες των φυτικών ελαίων αναφέρεται να είναι μη τοξικοί και εύκολα βιοδιασπώμενοι σε υδατικό περιβάλλον [12].

Η άντληση, η αποθήκευση και ο χειρισμός του βιοντίζελ μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ίδια υποδομή, μηχανήματα και διεργασίες που χρησιμοποιούνται και στα συμβατικά καύσιμα ντίζελ. Καθώς το βιοντίζελ δεν παράγει εκρηκτικούς ατμούς και έχει σχετικά υψηλό σημείο ανάφλεξης, η μεταφορά, η επεξεργασία και η αποθήκευση είναι ασφαλέστερη από το ορυκτό ντίζελ. Πολλές έρευνες δείχνουν πως το βιοντίζελ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μηχανές ντίζελ για εκτεταμένο χρονικό διάστημα, ενώ έχουν γίνει πειράματα με γερανούς, λεωφορεία πόλης, μεγάλα φορτηγά και τρακτέρ με μείγματα ντίζελ/βιοντίζελ σε διάφορες περιεκτικότητες [11].

Οι μεθυλεστέρες των λιπαρών οξέων έχουν σημαντικά μικρότερο ιξώδες σε σχέση με τα τριγλυκερίδια με το κινηματικό τους ιξώδες να είναι παρόμοιο με αυτό του ντίζελ. Οι μεθυλεστέρες έχουν μοριακά βάρη της τάξης των  $280 - 300 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ , δηλαδή το 1/3 των μοριακών βαρών των ελαίων. Επίσης, ο αριθμός κετανίου των μεθυλεστέρων είναι υψηλός και σε ορισμένες περιπτώσεις υψηλότερος και από αυτόν του ντίζελ. Αποτέλεσμα του χαμηλότερου μοριακού τους βάρους είναι ότι οι μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων είναι πτητικότεροι των τριγλυκεριδίων, κάτι που συμβάλει στην καλύτερη συμπεριφορά του καυσίμου σε συνθήκες ψύχους (χαμηλότερο σημείο θόλωσης και ροής). Το σημείο ανάφλεξης τους είναι υψηλότερο του ντίζελ. Οι κύριες ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των μεθυλεστέρων (βιοντίζελ) διαφόρων φυτικών ελαίων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 5:** Ιδιότητες και χαρακτηριστικά μεθυλεστέρων φυτικών ελαίων [11].

Μεθυλεστέρες προερχόμενοι από	Πυκνότητα στους 20 °C g / L	Κινηματικό ιξώδες στους 40°C mm <sup>2</sup> / s	Αριθμός Κετανίου	Α.Θ.Δ. kJ / kg	Σημείο ανάφλεξης °C
<b>Φοινικέλαιο</b>	870	4.75	62	37800	158
<b>Σογιέλαιο</b>	890	4.1	50	32800	163
<b>Ηλιέλαιο</b>	885	4.2	51	38450	170-174
<b>Κραμβέλαιο</b>	883	4.5	53	36700	160
<b>Βαμβάκέλαιο</b>	883	4.2	52	40600	169-172
<b>Ζωικό λίπος</b>	873-877	5.3 – 6.8	-	40230	172
<b>Λινέλαιο</b>	890	3.7	52	33000	-
<b>Ντίζελ</b>	832	2.72	52.5	44900	67.7

Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, διαπιστώνεται πως το βιοντίζελ έχει χαρακτηριστικά που βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτά του πετρελαϊκού ντίζελ. Τα σημεία στα οποία υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ του βιοντίζελ και του πετρελαϊκού ντίζελ είναι στις ψυχρές ιδιότητες όπως το σημείο θόλωσης και σημείο ροής στις οποίες το βιοντίζελ έχει υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ και στο σημείο ανάφλεξης που στην περίπτωση του βιοντίζελ είναι αρκετά υψηλότερο από το αντίστοιχο του ντίζελ. Το ιξώδες του βιοντίζελ είναι ελάχιστα μεγαλύτερο του ντίζελ και ουσιαστικά δεν επιφέρει καμία ουσιαστική διαφορά στο χειρισμό του.

Κατά την περίοδο 2005 – 2011 η κατανάλωση του βιοντίζελ εμφάνισε εντυπωσιακή άνοδο της τάξης του 266,26%, που αντιστοιχεί σε μέσο ετήσιο ρυθμό μεταβολής ίσο με 44,38% (Πίνακας 7). Η εντυπωσιακή αυτή άνοδος οφείλεται στο αυξανόμενο ποσοστό διείσδυσης του βιοντίζελ στην ελληνική αγορά, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του 5,75% σε βιοντίζελ στο ντίζελ κίνησης που διακινείται στην ελληνική επικράτεια. Από τον ίδιο πίνακα παρατηρείται αύξηση της ζήτησης πετρελαίου κίνησης για την περίοδο 2005 – 2011 της τάξης του 17,2% και αντιστοιχεί σε μέσο ετήσιο ρυθμό μεταβολής 2,9%.

**Πίνακας 6:** Εγχώρια Ζήτηση Βιοντίζελ (2005 – 2011). Πηγή: Article 4, Directive 2003/30/ EC , ΚΥΑ Κατανομής για τα έτη 2008 – 2011, 6<sup>η</sup> Εθνική Έκθεση, 2010, [www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr)

Έτος	Εκτιμώμενη Κατανάλωση Πετρελαίου Κίνησης για Χρήση στις Μεταφορές (χιλ. τόνοι)	Απαιτήσεις σε Βιοντίζελ	
		(%)	(τόνοι)
2005	2.116	2	42.320
2006	2.161	3	64.830
2007	2.206	4	88.240
2008	2.251	4,5	101.295
2009	2.375	5	118.750
2010	2.427	5,75	139.550
2011	2.480	6,25	155.000

Σύμφωνα με μια μελέτη των Ελληνικών Διυλιστηρίων, η απελευθέρωση της πετρελαιοκίνησης, θα οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης του πετρελαίου της τάξης του 7,5%, αύξηση που θα μπορέσει να καλυφθεί εύκολα. Μεγάλο αντίκτυπο στις ισορροπίες της ελληνικής αγοράς αυτοκινήτου θα έχει μια ενδεχόμενη απελευθέρωση των αυτοκινήτων ντίζελ σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη, αν και σύμφωνα με το Σύνδεσμο Εισαγωγέων – Αντιπροσώπων Αυτοκινήτου, το ποσοστό των πωλήσεων ντίζελ αρχικά δεν θα ξεπεράσει το 3 – 5% (10.000 – 15.000 αυτοκίνητα ετησίως). Εξίσου θετική αναμένεται η εικόνα της συνολικής εγχώριας ζήτησης βιοντίζελ για την περίοδο μέχρι το έτος 2020, καθώς η προσπάθεια της χώρας μας να εναρμονισθεί με τον στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης του 10% σε

βιοκαύσιμα για τις μεταφορές μέχρι το 2020, θα οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης του βιοντίζελ.

Η πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης σε πετρέλαιο κίνησης και βιοντίζελ για την χρονική περίοδο 2012 – 2020 απεικονίζεται στον πίνακα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι απαιτήσεις σε βιοντίζελ προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εκτιμώμενης κατανάλωσης πετρελαίου κίνησης για χρήση στις μεταφορές και του ποσοστού διείσδυσης του βιοντίζελ, με ετήσια αύξηση της τάξης του 7%, σύμφωνα με τους στόχους που έχει θέσει η Ελλάδα και προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του 10% σε βιοκαύσιμα για τις μεταφορές μέχρι το 2020 [16].

**Πίνακας 7:** Πρόβλεψη Εγχώριας Ζήτησης Βιοντίζελ (2012 – 2020) [16].

Έτος	Εκτιμώμενη Κατανάλωση Πετρελαίου Κίνησης για Χρήση στις Μεταφορές (τόνοι)	Απαιτήσεις σε Βιοντίζελ	
		(%)	(τόνοι)
2012	2.577.430	6,2	159.800
2013	2.666.430	6,6	175.980
2014	2.760.980	7,1	196.030
2015	2.861.070	7,6	217.440
2016	2.966.710	8,1	240.300
2017	3.077.910	8,7	267.780
2018	3.194.640	9,3	297.100
2019	3.316.930	10	331.690
2020	3.444.760	10,7	368.590

### 2.1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα βιοντίζελ

Ορισμένα από τα **πλεονεκτήματα** που χαρακτηρίζουν το βιοντίζελ, είναι τα ακόλουθα:

- Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που παράγεται από τη καύση του βιοντίζελ είναι τόσο όσο έχουν απορροφήσει προηγουμένως από την ατμόσφαιρα τα φυτά που χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή του. Επομένως, το βιοντίζελ όπως και λοιπά βιοκαύσιμα δεν επιφέρει αύξηση των συγκεντρώσεων του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, άρα και στην επέκταση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Είναι βιοαποικοδομήσιμο. Σε περίπτωση διαρροής του δε μολύνει το έδαφος, το υπέδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα.
- Περιέχει μικρές ποσότητες θείου (max. 10 mg / kg), πότε κατά την καύση του δεν παράγονται σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του θείου, (αέριο υπεύθυνο για την όξινη βροχή).
- Λόγω καλύτερης καύσης, τα καυσαερίά του περιέχουν λιγότερο αιθάλη και αιωρούμενα σωματίδια.

- Έχει αυξημένη λιπαντική ικανότητα με αποτέλεσμα να συμβάλει στη καλύτερη λίπανση του κινητήρα, πρόβλημα ιδιαίτερα έντονο τελευταία, λόγω της μείωσης του θείου στο πετρελαϊκό ντίζελ.
- Έχει “απορρυπαντικές” ιδιότητες καθώς μειώνει τα κατάλοιπα της καύσης, τις επικαθίσεις δηλαδή στον κινητήρα.
- Συμβάλει στη μείωση της εξάρτησης μίας χώρας από εισαγόμενα καύσιμα και στη βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου.
- Συμβάλει στην τόνωση και ανάπτυξη της αγροτικής οικονομίας μέσω των ενεργειακών καλλιεργειών.
- Με σύγχρονες μεθόδους μπορεί να μετατραπούν σε βιοντίζελ απόβλητα έλαια και λίπη (π.χ. τηγανέλαια, χαμηλής ποιότητας ζωικά λίπη, λίπη από λιποσυλλέκτες) τα οποία έως σήμερα κατέληγαν και μόλυναν τον υδροφόρο ορίζοντα.

**Τα μειονεκτήματα** του βιοντίζελ έχουν να κάνουν κυρίως με οικονομικές παραμέτρους, όπως:

- Το υψηλό κόστος τελικού βιοκαυσίμου (βιοντίζελ) σε σχέση με το αρκετά φθηνότερο ντίζελ. Σε αυτό συμβάλει το υψηλό κόστος της πρώτης ύλης (ελαίων και λιπών).
- Καταστροφή οικοσυστημάτων για την καλλιέργεια φτηνών τροπικών ελαιούχων φυτών όπως π.χ. φοινικέλαιο.
- Παραγωγή γλυκερίνης ως παραπροϊόν.
- Κατανάλωση μεθανόλης για την παραγωγή του.

Για την αντιμετώπιση των τριών πρώτων προβλημάτων απαιτείται η στόχευση της βιομηχανίας αλλά και της κοινωνίας σε διεργασίας παραγωγής φτηνότερου βιοντίζελ, διεργασίες αξιοποίησης απόβλητων ελαίων και λιπών ως πρώτες ύλες και διεργασίες συνεκμετάλλευσης των παραπροϊόντων όπως η γλυκερίνη.

#### 2.1.4 Η παραγωγή του βιοντίζελ και η διεργασία μετεστεροποίησης

Η κυρίαρχη μέθοδος παραγωγής του βιοντίζελ είναι η μετεστεροποίηση των λιπαρών οξέων των φυτικών ελαίων και των λιπών. Η διαχείριση και η εκμετάλλευση της γλυκερόλης που λαμβάνεται ως παραπροϊόν από τη διεργασία αποτελεί σημείο-κλειδί στην καλή λειτουργία της μονάδας.

Μέχρι σήμερα έχουν μελετηθεί τέσσερις μέθοδοι παραγωγής βιοντίζελ με στόχο, κυρίως, την επίτευξη μείωσης του υψηλού ιξώδους των φυτικών ελαίων, ώστε αυτά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους κοινούς κινητήρες ντίζελ χωρίς τα προαναφερθέντα προβλήματα λειτουργίας, όπως για παράδειγμα εκείνα που σχετίζονται με τις επικαθίσεις στον κινητήρα. Αυτές οι μέθοδοι είναι οι εξής:

- ανάμιξη (blending) λαδιού με πετρελαϊκό ντίζελ
- πυρόλυση (pyrolysis)
- μικρογαλακτωματοποίηση (microemulsification)
- μετεστεροποίηση (transesterification).

### **Ανάμιξη λαδιού με πετρελαϊκό ντίζελ**

Τα φυτικά έλαια μπορούν να αναμιχθούν με καύσιμα ντίζελ και να χρησιμοποιηθούν απευθείας στην μηχανή. Η άμεση χρήση καθαρού φυτικού λαδιού και μίγματά του με ντίζελ θεωρούνται γενικώς μη ικανοποιητικά και μη πρακτικά για άμεσες και έμμεσες μηχανές ντίζελ, καθότι εξακολουθούν να ισχύουν τα μειονεκτήματα των ακατέργαστων φυτικών ελαίων. Έχει αποδειχθεί πως η χρήση 100% φυτικού ελαίου είναι επίσης εφικτή με κάποιες μικρές αλλαγές στο σύστημα καύσης. Μεγαλύτερα προβλήματα έχουν παρουσιαστεί στις μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση, κυρίως λόγω του αυξημένου ιξώδους [11].

### **Πυρόλυση**

Πυρόλυση είναι η μετατροπή μίας οργανικής ουσίας σε μία άλλη με την χρήση θερμότητας ή με θερμότητα υπό την παρουσία ενός καταλύτη. Το πυρολυόμενο υλικό μπορεί να είναι φυτικό έλαιο, ζωικό λίπος, φυσικά λιπαρά οξέα ή μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων. Η πυρόλυση λίπους έχει μελετηθεί για πάνω από 100 χρόνια ειδικά στις περιοχές που υπάρχει έλλειψη αποθέματος πετρελαίου. Πολλοί έχουν μελετήσει την πυρόλυση τριγλυκεριδίων για να αποκτήσουν προϊόντα κατάλληλα για μηχανές ντίζελ. Η θερμική αποσύνθεση των τριγλυκεριδίων παράγει αλκάνια, αλκένια, αλκαδιένια, αρωματικά και καρβοξυλικά οξέα [11].

### **Μικρογαλακτωματοποίηση**

Τα μικρογαλακτώματα είναι ισοτροπικά, διαφανή ή ημιδιαφανή, θερμοδυναμικά σταθερές διασπορές λαδιού, νερού, μιας επιφανειοδραστικής ουσίας και συχνά ενός αμφιφιλικού μορίου, ονομαζόμενου συν-επιφανειοδράστης. Ένα μικρογαλάκτωμα μπορεί να δημιουργηθεί από φυτικά έλαια με εστέρες και συνδιαλύτη (διασπορά) ή από φυτικά έλαια, μία αλκοόλη και έναν επιφανειοδράστη, με ή χωρίς καύσιμο ντίζελ. Λόγω της περιεκτικότητας τους σε αλκοόλη, τα μικρογαλακτώματα έχουν χαμηλότερες τιμές ογκομετρικής θέρμανσης από τα καύσιμα ντίζελ, αλλά οι αλκοόλες έχουν υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και έχουν την τάση να ψύχουν τον θάλαμο συμπίεσης, το οποίο μειώνει την εξανθράκωση στο ακροφύσιο. Ένα μικρογαλάκτωμα μεθανόλης με φυτικό λάδι μπορεί να αποδώσει σχεδόν τόσο καλά όσο και το ντίζελ [11].

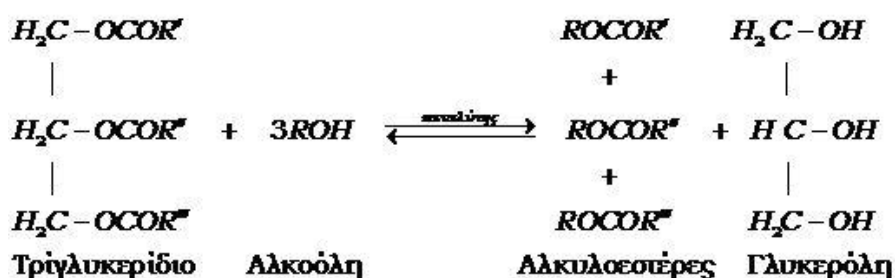
### **Μετεστεροποίηση**

Η τελευταία είναι η πιο κοινή και ευρύτερα εφαρμοσμένη μέθοδος. Η μέθοδος αυτή συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις προηγούμενες διεργασίες. Σημειώνεται πως μόνο μέσω της αντίδρασης της μετεστεροποίησης οδηγούμαστε στα προϊόντα εκείνα που χαρακτηρίζονται ως βιοντίζελ. Η μέθοδος παραγωγής βιοντίζελ που εφαρμόζεται παγκόσμια σε βιομηχανικό επίπεδο είναι αυτή της αλκοόλυσης (μετεστεροποίησης) των τριγλυκεριδίων που αποτελούν το κύριο συστατικό των φυτικών ελαίων και ζωικών λιπών. Τα τριγλυκερίδια μετατρέπονται σε διγλυκερίδια και αυτά με τη σειρά τους σε μονογλυκερίδια τα οποία είναι μεθυλ- ή αιθυλ-εστέρες. Στην κατηγορία των μεθυλεστέρων εντάσσονται η μεθανόλη και η αιθανόλη και χρησιμοποιούνται συχνά λόγω του χαμηλού κόστους και γιατί έχουν την ιδιότητα να διαλύονται εύκολα στα τριγλυκερίδια και στο οξείδιο του νατρίου ενώ αντιδρούν γρήγορα μεταξύ τους. Οι καταλύτες χρησιμοποιούνται για την βελτίωση του ρυθμού και της απόδοσης της αντίδρασης. Η αντίδραση καταλύεται από βάσεις, οξέα και ένζυμα και πραγματοποιείται σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι παράγονται μεθυλεστέρες των λιπαρών οξέων, που συνιστούν



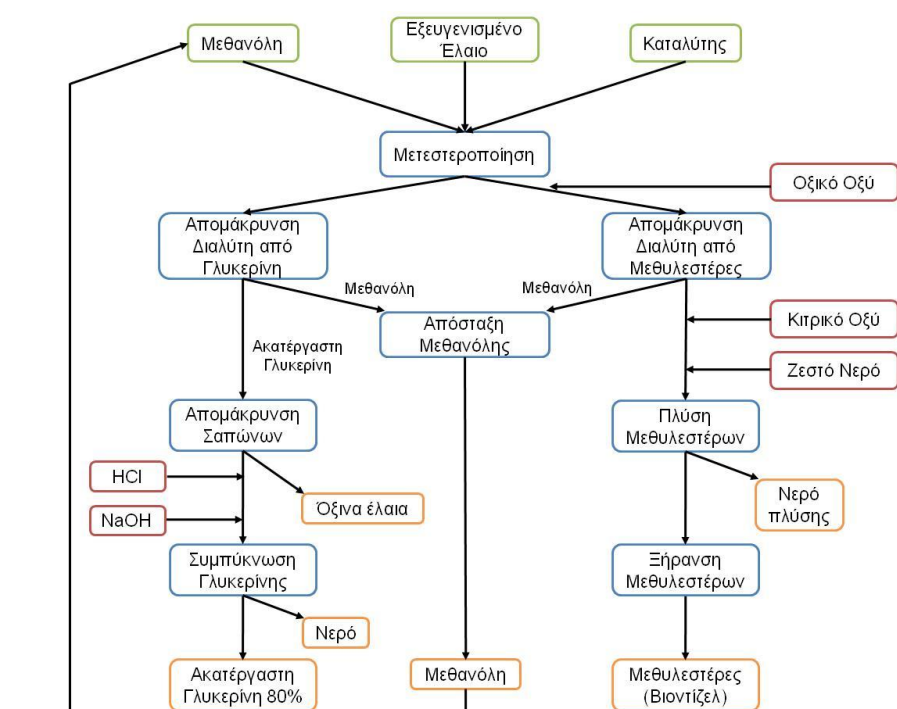
το βιοντίζελ, και γλυκερόλη ως παραπροϊόν. Η αλκαλική καταλυτική μετεστεροποίηση χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή βιοντίζελ γιατί τα αλκαλικά μεταλλικά αλκοξείδια και υδροξείδια είναι πιο αποτελεσματικά από τους όξινους καταλύτες. Τα καλύτερα αποτελέσματα τα δίνουν τα μεθοξείδια του νατρίου και του καλίου.

Ακολούθως δίνεται η αντίδραση μετεστεροποίησης των τριγλυκεριδίων όπου τα R', R'' και R''' είναι μακριές αλυσίδες που περιέχουν άτομα άνθρακα και υδρογόνου (αλυσίδες λιπαρών οξέων):



Κατά την αντίδραση αυτή σχηματίζονται δι- και μονο- ακυλ-γλυκερόλες ως ενδιάμεσα προϊόντα. Στο ακόλουθο διάγραμμα δίνεται ποιοτικά η συσχέτιση της μετατροπής των αλκυλεστέρων και των ενδιάμεσων προϊόντων με το χρόνο αντίδρασης της μετεστεροποίησης. Σημειώνεται πως παρατηρούνται διαφορές αναλόγως των συνθηκών της αντίδρασης.

Στην ακόλουθη εικόνα δίνεται ένα τυπικό **διάγραμμα ροής** της βιομηχανικής παραγωγής βιοντίζελ, με μετεστεροποίηση βασικής κατάλυσης από πρώτες ύλες χαμηλής περιεκτικότητας σε ελεύθερα λιπαρά οξέα.



**Διάγραμμα 1:** Διάγραμμα ροής για την παραγωγή βιοντίζελ. Πηγή: [17]



Αναλύοντας τη διεργασία που περιγράφεται στο ανωτέρω διάγραμμα ροής, πρέπει πρώτα να αναφερθεί πως η αλκοόλη, ο καταλύτης και το έλαιο αναμιγνύονται σε έναν αντιδραστήρα και αναδεύονται για μια ώρα στους 60°C περίπου. Μικρότερες εγκαταστάσεις συχνά χρησιμοποιούν αντιδραστήρες ασυνεχούς λειτουργίας (batch reactors), αλλά οι περισσότερες μεγάλες εγκαταστάσεις (αυτές που παράγουν περισσότερα από 4 εκατομ. lt/έτος) χρησιμοποιούν αντιδραστήρες συνεχούς λειτουργίας και πλήρης ανάδευσης. Η αντίδραση μερικές φορές περιλαμβάνει δύο βήματα: στο πρώτο στάδιο, προστίθεται το 80% της αλκοόλης και του καταλύτη στο λάδι. Στη συνέχεια, το ρεύμα παραγωγής του αντιδραστήρα οδηγείται για την απομάκρυνση της γλυκερίνης, προτού εισέλθει και το υπόλοιπο 20%. Το τελευταίο προστίθεται σε ένα δεύτερο αντιδραστήρα.

Μετά την αντίδραση, η γλυκερόλη διαχωρίζεται από τους μεθυλεστέρες. Λόγω της μικρής διαλυτότητας της γλυκερόλης στους εστέρες, ο διαχωρισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα και γρήγορα με τη βοήθεια μια δεξαμενής καταβύθισης ή με μια απλή φυγοκέντριση. Η ποσότητα της μεθανόλης που δεν έχει αντιδράσει, λειτουργεί ως διαλύτης με αποτέλεσμα να καθυστερεί το διαχωρισμό γλυκερόλης και μεθυλεστέρα. Ωστόσο, η περίσσεια μεθανόλης συνήθως δεν απομακρύνεται από το ρεύμα αντίδρασης μέχρι να γίνει ο πλήρης διαχωρισμός της γλυκερόλης και των μεθυλεστέρων, λόγω του ότι κατευθύνει την αντίδραση της μετεστεροποίησης προς τα προϊόντα (μεγαλύτερη μετατροπή). Συχνά, μετά την ολοκλήρωση της μετεστεροποίησης, προστίθεται νερό στο μίγμα της αντίδρασης για να καταστεί ο διαχωρισμός της γλυκερόλης ευκολότερος.

Σε σχετικές έρευνες, αναφέρεται πως είναι δυνατόν να αντιδράσει το λάδι με την μεθανόλη απουσία καταλύτη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ανάγκη του πλυσίματος με νερό. Σ' αυτή όμως την περίπτωση απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες και μεγάλη περίσσεια της μεθανόλης. Επίσης, έχει διαπιστωθεί δυσκολία στην αναπαραγωγή της κινητικής της αντίδρασης, γεγονός που έχει αποδοθεί σε διάφορες καταλυτικές δράσεις στην επιφάνεια των αντιδραστήρων (φαινόμενο που επιτείνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας). Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί πως σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση (περίπου 90 bar, 240°C αντίστοιχα) δύναται η μετεστεροποίηση των λιπών χωρίς να απαιτείται προηγουμένως απομάκρυνση ή μετατροπή των ελεύθερων λιπαρών οξέων. Παρόλ' αυτά, οι περισσότερες εγκαταστάσεις παραγωγής βιοντίζελ λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, υπό ατμοσφαιρική πίεση και με μεγαλύτερους χρόνους αντίδρασης με σκοπό να μειώσουν το κόστος εξοπλισμού.

Συνεχίζοντας στο διάγραμμα ροής, μετά τον διαχωρισμό της γλυκερόλης το μίγμα μεθυλεστέρων εξουδετερώνεται και στη συνέχεια διαχωρίζεται από τις προσμίξεις με τη βοήθεια απόσταξης υπό κενό ή εξάτμισης, πριν την πλύση του με νερό. Για την εξουδετέρωση του βιοντίζελ προστίθεται ένα οξύ, το οποίο εξουδετερώνει υπολείμματα του καταλύτη (εφόσον αυτός είναι βασικός) και διαχωρίζει τυχόν κατάλοιπα σαπώνων που μπορεί να έχουν παραχθεί κατά την αντίδραση. Οι σάπωνες αντιδρούν με το οξύ σχηματίζοντας υδρόφιλα άλατα και λιπαρά οξέα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση



### Σαπούνι + λιπαρό οξύ → οξύ + άλας

Τα άλατα απομακρύνονται κατά τη διάρκεια του πλυσίματος, ενώ τα ελεύθερα λιπαρά οξέα παραμένουν στο βιοντίζελ. Η έκπλυση με το νερό έχει ως στόχο την απομάκρυνση τυχόν υπολειμμάτων καταλύτη, σαπουνιού, αλατιού, μεθανόλης ή ελεύθερης γλυκερίνης από το βιοντίζελ. Η εξουδετέρωση πριν την έκπλυση μειώνει την ποσότητα του νερού που χρειάζεται και ελαχιστοποιεί την τάση για παραγωγή γαλακτωμάτων. Μετά την έκπλυση, το νερό που έχει μείνει στο βιοντίζελ απομακρύνεται με απόσταξη υπό κενό.

Τα ρεύμα της γλυκερόλης απομακρύνεται από τον διαχωριστή με περιεκτικότητα σε γλυκερίνη περίπου 50%. Περιέχει ένα μέρος της περίσσειας της μεθανόλης και το μεγαλύτερο μέρος του καταλύτη και του σάπωνα. Σε αυτή τη μορφή, η γλυκερόλη έχει μικρή αξία και η διάθεσή της στην αγορά θεωρείται δύσκολη. Σε αυτή την ποσότητα της μεθανόλης η γλυκερόλη επεξεργάζεται ως επικίνδυνο απόβλητο. Το πρώτο βήμα για την αύξηση της καθαρότητας της γλυκερόλης αποτελεί ο εξευγενισμός της, κατά τον οποίο προστίθεται οξύ για να μετατραπούν οι σάπωνες σε ελεύθερα λιπαρά οξέα και άλατα. Τα ελεύθερα λιπαρά οξέα δεν είναι διαλυτά στη γλυκερόλη και διαχωρίζονται στην κορυφή του μίγματος (ανώτερη στοιβάδα), όπου μπορούν να απομακρυνθούν και να ανακυκλωθούν. Τα εν λόγω λιπαρά οξέα μπορούν να εστεροποιηθούν και τότε να εισαχθούν στο ρεύμα της αντίδρασης της μετεστεροποίησης. Τα άλατα παραμένουν στη γλυκερόλη. Όταν καυστικό κάλιο χρησιμοποιείται ως καταλύτης και φωσφορικό οξύ για την αντίδραση εξουδετέρωσης, τότε παράγεται φωσφορικό κάλιο, ένα άλας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Μετά την οξίνιση και την απομάκρυνση των ελεύθερων λιπαρών οξέων, απομακρύνεται και η περιεχόμενη, στη γλυκερόλη, μεθανόλη μέσω διεργασίας εκτόνωσης υπό κενό ή μέσω ενός άλλου τύπου εξατμιστήρα. Κατόπιν αυτών, παράγεται γλυκερόλη καθαρότητας περίπου 85%, που συνήθως μπορεί να πωληθεί σε μονάδα εξευγενισμού γλυκερόλης. Εκεί, με απόσταξη υπό κενό ή με διεργασία ιοντοεναλλαγής, η καθαρότητά της μπορεί να ανέλθει σε 99,5-99,7%.

Η μεθανόλη, η οποία απομακρύνεται από τα ρεύματα του μεθυλεστέρα και της γλυκερόλης θα «συλλέξει» το νερό που παρήχθη κατά τη διεργασία. Αυτό το νερό θα πρέπει να οδηγηθεί σε μια αποστακτική στήλη, προτού η μεθανόλη επιστρέψει στη διεργασία. Αυτό το στάδιο είναι πιο δύσκολο, αν η χρησιμοποιούμενη αλκοόλη είναι η αιθανόλη ή η ισοπροπανόλη, καθώς δημιουργείται αζεότροπο με το νερό. Στην περίπτωση αυτή, για την απομάκρυνση του νερού χρησιμοποιείται ένα μοριακό κόσκινο [17].

Γενικά, προτιμώνται οι βασικοί καταλύτες λόγω της ικανότητάς τους να ολοκληρώνουν την αντίδραση σε μεγαλύτερες ταχύτητες, της απαίτησής τους για χαμηλότερες θερμοκρασίες αντίδρασης και της υψηλότερης απόδοσης μετατροπής σε σύγκριση με τους όξινους καταλύτες. Η αντίδραση με όξινους καταλύτες είναι παρόμοια με την αλκαλική αντίδραση, αλλά εδώ το αλκοολικό αντιδρών τροφοδοτείται σε περίσσεια ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός μετατροπής. Αυτή η αντίδραση γίνεται στους 55 – 80°C. Ένας άλλος τύπος αντίδρασης για μετεστεροποίηση είναι ο ενζυμικός και χρησιμοποιείται λιπάση στις αντιδράσεις

υδρόλυσης, αλκοόλυσης και οξειδόλυσης. Το πλεονέκτημα σε αυτή τη μέθοδο είναι η ευκολία του διαχωρισμού των προϊόντων. Το κόστος όμως των βιοκαταλυτών είναι αρκετά μεγάλο και δεν είναι επομένως ακόμα μια βιώσιμη διεργασία εμπορικής παραγωγής βιοντίζελ.

Στον πίνακα 9 αναφέρεται αναλυτικά η οικονομική ανάλυση των καλλιεργειών του βιοντίζελ παραγόμενο από την ενεργειακή καλλιέργεια της ελαιοκράμβης και του ηλίανθου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κέρδος πριν από την επιδότηση των καλλιεργειών είναι αρνητικό επομένως ο παραγωγός έχει ζημία και μόνο έπειτα από την χρηματοδότηση υπάρχει μικρό περιθώριο κέρδους προ φόρων και τόκων.

**Πίνακας 8:** Οικονομική ανάλυση καλλιεργειών βιοντίζελ [18].

	Ελαιοκράμβη Αρδευ.	Ελαιοκράμβη Ξηρ.	Ηλίανθος Αρδευ.	Ηλίανθος Ξηρ.
Αποδόσεις (κιά/στρ)	300	180	300	175
Τιμή (€/τόνο)	400	400	250	250
Ακαθάριστο εισόδημα (€/στρ)	120	72	75	43,75
Ενοίκιο εδάφους	28,50	12,00	28,50	12,00
Όργωμα	9,00	9,00	9,00	9,00
Προετοιμασία Εδάφους	10,00	10,00	5,00	5,00
Λίπανση	29,32	29,32	4,00	4,00
Σπορά	13,20	13,20	8,40	8,40
Ζιζανιοκτονία	9,20	9,20	4,60	4,60
Σκαλίσματα	6,20	6,20	6,20	6,20
Αρδευση	10,00		10,00	
Συγκομιδή	9,00	9,00	9,00	9,00
Λοιπές				
Συνολικό Κόστος Παραγωγής (€/στρ)	124,42	97,92	84,69	58,19
Κέρδος προ επιδοτήσεων (€/στρ)	-4,42	-25,92	-9,69	-14,44
Επιδοτήσεις (€/στρ)	29,39	29,39	29,39	29,39
Κέρδος προ φόρων και τόκων (€/στρ)	24,97	3,47	19,70	14,95

## 2.2. Pellet (Πελλετ)

### 2.2.1 Ορισμός του Pellet

Τα pellets είναι συσσωματώματα βιομάζας ξυλώδους μορφής. Η πρώτη ύλη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τους είναι τα υπολείμματα επεξεργασίας ξύλου καθώς και τα δασικά και γεωργικά υπολείμματα. Τα pellet χαρακτηρίζονται από υψηλή συνοχή, έχουν κυλινδρικό σχήμα και μήκος 30 - 40 χιλιοστά (μπορεί και μεγαλύτερο) και διάμετρο 6-8 χιλιοστά. Τα pellet έχουν επίσης πολύ χαμηλή υγρασία, περίπου 8-10% και μεγάλη πυκνότητα, συνήθως μεγαλύτερη

$>650\text{kg/m}^3$ . Τα pellet είναι λοιπόν στερεά καύσιμα που παράγονται με επεξεργασία βιομάζας. Δεν χρησιμοποιούνται χημικά προϊόντα κατά την επεξεργασία τους, παρά μόνο υψηλή πίεση και ατμός. Αυτό σημαίνει πως το διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται κατά την καύση τους απορροφάται από τα φυτά στη διαδικασία ανάπτυξής τους γι' αυτό και θεωρείται ως το μοναδικό καύσιμο με μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η νέα μορφή ενέργειας χρησιμοποιείται ευρέως σε όλον τον κόσμο με ιδιαίτερα αυξητικούς ρυθμούς, συμβάλλοντας έτσι στη μερική απεξάρτηση από το πετρέλαιο καθώς και των στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2010 και 2020 για περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου [19].

Τα τελευταία 10 χρόνια, η παγκόσμια κατανάλωση pellet παρουσιάζει ετήσια αύξηση άνω του 20%. Αυτό είναι αποτέλεσμα της τάσης για απεξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, καθώς και της αφύπνισης της οικολογικής συνείδησης στη σύγχρονη κοινωνία. Πέρα του οικιακού τομέα στην οποία παρουσιάζει άνθηση, ήδη και μεγάλες βιομηχανίες, ασβεστοποιείες, θερμοκήπια, χυτήρια, βαφεία και πολλά αρτοποιεία έχουν ήδη εγκαταστήσει λέβητες pellet [19].

Οι λέβητες Pellet είναι μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στους συμβατικούς λέβητες οι οποίοι χρησιμοποιούν είτε αέρια (προπάνιο, φυσικό αέριο) είτε υγρά καύσιμα (πετρέλαιο). Εκτός από την θέρμανση, οι λέβητες pellet μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή ζεστού νερού.

Παρατηρώντας τα τελευταία χρόνια την ανεξέλεγκτη άνοδο της τιμής του πετρελαίου θέρμανσης και παράλληλα την καταστροφή του πλανήτη μας, είναι ανάγκη πλέον να στραφούμε στην χρήση οικονομικών αλλά και οικολογικών καυσίμων.

### 2.2.2 Παραγωγή του Pellet

Η απλούστερη μέθοδος μετατροπής της ποώδους βιομάζας σε μια πιο εύχρηστη και αποδοτική καύσιμη ύλη είναι η ξήρανση, ακολουθούμενη από συμπίεση, οδηγώντας στην παραγωγή πυκνών συσσωματωμάτων. Οι δύο βασικοί τύποι είναι οι μπρικέτες και οι πελέτες (pellets) έχουν σχήμα κυλινδρικό αλλά διαφορετικών διαστάσεων και πυκνότητας. Στην περίπτωση των δασικών ξυλωδών, η μηχανική επεξεργασία περιλαμβάνει και την κατάτμησή της σε μικρά κομμάτια (πλακίδια ή θρύμματα ξύλου – wood chips).

#### **Μορφές δασικής βιομάζας [20]:**

**Πλίνθοι ή μπρικέτες.** Παράγονται με έκθλιψη μέσω συμπίεσης, μικρών ποσοτήτων βιομάζας, ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία που περιέχουν και να σπάσουν οι ελαστικές της ίνες. Αν αυτό δεν γίνει σωστά, η βιομάζα τείνει να ανακαταλάβει τον αρχικό της όγκο. Η συμπίεση πραγματοποιείται σε θερμοκρασία  $80^{\circ}\text{--}120^{\circ}\text{C}$  και πίεση  $180\text{--}250\text{ kg/cm}^2$  με κοχλιοφόρες ή υδραυλικές πρέσες. Στις συνθήκες αυτές, οι φαινόλες που περιέχονται στην βιομάζα βοηθούν στην συμπίκνωσή της, δρώντας ως φυσικά συγκολλητικά. Υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις φυτών όπου δεν

επιτυγχάνεται συγκόλληση με αυτόν τον τρόπο, και γι' αυτό προστίθεται κερί από εξωτερική πηγή. Οι μπρικέτες που παράγονται με αυτήν την μέθοδο, συνήθως έχουν παραλληλεπίπεδη ή κυλινδρική μορφή με διαστάσεις 6 εκατ. διαμ. x 8 εκατ. μήκος, δεκαπλάσια πυκνότητα από την αρχική βιομάζα – 650 ως 750 kg/m<sup>3</sup> έναντι 50 ως 70 kg/m<sup>3</sup> – και διατηρούν αυτά τα χαρακτηριστικά παρά τις καταπονήσεις που υφίστανται κατά την μεταφορά, την αποθήκευση και την διαδικασία τροφοδοσίας των θαλάμων καύσης τους.

**Πελέτες ή συσσωματώματα.** Η παραγωγή των πελετών βιομάζας, είναι μια διαδικασία συμπύκνωσης με διέλαση (extrusion) που έχει τελικό προϊόν μικρούς κυλίνδρους διαμέτρου < 25mm (συνήθως 6-12mm), ύψους 10-12mm και μειωμένης υγρασίας (6-8%). Οι πελέτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν σαν καύσιμο για την παραγωγή ατμού από θερμικές μονάδες. Διακρίνονται τα εξής στάδια επεξεργασίας:

- Η βιομάζα ξηραίνεται ώστε να μειωθεί η υγρασία στο επιθυμητό ποσοστό (κάτω του 10%).
- Στην συνέχεια εισέρχεται σε ειδικό μηχάνημα (pulverizer) που αλέθει και κονιορτοποιεί την ξηραμένη βιομάζα σε ένα συγκεκριμένο μέγεθος σωματιδίων.
- Ακολουθεί το στάδιο της διέλασης όπου η βιομάζα πιέζεται ώστε να περάσει μέσα από την διάτρητη έξοδο του εξωθητή (extruder).
- Οι ξηροί και θερμοί σβώλοι πλέον προωθούνται σε θάλαμο ψύξης με ρεύμα ψυχρού αέρα απ' όπου εξέρχονται έτοιμοι για αποθήκευση ή μεταφορά.

**Πλακίδια ή θρύμματα ξύλου (wood chips).** Είναι μικρά κομμάτια ξύλου που κόβονται από ειδικούς “μύλους” σε μέγεθος σπιρτόκουτου προέρχονται από άχρηστα κομμάτια ξύλου προερχόμενα από εργοστάσια παραγωγής ξυλείας και δένδρα ή τμήματα δένδρων που προέρχονται από υλοτομία δασών, διανοίξεις δρόμων, κ.λ.π.

Όταν τα πλακίδια παράγονται από άχρηστα κομμάτια ξύλου τότε παράγονται από στατικούς μύλους, συνήθως των ίδιων των βιομηχανιών ξυλείας και μπορούν να παραδωθούν άμεσα. Σε σπάνιες περιπτώσεις τα πλακίδια αποθηκεύονται σε μεταλλικά σιλό ή ακόμα και σε σωρούς στο ύπαιθρο ώστε να παραδοθούν αργότερα.

Όταν τα πλακίδια προέρχονται από δένδρα τότε, μεταφέρονται μέσω φορτηγών στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ή αλλιώς μέσω των κινητών μύλων σχηματίζονται σε πλακίδια επι τόπου και μεταφέρονται με τα φορτηγά απευθείας. Παρατηρούμε ομοιομορφίες όταν τα πλακίδια προέρχονται από υπολείμματα δένδρων τα οποία έχουν υποστεί προηγουμένως επεξεργασία αντίστοιχα ανομοιομορφίες συναντούμε όταν χρησιμοποιούνται ολόκληρα δένδρα [21].

Η μορφή των πλακιδίων βρίσκει χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποσότητα λόγω του γεγονότος ότι είναι φθηνότερα από τις πελέτες και το ξύλο και βρίσκει ανταπόκριση στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρισμού από βιομάζα, είτε απευθείας, είτε ύστερα από ένα δεύτερο στάδιο μετατροπής (π.χ. κονιορτοποίηση για χρήση σε καυστήρες αιωρούμενων σωματιδίων – suspension burners). Αποτελεί σημαντικό παράγοντα η ομοιομορφία των πλακιδίων γιατί αν τα κομμάτια είναι διαφορετικά από τα

πρότυπα της μηχανής τότε μπορεί να επιφέρει ζημιές και να σταματήσει προσωρινά η λειτουργία των συστημάτων. Γι' αυτό τον λόγο, οι εγκαταστάσεις παραγωγής wood chips είναι αναγκαίο να περιλαμβάνουν διαδικασίες αναγνώρισης των ελαττωματικών ή των μη συμμορφούμενων με τις προδιαγραφές τεμαχίων ώστε να απομακρύνονται από την διαδικασία ή να ανατροφοδοτούνται με σκοπό την επανακοπή τους.

### 2.2.3 Στάδια παραγωγής

#### *Μεταφορά και αποθήκευση των πρώτων υλών*

Το πρώτο στάδιο κάθε παραγωγικής διαδικασίας είναι η μεταφορά της πρώτης ύλης. Η μεταφορά γίνεται από κάποιου είδους εκφορτωτικό όχημα προκειμένου να τροφοτηθούν οι τεμαχιστές. Η προμήθεια των πρώτων υλών μπορεί να γίνει από μάντρες ξυλείας ή, ακόμα και από αγρότες που έχουν στην κατοχή τους εκτάσεις ελαιοδέντρων. Το επόμενο στάδιο είναι η αποθήκευση των πρώτων υλών. Στο στάδιο αυτό θα πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι ο χώρος της αποθήκευσης πρέπει να είναι κλειστός και ξηρός, έτσι ώστε η πρώτη ύλη να διατηρείτε στην όσο το δυνατόν καλύτερη κατάσταση.

#### *Τεμαχισμός*

Κατά την διαδικασία αυτή η πρώτη ύλη οδηγείτε σε έναν τεμαχιστή (σπαστήρα) με στόχο μια διάσταση εξόδου περίπου 3 εκ. Στο στάδιο αυτό του τεμαχισμού έχουμε τρεις υποπεριπτώσεις:

- την περίπτωση η πρώτη ύλη να είναι σε μορφή άκοπου ξύλου – κορμού δέντρου,
- την περίπτωση όπου η πρώτη ύλη είναι σε μορφή κλαδοκάθαρων,
- και τρίτον η περίπτωση η πρώτη ύλη να λαμβάνετε κατ' ευθείαν σε μορφή πριονιδιού.

Στην περίπτωση που έχουμε σαν πρώτη ύλη πριονίδια, εξαιρούνται από το στάδιο του τεμαχισμού εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους, και περνάνε αργότερα από τη διαδικασία του λεπτού τεμαχισμού, όπως και τα τεμαχισμένα πριονίδια που βγαίνουν από τα κλαδοκάθαρα και τα ξύλα. Για την υλοποίηση αυτής της διαδικασίας χρησιμοποιούνται τεμαχιστές κορμών αλλά και τεμαχιστές κλαδοκάθαρων για τη μείωση του μεγέθους του ξύλου της πρώτης ύλης σε πριονίδια. Πρόκειται για φορητούς τεμαχιστές, ρυμουλκούμενους από κάποιο όχημα για διευκόλυνσή και χρήση σε διαφορετικά μέρη.

#### *Διαχωρισμός*

Στο στάδιο αυτό διασφαλίζεται το σωστό μέγεθος των πριονιδιών, για τη σωστή και απροβλημάτιστη διεξαγωγή της παραγωγικής διαδικασίας αργότερα. Το υλικό που

είναι μικρότερο των 3 cm σε μήκος, περνάει από το κόσκινο και εξέρχεται από τον πάτο, συνεχίζοντας για το επόμενο στάδιο της γραμμής παραγωγής. Ενώ, τα μεγαλύτερα των 3 cm κομμάτια παραμένουν μέσα στο σιλό για να επιστρέψουν πάλι τον τεμαχιστή.

### *Ξηραντήριο*

Το κοσκινισμένο υλικό οδηγείται στο ξηραντήριο (συνήθως κυλινδρικό συνεχούς ροής) για να αποκτήσει την επιθυμητή υγρασία που είναι 15%. Τα ξηραντήρια λοιπόν τέτοιου τύπου αποτελούνται από:

- τον περιστροφικό κύλινδρο,
- το μηχανισμό – κινητήρα κίνησης του κυλίνδρου, και
- τον φυσητήρα ξηρού αέρα στον κύλινδρο.

Υπάρχει ένας κύλινδρος, ο οποίος περιστρέφεται, παίρνοντας κίνηση από τον κινητήρα, στις μικρές κατασκευές μπορεί να είναι και ηλεκτροκινητήρας ενώ στις μεγαλύτερες είναι κινητήρας εσωτερικής καύσης. Και στις δύο περιπτώσεις η κίνηση μεταδίδεται με γρανάζια και αλυσίδα (ή ιμάντα). Συνήθως στη μία άκρη του κυλίνδρου βρίσκεται ο κινητήρας, ενώ στην άλλη ο φυσητήρας όπου τροφοδοτεί τον κύλινδρο με τον ξηρό αέρα. Σύμφωνα λοιπόν με την ροή του αέρα, κατά την ίδια διεύθυνση γίνεται και η τροφοδοσία του κυλίνδρου με το πριονίδι. Έτσι, με την ροή του αέρα αλλά και την περιστροφή του κυλίνδρου η οποία δεν αφήνει το πριονίδι να κατακάθεται, εισέρχεται από τη μία μεριά και εξέρχεται από την άλλη με την υγρασία του στο επιθυμητό επίπεδο, περίπου στο 13 - 15%, κατάλληλο πλέον για να συνεχίσει στο επόμενο στάδιο. Υπάρχουν όμως και άλλου είδους ξηραντήρια, τα επίπεδα. Εκείνα που δεν έχουν περιστρεφόμενο κύλινδρο για τη λειτουργία τους, αλλά απλά έναν θάλαμο ξηρού αέρα. Το υλικό λοιπόν, σ' αυτή την περίπτωση βρίσκεται είτε πάνω σε μεταφορική ταινία, είτε με κάποιου είδους "ψεκασμό" περνάει μέσα από το θερμό θάλαμο, φτάνει στην επιθυμητή θερμοκρασία και υγρασία και εξέρχεται [21].

### *Σιλό*

Το υλικό που βγαίνει από το ξηραντήριο είναι έτοιμο για την παραγωγή pellets. Έπειτα μεταφέρεται στο σιλό που είναι η αποθήκη έτοιμης πρώτης ύλης προς συμπίεση. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να επιλεγεί κάποιο σιλό παρόμοιου τύπου και κατασκευής με εκείνο το σιλό που έχει το κόσκινό. Δεν είναι όμως απαραίτητο για κάθε μονάδα παραγωγής, όταν πρόκειται απλά για σιλό αποθήκευσης πριονιδιού έτοιμου για συμπίεση και παραγωγή Pellets.



### *Λεπτός Τεμαχισμός*

Πριν από την εισαγωγή του υλικού στην μηχανή παραγωγής, περνάει από άλλο ένα στάδιο τεμαχισμού, τον λεπτό τεμαχισμό ή Chipping. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ακόμα το μέγεθος του πριονιδιού σε κλίμακα περίπου 0,5 – 2,5 cm. Περίπου αυτό είναι το μέγεθος που απαιτεί η μηχανή παραγωγής για να γίνει η συμπίεση και το “Pelleting”.

### *Μηχανή Παραγωγής*

Από το σιλό με μεταφορικό κοχλία μεταφέρεται το υλικό, πριονίδι πλέον στη μηχανή συμπίεσης ή μηχανή παραγωγής (Pellet Mill), για την παραγωγή του τελικού μας προϊόντος, Pellet. Το πριονίδι, στη φάση αυτή, εισέρχεται στη μηχανή, όπου με τη βοήθεια κάποιου τυμπάνου ή σε άλλες περιπτώσεις κάποιου περιστρεφόμενου κυλίνδρου, συμπιέζεται για να μπει στις κατάλληλες θήκες (κελιά) και να πάρει την τελική κυλινδρική μορφή του. Ανάλογα με το είδος της μηχανής αναπτύσσονται πιέσεις από 20 - 300 Atm με αποτέλεσμα το παραπάνω υλικό να αποκτά διάμετρο 6– 8 mm, μήκος 10 – 50 mm, με λεία γυαλιστερή επιφάνεια.

### *Αφυγραντής*

Λόγω της τριβής κατά τη διάρκεια της παραγωγής, μέσα στη μηχανή παραγωγής, αναπτύσσεται στα Pellets υψηλή θερμοκρασία, περίπου 100°C. Η θερμοκρασία αυτή πρέπει να μειωθεί πριν αυτά συσκευαστούν. Αυτό επιτυγχάνεται στο στάδιο αυτό μέσα στον αφυγραντή, παίρνοντας αέρα από το περιβάλλον. Συνεπώς, η θερμοκρασία του τελικού προϊόντος πρέπει να είναι 5 – 10 βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επίσης σημαντική είναι και η υγρασία των Pellets. Το επίπεδο υγρασίας πρέπει βρίσκεται κάτω από το 8%.

### *Κόσκινο*

Σ’ αυτό το στάδιο, τα Pellets με μεταφορική ταινία, αφού εξέλθουν από τον αφυγραντή, οδηγούνται στο κόσκινο για να καθαριστούν από τη σκόνη και τα υπολείμματα πιθανόν θρυμματισμένων κομματιών, με αποτέλεσμα ένα ποιοτικό προϊόν προς διάθεση στην αγορά. Είναι το τελευταίο στάδιο πριν τη συσκευασία και την αποθήκευση. Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με κάποιου είδους κόσκινο με σήτα για τα θρυμματισμένα κομμάτια λόγω σφάλματος, αλλά και με ανεμιστήρα και με μαγνητικό φίλτρο για την κατακράτηση της σκόνης. Σε μερικές περιπτώσεις, ανάλογα με το είδος του κόσκινου αυτού, η σκόνη αυτή με κάποιο τρόπο συλλέγεται, επιστρέφεται στη μηχανή παραγωγής και επαναχρησιμοποιείται στη διαδικασία παραγωγής

### *Σιλό*

Από την έξοδο του αφυγραντή τα pellets οδηγούνται στο σιλό έτοιμα προς συσκευασία. Και σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιείται κάποιο σιλό για την προσωρινή αποθήκευσή τους, έτσι ώστε η μηχανή συσκευασίας να παίρνει την απαραίτητη ποσότητα που χρειάζεται.

#### *Ζυγιστική Μηχανή – Συσκευασία*

Από το σιλό μεταφέρονται τα pellets στην αυτόματη ζυγιστική - συσκευαστική μηχανή που τα ζυγίζει και τα συσκευάζει σε μικρούς σάκους των 5 kg – 25 kg, ή σε μεγάλους σάκους των 800 και 1000 kg. Το τελικό προϊόν είναι έτοιμο προς παράδοση στο κοινό που επιθυμεί να πληρώσει λιγότερο για την θέρμανση του σπιτιού του και συγχρόνως να προστατεύσει τον πλανήτη [22].

#### **2.2.4 Πλεονεκτήματα του Pellet**

Συνοπτικά τα κύρια πλεονεκτήματα του pellet είναι:

- **Πρακτικό**, αφού μεταφέρεται συσκευασμένο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με αυτόματο δοσομετρητή για την τροφοδοσία της φωτιάς.
- **Τυποποιημένο** καθώς έχουν αναπτυχθεί τεχνικές προδιαγραφές για τη μέγιστη απόδοσή τους (πυκνότητα  $>650\text{kg/m}^3$ , υγρασία  $<10\%$ , τέφρα 1% μεγ.) και μπορεί να αποθηκευτεί οπουδήποτε χωρίς να αλλοιώνεται, δεδομένου ότι προστατεύεται από τη συσκευασία του.
- **Αποδοτικό**, λόγω της σταθερής πυκνότητας, χαμηλής υγρασίας, χαμηλού κόστους μεταφοράς και αποθήκευσης.
- **Οικολογικό**, γιατί για τη δημιουργία του δεν απαιτείται να κοπούν δέντρα, καθώς παράγεται από απορριφθείσα ή ανακυκλώσιμη ξυλεία.
- **Καθαρή καύση**. Τα pellets δεν εκλύουν επικίνδυνα αέρια κατά την καύση τους λόγω της απουσίας χημικών κατά τη διαδικασία παραγωγής.
- **Οικονομικό**. Τα pellets είναι φθηνότερα από το πετρέλαιο θέρμανσης, φυσικό αέριο, ακόμα και από την ηλεκτρική ενέργεια και παρουσιάζουν σταθερή πορεία μεταβολής τιμών.

Αναλυτικότερα:

Το **ετήσιο κόστος θέρμανσης** με τη χρήση λέβητα βιομάζας [Ξυλοτεμαχιδίων (θρυμματισμένο ξύλο, πριονίδι) , Πλανιδιών (chips) , Συμπιεσμένων κυλινδρικών πέλλετ (pellet) ή Μπρικετών (briquettes)], είναι σημαντικά φτηνότερο σε σύγκριση με αυτό του πετρελαίου και της ηλεκτρικής ενέργειας (εξαιρείται η περίπτωση της αντλίας θερμότητας).

Η πιο οικολογική μέθοδος παραγωγής θερμότητας είναι η βιομάζα η οποία προέρχεται από δάση και υπολείμματα καλλιεργειών. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μεγάλες ποσότητες ξύλου οι οποίες είναι ακατάλληλες για την προοριζόμενη χρήση τους λόγω φθοράς ή παλαιότητας μερικά παραδείγματα αποτελούν παλιά έπιπλα ή παλιές ξύλινες κατασκευές. Η ξύλινη βιομάζα θα μπορούσε να καλύψει σε υψηλό βαθμό την ζήτηση γιατί είναι μια συνεχής διαδικασία και σε επαρκείς ποσότητες.

Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος θέρμανσης βιομάζας **δεν εκλύονται επικίνδυνα αέρια** κατά την καύση τους λόγω της απουσίας χημικών κατά τη διαδικασία παραγωγής. Το ξύλο δεν περιέχει θείο ή άζωτο και έτσι δεν επιβαρύνει στην δημιουργία της όξινης βροχής. Βοηθάει στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, της μόλυνσης εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα και κατά επέκταση, στη διατήρηση της βιοποικιλότητας των οικοσυστημάτων. Σημαντικό πλεονέκτημα της ξύλινης βιομάζας σε αντίθεση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ήλιος, αέρας), είναι το γεγονός ότι είναι διαθέσιμη όλο το 24ώρο, χωρίς να επηρεάζεται από ανεξέλεγκτους παράγοντες.

Η ξύλινη βιομάζα συμβάλει στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου όπως το μεθάνιο αν συνυπολογίσει κανείς τα αέρια που θα προέκυπταν από την ταφή ενός τέτοιου οργανικού υλικού. Το ισοζύγιο εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα είναι μηδενικό και αυτό εξηγείται γιατί ο άνθρακας που εμπεριέχεται στο ξύλο δεσμεύεται κατά την δημιουργία της οργανικής ύλης από την ατμόσφαιρα, στην οποία και επανέρχεται μετά την καύση. Επιτρέπει την μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και στην εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού, διότι η βιομάζα αποτελεί εγχώρια πηγή ενέργειας. Δημιουργούνται καινούργιες μορφές απασχόλησης και νέες θέσεις εργασίας για αγροτικούς και δασικούς πληθυσμούς, οι οποίοι θα έχουν τη δυνατότητα να απασχοληθούν στη συγκομιδή, συγκέντρωση, φύλαξη, μεταφορά της ξύλινης βιομάζας και συνεπώς θα αποφευχθεί η μεταφορά τους σε μεγάλα αστικά κέντρα.

Η βιομάζα αποτελεί ένα «φυσικό μέσο» αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα τα φυτά απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία και με μία διαδικασία τη φωτοσύνθεση τη μετατρέπουν σε ενέργεια. Αναλυτικότερα, οι φυτικοί οργανισμοί με τη βοήθεια του ήλιου και των θρεπτικών συστατικών του εδάφους μετατρέπουν το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας και το νερό σε σάκχαρα (υδρογονάνθρακες) και οξυγόνο. Οι υδρογονάνθρακες αποτελούν την αποθηκευμένη ενέργεια του φυτού.

Η παραγωγή του πέλλετ (Pellet) ή της μπρικέτας (briquettes) **είναι πλέον τυποποιημένη καθώς έχουν αναπτυχθεί τεχνικές προδιαγραφές για την μέγιστη απόδοσή τους** (πυκνότητα  $>650\text{kg/m}^3$ , υγρασία  $<10\%$ , τέφρα  $1\%$  μεγ.) και μπορεί να αποθηκευτεί οπουδήποτε χωρίς να αλλοιώνεται, δεδομένου ότι προστατεύεται από την συσκευασία του. Μεταφέρεται συσκευασμένο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δεξαμενή αποθήκευσης με αυτόματο τροφοδότη.

**Πρόκειται για πρώτη ύλη θέρμανσης, άκρως αποδοτική** λόγω της σταθερής πυκνότητας, χαμηλής υγρασίας, χαμηλού κόστους μεταφοράς και αποθήκευσης.

## 2.4. Βιοαιθανόλη

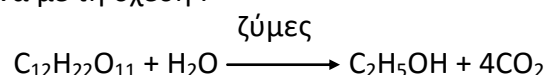
### 2.4.1 Ορισμός της βιοαιθανόλης

Η βιοαιθανόλη είναι ένα από τα πρώτα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν για να υποκαταστήσει τη βενζίνη. Ως βιοκάυσιμο είναι παράγωγο της επεξεργασίας της ζάχαρης. Εναλλακτικά ως πηγή ζάχαρης μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορα φυτά τα οποία περιέχουν υψηλή ποσότητα ζακχάρων ή αμύλου και ενδεικτικά αναφέρουμε τη μελάσα, τα σακχαρότευτλα, το καλαμπόκι, το γλυκό σόργο, την πατάτα. Σήμερα έχει αρχίσει η χρήση και κάποιων λιγνοκυτταρινούχων πρώτων υλών, όπως το ξύλο και το άχυρο.

Τρεις τύποι βιομάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό [23]:

- Σακχαρούχες ύλες
- Αμυλούχες ύλες
- Κυτταρινούχες ύλες.

Οι σακχαρούχες ύλες είναι οι πιο ελκυστικές για την παραγωγή αιθανόλης, καθώς περιέχουν σάκχαρα ζυμώσιμα σε αλκοόλη. Η μετατροπή της σουκρόζης σε αλκοόλη γίνεται σύμφωνα με τη σχέση :



Η αναερόβια ζύμωση πραγματοποιείται κυρίως από τη ζύμη *Saccharomyces cerevisiae*. Η ζύμωση σταματά όταν οι συγκεντρώσεις αλκοόλης στο ζυμούμενο διάλυμα πάνω από 10-12% καθιστούν απαγορευτικό τον μεταβολισμό των ζυμών και συνεπώς υψηλότερες συγκεντρώσεις αλκοόλης μέχρι 95% επιτυγχάνονται με απόσταξη. Στη συγκέντρωση 95% αιθανόλη και 5% νερό σχηματίζεται αζεοτροπικό μίγμα και συνεπώς με απόσταξη δεν μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες συγκεντρώσεις αιθανόλης.

Οι αμυλούχες πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αιθανόλης αφού όμως πρώτα έχει υδρολυθεί το άμυλο σε σάκχαρα και στη συνέχεια ζυμωθούν τα σάκχαρα. Η υδρόλυση του αμύλου μπορεί να είναι είτε ενζυματική παρουσία κατάλληλων μικροοργανισμών είτε όξινη σε pH 1,5 και στις 2 atm. Κυτταρινούχες πρώτες ύλες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή αιθανόλης αφού πρώτα υδρολυθεί η κυτταρίνη σε σάκχαρα. Η υδρόλυση μπορεί να είναι όξινη ή ενζυματική όπως στην περίπτωση του αμύλου, είναι όμως πιο δύσκολη και πιο δαπανηρή [24].

Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές απόδοσης σε αιθανόλη ενεργειακών φυτών πλούσιων σε υδατάνθρακες εν συγκρίσει με το ποσοστό των υδατανθράκων τους που μετατρέπονται σε σάκχαρα. Την μεγαλύτερη απόδοση ανά τόνο πρώτης ύλης την συγκεντρώνει το σιτάρι, ενώ ανά εκτάριο το ζαχαροκάλαμο. Στον πίνακα 11 συγκρίνονται τα διαφορετικά λιγνοκυτταρινούχα

είδη. Σύμφωνα με τις τιμές η μεγαλύτερη ποσότητα αιθανόλης παράγεται από το μαλακό ξύλο.

**Πίνακας 9:** Απόδοση σε αιθανόλη φυτών πλούσιων σε υδατάνθρακες [24].

Πρώτη ύλη	τόνοι / εκτάριο	Υδατάνθρακες %	Αιθανόλη	
			λ./τόνο	100λ./εκτάριο
Τεύτλα	40-50	16	90-100	38-48
Ζαχαροκάλαμο	50-100	13	60-80	35-70
Καλαμπόκι	4-8	60	360-400	15-30
Σιτάρι	2-5	62	370-420	8-20
Βρώμη	2-4	52	310-350	7-13
Σόργο	2-5	70	330-370	7-18
Πατάτες	20-30	18	100-120	22-23
Γλυκοπατάτα	10-20	25-27	140-170	16-31
Ταπioca	12-15	25-30	175-190	22-23
Καλοκάσι	30-60	16-18	80-100	27-54

**Πίνακας 10:** Απόδοση σε αιθανόλη λιγνο-κυτταρινούχων φυτών [24].

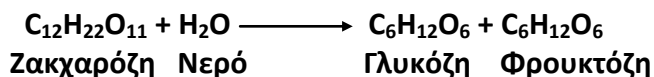
Πρώτη ύλη	τόνοι/εκτάριο	Αιθανόλη	
		λίτρα/τόνο	100 λίτρα/εκτάριο
Μαλακό ξύλο (αραιά οξέα) (πυκνά οξέα)	9-15	190-220	18-31
	9-15	230-270	22-38
Ξηρό ξύλο (αραιά οξέα) (πυκνά οξέα)	9-15	160-180	15-25
	9-15	190-220	18-30
Άχυρο (αραιά οξέα) (πυκνά οξέα)	1,5-3,5	140-160	2-5
	1,5-3,5	160-180	3-6

#### 2.4.2 Στάδια παραγωγής βιοαιθανόλης

Τρία είναι τα βασικά στάδια για την παραγωγή βιοαιθανόλης από τις προαναφερθείσες πρώτες ύλες [25]:

**Στάδιο επεξεργασίας:** Στο στάδιο αυτό γίνεται η επεξεργασία της πρώτης ύλης για την παρασκευή του ζαχαρούχου χυμού (σακχαροδιάλυμα), με συγκέντρωση σακχάρων περίπου 15-16% ν/ν. Το στάδιο αυτό διαφοροποιείται ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη. Στην περίπτωση των σακχαρούχων πρώτων υλών η προκατεργασία είναι απλή, και περιλαμβάνει πλύσιμο, τεμαχισμό, εκχύλιση και συμπίεση των πρώτων υλών προς παραγωγή του ζακχαροδιαλύματος. Αντίθετα στις αμυλούχες και κυτταρινούχες πρώτες ύλες απαιτείται η διαδικασία της υδρόλυσης, ώστε να διασπασθεί το άμυλο αφενός και η κυτταρίνη αφετέρου σε απλά σάκχαρα, τα οποία ζυμώνονται περαιτέρω προς βιοαιθανόλη.

**Στάδιο ζύμωσης:** Γίνεται ζύμωση του σακχαρούχου διαλύματος του προηγούμενου σταδίου προς αιθανόλη περιεκτικότητας περίπου 7,5 – 8 % v/v με τη βοήθεια ενζύμων. Τα ένζυμα προστίθενται στο διάλυμα, οποίο στη συνέχεια θερμαίνεται. Ένα από τα προστιθέμενα ένζυμα, αποκαλούμενο ιμπερτάση, ενεργεί ως καταλύτης και βοηθά στη μετατροπή της σακχαρόζης προς γλυκόζη και φρουκτόζη. Η χημική αντίδραση παρουσιάζεται παρακάτω:



Η φρουκτόζη και η γλυκόζη με την επίδραση ενός άλλου ενζύμου, της ζυμάσης, το οποίο περιλαμβάνεται επίσης στα προστιθέμενα ένζυμα, μετατρέπονται σε αιθανόλη και διοξείδιο του άνθρακα. Η διαδικασία ζύμωσης ολοκληρώνεται σε διάστημα περίπου τριών ημερών και πραγματοποιείται σε θερμοκρασία μεταξύ 25 °C και 30 °C. Κατά τη ζύμωση των σακχάρων το pH πρέπει να είναι περίπου 4-5. Η αλκοολική ζύμωση μπορεί να είναι διαλείπωντος έργου, ημισυνεχής ή συνεχής.

**Στάδιο διαχωρισμού:** Στο στάδιο αυτό διαχωρίζεται η αιθανόλη με κλασματική απόσταξη από το υπόλοιπο διάλυμα. Με την απόσταξη επιτυγχάνονται συγκεντρώσεις αιθανόλης μέχρι και 95%v/v. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αιθανόλης δε μπορούν να προκύψουν, αφού στη συγκεκριμένη συγκέντρωση σχηματίζεται αζεοτροπικό μίγμα αιθανόλης – νερού που δεν αποσπάει περαιτέρω. Στη συνέχεια, εφόσον είναι αναγκαίο, μπορεί να πραγματοποιηθεί αφυδάτωση του προϊόντος μέχρι συγκέντρωσης 99,5 % v/v.

Συνέπεια του δεύτερου και του τρίτου σταδίου επεξεργασίας της αιθανόλης είναι η ρύπανση λόγω των αποβλήτων της ζύμωσης και της απόσταξης γιατί συγκεντρώνουν υψηλό ρυπαντικό φορτίο και είναι δύσκολα στην επεξεργασία. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των αποβλήτων της επεξεργασίας του σακχαροκάλαμου έχουν αναπτυχθεί δύο μέθοδοι στην Βραζιλία η πρώτη αφορά τη συλλογή τους σε δεξαμενές και την εξάτμιση του νερού και η δεύτερη αφορά τη διασπορά τους υπό μορφή σπρέι σε καλλιέργειες σακχαροκάλαμου.

Το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής βιοαιθανόλης το κατέχουν οι ΗΠΑ και η Βραζιλία σε παγκόσμιο επίπεδο. Λόγω των κλιματολογικών συνθηκών ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται για την Βραζιλία το σακχαροκάλαμο, και στις ΗΠΑ το καλαμπόκι και η μελάσα. Επειδή το κόστος παραγωγής από τη χρήση σακχαρότευτλων κυμαίνεται από 0,32 έως 0,54 ευρώ ανά λίτρο βιοκαυσίμου και η τεχνολογία παραγωγής δεν έχει περιθώρια αύξησης της απόδοσης, υπάρχει μια τάση για την χρήση καινούργιων πρώτων υλών. Η τάση αυτή επικεντρώνεται στην ξυλική γεωργία γιατί το κόστος παραγωγής, είναι της τάξης των 0,2 ευρώ ανά λίτρο βιοκαυσίμου το οποίο πλεονεκτεί [27].

Αντίστοιχα στην Ευρωπαϊκή Ένωση λόγω κλιματολογικών συνθηκών οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως τα σακχαρότευτλα και το σιτάρι. Οι χώρες που έχουν μεγάλη παραγωγή και κατατάσσονται ψηλά είναι οι Γαλλία και η Ισπανία, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12).

Κύρια χρήση του βιοκαυσίμου είναι η ανάμειξη του με τη βενζίνη, για την παραγωγή αποδοτικότερων, οικονομικότερων και πιο φιλικών προς το περιβάλλον καυσίμων. Αξίζει να σημειωθεί ότι μία ανάμειξη αιθανόλης – βενζίνης σε ποσοστό μόλις 10% σε αιθανόλη, οδηγεί σε ένα καύσιμο μειωμένες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα έως και 30%, χωρίς παράλληλα να απαιτούνται τροποποιήσεις στο κινητήρα του αυτοκινήτου. Εφόσον αναμιχθεί η αιθανόλη σε μεγαλύτερο ποσοστό ή χρησιμοποιηθεί καθαρή αιθανόλη, απαιτούνται όμως μικρές αλλαγές στο κινητήρα του αυτοκινήτου [27]. Στον πίνακα 12 φαίνεται επίσης αναλυτικά το δυναμικό παραγωγής βιοαιθανόλης από μαλακό σιτάρι και από σακχαρότευτλα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η πρώτη χώρα που παράγει βιοαιθανόλη από μαλακό σιτάρι είναι η Ιρλανδία με 2.996 λίτρα ανά εκτάριο και αντίστοιχα από σακχαρότευτλα το Βέλγιο με 6.970 λίτρα ανά εκτάριο.

**Πίνακας 11:**Δυναμικό παραγωγής βιοαιθανόλης στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Πηγή: Biomass Technology Group 2004.

Χώρα - μέλος	Μαλακό σιτάρι		Σακχαρότευτλα	
	Λίτρα ανά εκτάριο	Τόνοι ισόποσου πετρελαίου ανά εκτάριο	Λίτρα ανά εκτάριο	Τόνοι ισόποσου πετρελαίου ανά εκτάριο
Αυστρία	1.792	0,92	6.677	3,42
Βέλγιο	2.847	1,46	6.970	3,57
Γερμανία	2.620	1,34	6.384	3,27
Δανία	2.561	1,31	6.399	3,28
Ελλάδα	9.16	0,47	4.926	2,52
Ισπανία	1.052	0,54	6.181	3,16
Φιλανδία	1.057	0,54	3.440	1,76
Γαλλία	2.554	1,31	7.980	4,09
Ιρλανδία	2.996	1,53	4.710	2,41
Ιταλία	1.637	0,84	4.346	2,23
Ολλανδία	2.839	1,45	6.472	3,31
Πορτογαλλία	499	0,26	5.234	2,68
Σουηδία	2.069	1,06	5.266	2,7
Ηνωμένο Βασίλειο	2.686	1,38	6.355	3,25
Τσεχία	1.568	0,8	4.982	2,55
Ουγγαρία	1.365	0,7	-	-
Λιθουανία	1.050	0,54	2.964	1,52
Λετονία	908	0,46	3.036	1,55
Πολωνία	1.215	0,62	3.555	1,82
Σλοβενία	1.330	0,68	4.040	2,07
Σλοβακία	1.360	0,7	3.486	1,78

## 2.5.Βιοαέριο

### 2.5.1 Ορισμός Βιοαερίου

Το βιοαέριο είναι ένα μίγμα αερίων, η σύσταση του οποίου εξαρτάται από τις πρώτες ύλες. Τα πιο σημαντικά συστατικά του βιοαερίου είναι το μεθάνιο, το διοξείδιο του άνθρακα, το άζωτο και το οξυγόνο, αλλά συναντώνται και υδρατμοί,

ίχνη υδρογόνου, αμμωνία και υδρόθειο. Το βιοαέριο είναι μία ιδιαίτερα ευέλικτη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Υπολείμματα – οργανικά απόβλητα από τη βιομηχανία τροφίμων, λύματα και κοπριά από γεωργοκτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις ή βιολογικά απόβλητα και λυματολάσπη δήμων – καθώς επίσης και ενεργειακές καλλιέργειες όπως από καλαμπόκι, χορτάρι, δημητριακά, ζαχαρότευτλα και πολλά άλλα ανανεώσιμα υποπροϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία εγκατάσταση παραγωγής βιοαερίου.

Διάφοροι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν τη βιομάζα σε βιοαέριο με μία σειρά βημάτων κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν τους υδρογονάνθρακες, τις πρωτεΐνες και τα λιπαρά. Άλλα συστατικά της βιομάζας, όπως άζωτο, φώσφορος, κάλιο και ασβέστιο παραμένουν αναλλοίωτα σ' αυτή τη διεργασία [28-31].

Ανάμεσα σε όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το βιοαέριο είναι με διαφορά η πιο ευέλικτη, καθώς συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα:

- μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό, θερμότητα και ατμό σε μονάδες συμπαραγωγής (συνδυασμένες μονάδες θερμότητας και ηλεκτρισμού)
- είναι ένα “τοπικό” προϊόν, το οποίο μπορεί να επιφέρει ενεργειακή αυτονομία
- μπορεί να αποθηκεύεται, ακόμα και για περιόδους ημερών και εβδομάδων.
- μπορεί να μεταφέρεται.
- μπορεί να αναβαθμιστεί σε προϊόν αντίστοιχης ποιότητας με το φυσικό αέριο και μπορεί να διοχετευτεί στο σύστημα διανομής φυσικού αερίου.

### 2.5.2 Χρήση Βιοαερίου

Λόγω της σημαντικής περιεκτικότητάς του σε μεθάνιο, το βιοαέριο είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί:

- ως καύσιμο σε μονάδες συμπαραγωγής για παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας,
- ως καύσιμο σε λέβητες, ατμολέβητες, αποτεφρωτήρες καθώς και για παραγωγή ψύχους.

Η παραγωγή θερμότητας μπορεί να καλύψει μέρος ή το σύνολο των ενεργειακών αναγκών μιας βιομηχανίας ή βιοτεχνίας καθώς και μονάδων πρωτογενούς παραγωγής, όπως π.χ. πτηνοτροφεία, χοιροστάσια, κλπ. Από την άλλη, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), να καλύψει ανάγκες κάποιας μονάδας ή και τα δύο. Η παραγωγή ψύχους γίνεται από ψυκτικές μονάδες που χρησιμοποιούν είτε την εκλυόμενη θερμική ενέργεια από το συγκρότημα συμπαραγωγής είτε το ίδιο το βιοαέριο ως πηγή ενέργειας.

### 2.5.3 Παραγωγή βιοαερίου από οργανικά υπολείμματα

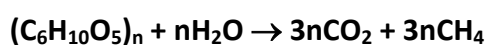
Το βιοαέριο προέρχεται μέσω της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης της βιομάζας. Η αναερόβια χώνευση της βιομάζας περιλαμβάνει τη μικροβιακή



αποδόμηση σύνθετων οργανικών μορίων προς απλούστερα μόρια και πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις :

- Τη φάση της υδρόλυσης
- Την όξινη φάση
- Τη φάση της μεθανοποίησης

Στη φάση της υδρόλυσης αποδομούνται σύνθετα οργανικά μόρια σε απλούστερα μόρια. Στην όξινη φάση υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη διασπώνται από μικροοργανισμούς σε οξέα, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, κ.ά. Στη τελική φάση H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, αλκοόλες, οργανικά οξέα παράγουν με τη βοήθεια ενζύμων μεθάνιο. Κατά τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης και οι τρεις φάσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα και εάν κάποια φάση επικρατήσει, τότε η παραγωγή μεθανίου διαταράσσεται σοβαρά. Η χημική διεργασία για την αναερόβια χώνευση της κυτταρίνης μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση :

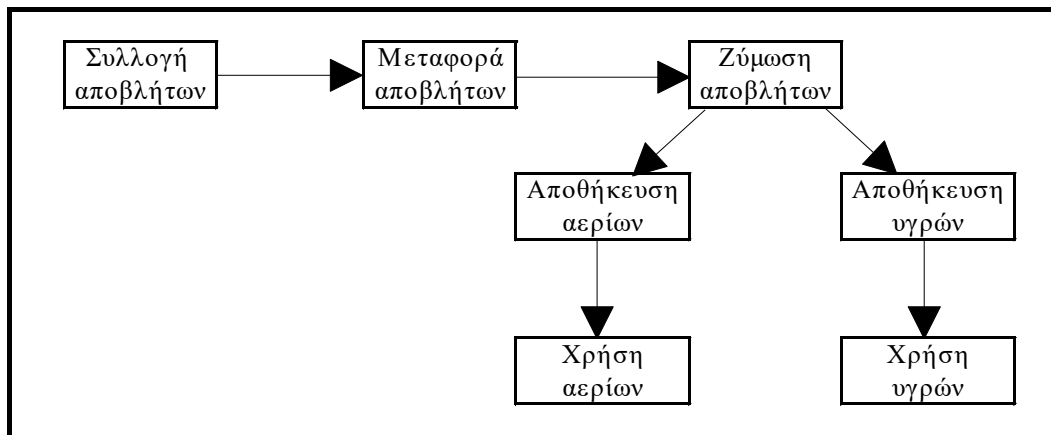


Τα μεθανογενή βακτήρια είναι ευαίσθητα στο pH που θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 6,6 και 7,0 και όχι λιγότερο του 6,2. Το παραγόμενο βιοαέριο αποτελείται από περίπου 60% CH<sub>4</sub>, 35% CO<sub>2</sub> και 5% άλλα αέρια όπως H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CO, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, πτητικές ουσίες, κ.ά. Η παρουσία του H<sub>2</sub>S στο βιοαέριο του προσδίδει διαβρωτική δράση και συνεπώς πολλές φορές απαιτείται η απομάκρυνσή του πριν από τη χρήση του. Η θερμιδική αξία του βιοαερίου είναι περίπου 5000 Kcal/m<sup>3</sup>.

Η αναερόβια χώνευση της βιομάζας μπορεί να γίνει σε τρεις θερμοκρασιακές ζώνες:

- Τη ψυχρόφιλη ζώνη (~ 20 °C)
- Τη μεσόφιλη ζώνη (~ 35 °C)
- Τη θερμόφιλη ζώνη (~ 55 °C)

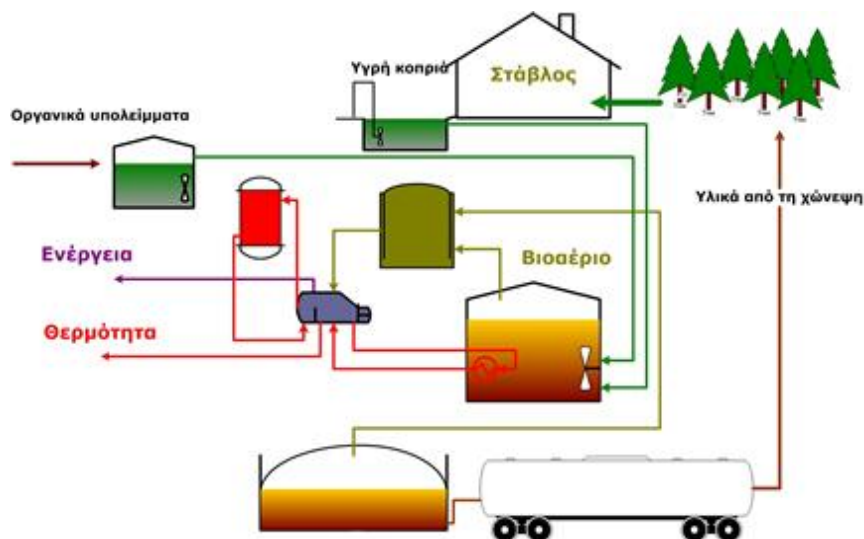
Όταν η χώνευση πραγματοποιείται στη ψυχρόφιλη ζώνη, ο χρόνος της χώνευσης υπολογίζεται τουλάχιστον 14 ημέρες. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η χώνευση γίνεται γρηγορότερα με μεγαλύτερη απόδοση. Πολλές φορές σε κρύα κλίματα μέρος του παραγόμενου βιοαερίου χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του βιοαντιδραστήρα και τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας εντός αυτού. Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης της βιομάζας ευνοείται από υγρό, θερμό και σκοτεινό περιβάλλον [28]. Στο διάγραμμα 2 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας και των διαφορετικών σταδίων που ακολουθούνται για την παραγωγή του βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα.



**Διάγραμμα 2:** Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής βιοαερίου από κτηνοτροφικά απόβλητα [28].

### Βακτηριακή αποσύνθεση

Τα βακτήρια τρέφονται με νεκρά ζώα και φυτά. Κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης των φυτών και των ζώων παράγεται ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, το μεθάνιο. Το μεθάνιο είναι ενεργειακά πλούσιο και αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Μέσω της καύσης του φυσικού αερίου μπορεί να παραχθεί απευθείας θερμότητα ή και ηλεκτρισμός μέσω θερμικών μηχανών. Σε ορισμένες χωματερές (όπου επί το πλείστον βρίσκονται υπολείμματα φυτικών και ζωικών οργανισμών) ανοίγονται πηγάδια σε σωρούς από σκουπίδια για να δεσμευτεί το μεθάνιο που παράγεται από την αποσύνθεση αυτών των αποβλήτων. Το μεθάνιο μπορεί να καθαριστεί και να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας όπως το φυσικό αέριο [31].



**Διάγραμμα 3:** Σχηματική αναπαράσταση της επεξεργασίας των υπολειμμάτων για την παραγωγή βιοαερίου [31].

Παρακάτω παρουσιάζεται η τυπική σύσταση βιοαερίου, το οποίο μπορεί να προκύψει από αναερόβια χώνευση κοπριάς :

- Μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) : 55-70%

- Διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) : 30-45%
- Υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ) : 1-2%
- Άζωτο ( $\text{N}_2$ ) : 0-1%
- Υδρογόνο ( $\text{H}_2$ ) : 0-1%
- Μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) : ίχνη
- Οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ) : ίχνη

#### 2.5.4 Πως λειτουργεί μια εγκατάσταση βιοαερίου

Στη δεξαμενή παραλαβής, λύματα και άλλα υποπροϊόντα αποθηκεύονται προσωρινά αφού πρώτα τεμαχιστούν, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Ο όρος “υποπροϊόν” προσδιορίζει τη στερεή ή υγρή βιομάζα που χρησιμοποιείται σε ένα χωνευτήρα για να παραχθεί βιοαέριο.

Ο χωνευτήρας είναι ο πυρήνας της εγκατάστασης. Πρόκειται για μια δεξαμενή μέσα στην οποία η βιομάζα αποσυντίθεται από μικροοργανισμούς στο σκοτάδι και κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Στη συνέχεια, τα προϊόντα αυτής της αποσύνθεσης μεταβολίζονται από μεθανογενή βακτήρια σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Ο χωνευτήρας συνήθως θερμαίνεται μεταξύ 38 έως 45°C (μεσοφιλικά) ή στους 55°C (θερμοφιλικά) και ανακατεύεται τακτικά.

Το παραγόμενο βιοαέριο συλλέγεται είτε κάτω από το αεροστεγανό κάλυμμα, ακριβώς επάνω από τα υποπροϊόντα, είτε σε εξωτερική δεξαμενή αποθήκευσης. Μπορεί να διοχετευτεί απευθείας σε μονάδα συμπαραγωγής (συνδυασμένη μονάδα θερμότητας και ηλεκτρισμού), όπου καίγεται σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Εναλλακτικά, το βιοαέριο μπορεί να ξηραθεί και να εμπλουτιστεί σε μία μονάδα επεξεργασίας. Κατά τη διεργασία του εμπλουτισμού, η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο αυξάνεται σημαντικά και μπορεί να φτάσει αυτήν του φυσικού αερίου (βιομεθάνιο). Το βιομεθάνιο μπορεί ακολούθως να διοχετευτεί απευθείας στο δίκτυο διανομής φυσικού αερίου. Μετά τη ζύμωση του υποπροϊόντος μέσα στο χωνευτήρα, αυτό εναποτίθεται στην αποθήκη χωνεμένου υποπροϊόντος. Από εκεί, τελικά διατίθεται ως ένα υψηλής ποιότητας βιολογικό λίπασμα. Το ζυμωμένο υποπροϊόν μπορεί επίσης να διαχωρίζεται και να ξεραίνεται.

Οι μονάδες παραγωγής βιοαερίου χρησιμοποιούν ως πρώτες ύλες :

- Κάθε υγρό υποπροϊόν της βιομηχανίας τροφίμων και ποτών (π.χ. τυρόγαλο, λάσπες βιολογικών καθαρισμών, κλπ.)
- Ζωικά λύματα (π.χ. λύματα από χοιροστάσια, βουστάσια, κλπ.)
- Κάθε φυτικό ή ζωικό υποπροϊόν (π.χ. υποπροϊόντα σφαγείου, φυτικά βιομηχανικά υποπροϊόντα, υποπροϊόντα καλλιέργειών, κλπ.)
- Ληγμένα - ακατάλληλα τρόφιμα, οργανικά αστικά απορρίμματα.

Η μονάδα, η οποία αποτελείται από μια κλειστή – στεγανή δεξαμενή (χωνευτήρας), αποσυνθέτει τις οργανικές ουσίες παράγοντας βιοαέριο με κύριο συστατικό το

μεθάνιο και μικρότερες ποσότητες σε διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς και οργανικές ενώσεις. Το υγρό προϊόν μετά την αναερόβια χώνευση διαχωρίζεται σε υγρό και στερεό. Το στερεό αποτελεί οργανικό λίπασμα και το υγρό χρησιμοποιείται για πότισμα, καθώς και αυτό θεωρείται υγρό λίπασμα. Και τα δύο μπορούν να διατεθούν στην αγορά επιφέροντας πρόσθετα κέρδη στη μονάδα.

#### 2.5.5 Χρήση βιοαερίου στην Ελλάδα

Τη δεκαετία του '80 έγιναν πολλές προσπάθειες για την ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου παραγόμενου από επεξεργασία ζωικών αποβλήτων και οργανικών αποβλήτων γεωργικών βιομηχανιών, κυρίως αποβλήτων από τα ελαιουργεία. Δυστυχώς, τα περισσότερα από αυτά τα έργα οδηγήθηκαν σε αποτυχία λόγω της έλλειψης πληροφόρησης, της κατάλληλης υποδομής, του κρατικού ενδιαφέροντος και των οικονομικών κινήτρων.

Αντιθέτως, ένας αριθμός έργων βιοαερίου έχουν ήδη συμπεριληφθεί σε εθνικά προγράμματα για την ενέργεια. Στο ΧΥΤΑ Α. Λιοσίων έχει πραγματοποιηθεί μία σημαντική επένδυση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου, εγκατεστημένης ισχύος 23,5 MW ([www.helektor.gr](http://www.helektor.gr)). Επιπλέον, υπάρχει ήδη εγκατεστημένο αντίστοιχο έργο της ΕΥΔΑΠ στην Ψυττάλεια για την ενεργειακή αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος από τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, με συμπαραγωγή, εγκατεστημένης ισχύος 11,4 MW. Τα έργα ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου που βρίσκονται σε λειτουργία στον Ελληνικό χώρο έχουν συνολική εγκατεστημένη ισχύ 41 MW περίπου [32].

#### 2.5.6 Πλεονεκτήματα και οφέλη από τη χρήση του βιοαερίου

Το βιοαέριο εκτός από τα συνήθη οφέλη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η προστασία του περιβάλλοντος και η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, εμφανίζει και ορισμένα ξεχωριστά πλεονεκτήματα [30], τα οποία παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω.

- Η δυνατότητα επιδοτήσεων που δίνονται για την κατασκευή μονάδων παραγωγής βιοαερίου και οι εγγυημένες τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να προσφέρουν στους αγρότες μια επιπλέον πηγή εσόδων, η οποία αναλόγως των περιστάσεων μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντική. Έτσι, ενισχύεται η βιωσιμότητα του αγροτικού πληθυσμού.
- Η κατασκευή μονάδων παραγωγής βιοαερίου συνεισφέρει στην αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η συλλογή και η ενεργειακή αξιοποίηση υλικών όπως ζωικές κοπριές, οργανικά υγρά απόβλητα κ.α., προσφέρει πολύτιμη πράσινη ενέργεια στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, αλλά περιορίζει τα φαινόμενα ρύπανσης βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής της τοπικής κοινωνίας ενώ συμβάλλει, ταυτόχρονα, στην αναπτυξιακή προοπτική της.
- Οι διεργασίες της αερόβιας χώνευσης καταναλώνουν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας σε αντίθεση με τις μονάδες αναερόβιας χώνευσης.
- Διευκολύνεται η διαχείριση και η τελική διάθεση των οργανικών αποβλήτων λόγω της μείωσης του όγκου τους που πραγματοποιείται στον αναερόβιο χωνευτήρα.
- Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ενεργειακά φυτά (π.χ. καλαμπόκι) για την παραγωγή βιοαερίου και το υπόλειμμα της χώνευσης ανακυκλώνεται στα

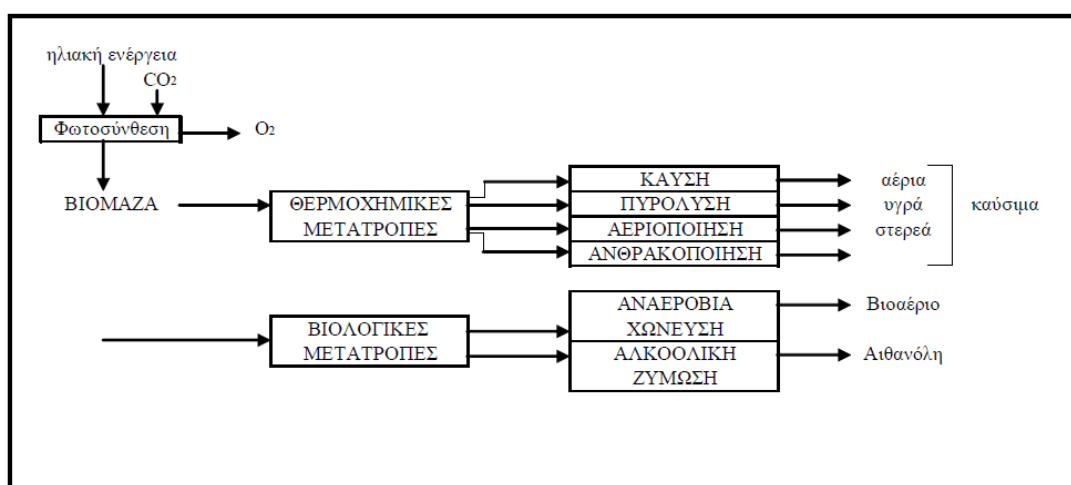
χωράφια, δεν απαιτείται η χρησιμοποίηση συνθετικών λιπασμάτων. Επιτυγχάνεται ένας κλειστός κύκλος των θρεπτικών συστατικών και των πολύτιμων ιχνοστοιχείων και μειώνονται τα φαινόμενα ρύπανσης των υπογείων υδάτων.

- Κατά την αποθήκευση του υγρού υπολείμματος της χώνευσης, εκλύονται σημαντικά λιγότερες οσμές από ότι κατά τη διάθεση ανεπεξέργαστων αποβλήτων στα χωράφια.
- Σημαντική ελάττωση ή και πλήρης εξαφάνιση των παθογόνων μικροοργανισμών στο υγρό υπόλειμμα. Το γεγονός αυτό καθιστά δυνατή την απευθείας χρήση του υπολείμματος ως εδαφοβελτιωτικού στα χωράφια.
- Αποφυγή κινδύνων επιβολής προστίμων, τόσο από την Ελλάδα όσο και από την Ευρωπαϊκή Ένωση, για ακατάλληλη διάθεση αποβλήτων.
- Η υγρή ζωική κοπριά είναι πιο αραιωμένη μετά την αναερόβια χώνευση από ότι ανεπεξέργαστη. Ως εκ τούτου εμφανίζει μεγαλύτερη δυνατότητα διείσδυσης στο έδαφος, οπότε παρέχεται καλύτερη λίπανση στο χωράφι με περισσότερο οικολογικό τρόπο.

## Κεφάλαιο 3: Μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

### 3.1 Μέθοδοι ενεργειακής μετατροπής της βιομάζας

Η στερεά βιομάζα, ως καύσιμο θερμικών σταθμών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, περιλαμβάνει μια σειρά από μειονεκτήματα όπως η χαμηλή πυκνότητά της που δημιουργεί προβλήματα στην μεταφορά και την αποθήκευσή της, η χαμηλή θερμογόνος της δύναμη και η ακαταλληλότητά της για μηχανές εσωτερικής καύσης ή αεριοστροβίλους. Για τους παραπάνω λόγους γίνεται προσπάθεια για να μετατραπεί σε άλλη μορφή ή φάση μέσω της παραγωγής συμπυκνωμάτων ή συσσωματωμάτων (πελετών ή μπρικετών) για την μείωση του όγκου της και αφαίρεση μέρους της υγρασίας της. Άλλες μέθοδοι αποσκοπούν στην ρευστοποίησή της, δηλαδή στην παραγωγή υγρών ή αερίων βιοκαυσίμων μέσω χημικών ή βιολογικών διεργασιών. Από τις μεθόδους θερμοχημικής κατεργασίας της βιομάζας, ιδιαίτερη σημασία για την ηλεκτροπαραγωγή έχει η **πυρόλυση / αεριοποίηση**, δηλαδή η θερμική αποσύνθεσή της σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία περιορισμένων ποσοτήτων οξειδωτικού μέσου, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός μίγματος υγρών, αερίων και στερεών καυσίμων προϊόντων. Μεταβάλλοντας τις συνθήκες πυρόλυσης μπορούμε να μεταβάλλουμε την αναλογία βιοκαυσίμων/στερεού υπολλείματος, ώστε να πάρουμε κυρίως υγρά (Βιοέλαια) ή αέρια (syngas) καύσιμα εις βάρος της παραγωγής στερεών ανθρακούχων υπολειμμάτων. Από την κατηγορία των βιοχημικών μεθόδων επεξεργασίας, μεγαλύτερο ρόλο σήμερα παίζει η **αναερόβια χώνευση**, δηλαδή η αποσύνθεση οργανικής ύλης από ένα μίγμα συμβιωτικών μικροοργανισμών όπως τα βακτήρια, απουσία μοριακού οξυγόνου, για την παραγωγή αερίου καυσίμου πλούσιου σε μεθάνιο (Βιοαερίου). Το παρακάτω διάγραμμα παραθέτει τους τρόπους επεξεργασίας της βιομάζας μέσω θερμοχημικών ή βιολογικών διεργασιών καθώς και τα αντίστοιχα παράγωγα της κάθε διεργασίας. Παρακάτω αναλύονται κυρίως οι θερμοχημικές διεργασίες ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας.



Διάγραμμα 4: Διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας [34].

### 3.1.1 Μηχανική Επεξεργασία

Η μηχανική επεξεργασία αποτελεί μια απλή μέθοδο μετατροπής της βιομάζας σε μια αποδοτικότερη καύσιμη ύλη παράγοντας πυκνά συσσωματώματα με την ξήρανση και τη συμπίεσή της. Τα συσσωματώματα της βιομάζας χωρίζονται σε δυο βασικούς τύπους είναι οι μπρικέτες και οι πελέτες (pellets), οι οποίες συναντούνται συνήθως υπό μορφή κυλινδρικών τεμαχιδίων, διαφορετικών διαστάσεων και πυκνότητας. Επιπλέον, στην περίπτωση των δασικών ξυλωδών, η μηχανική επεξεργασία περιλαμβάνει και την κατάτμησή της σε μικρά κομμάτια (πλακίδια ή θρύμματα ξύλου – wood chips).

### 3.1.2 Οδοί Ρευστοποίησης

Η μετατροπή της βιομάζας σε βιοκαύσιμα μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες που χαρακτηρίζονται τόσο από τις διαφορετικές διαδικασίες επεξεργασίας που ακολουθούνται, όσο και από το είδος του καυσίμου που παράγεται από αυτές, όπως φαίνονται και στον πίνακα 13 που ακολουθεί. Η παλαιότερη κατηγορία είναι εκείνη των *αγροχημικών* μεθόδων με τις οποίες παράγονται κυρίως φυτικά έλαια από σπόρους και καρπούς ελαιούχων φυτών και δένδρων. Αυτά μπορούν στην συνέχεια, με χημική επεξεργασία, να μετατραπούν σε βιοντίζελ. Η δεύτερη κατηγορία μετατροπής είναι η *θερμοχημική* επεξεργασία της βιομάζας που περιλαμβάνει κυρίως τις μεθόδους της πυρόλυσης/αεριοποίησης. Η τελευταία είναι εκείνη των *βιολογικών* διεργασιών για την παραγωγή είτε βιοαερίου, είτε αιθυλικής αλκοόλης (βιοαιθανόλης):

**Πίνακας 12:** Επεξεργασία της βιομάζας [34].

	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΑ ΚΑΥΣΙΜΑ
ΒΙΟΜΑΖΑ	Αγροχημική	Συμπύεση, Έκθλιψη Μετεστεροποίηση	Φυτικά Έλαια Βιοντίζελ
	Θερμοχημική	Ανθρακοποίηση Πυρόλυση Αεριοποίηση Υγροποίηση	Κάρβουνο Βιοϋδρογόνο Βιοέλαια Βιομεθανόλη Αέριο Συνθεσης (Syngas)
	Βιοχημική	Αλκοολική Ζύμωση Αναερόβια Χώνευση	Βιοαιθανόλη Βιοαέριο, Βιοϋδρογόνο

Οι μέθοδοι της ενεργειακής μετατροπής της βιομάζας ποικίλουν. Διακρίνονται σε θερμοχημικές (ξηρές) ή σε βιοχημικές (υγρές). Η επιλογή της μεθόδου μετατροπής προσδιορίζεται από τη σχέση C/N και την περιεχόμενη υγρασία των υπολειμμάτων, κατά την ώρα της συλλογής. Οι **θερμοχημικές** διεργασίες χρησιμοποιούνται για τα είδη της βιομάζας με σχέση C/N < 30% και υγρασία >50%. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται:

### 3.1.3 Πυρόλυση (θέρμανση απουσία αέρα)

Κατά την πυρόλυση η φυτική ύλη αποσυντίθεται λόγω θέρμανσης και παράγει απουσία αέρα, πτωχό αέριο, βιοάνθρακα (κάρβουνο) και πυρολιγνικά υγρά όπως είναι η ξυλόπισσα και ο ξυλάνθρακας. Η ενεργειακή μετατροπή αγγίζει το 90% και για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της διαδικασίας απαιτείται περίπου το 10% του αερίου που παράγεται. Η πυρόλυση γίνεται σε κλειστά δοχεία απουσία αέρα σε θερμοκρασίες 500-600°C [36]. Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης δεν απαιτείται παρά η κατανάλωση μικρών ποσοτήτων θερμότητας.

Η ποσοτική αναλογία των προϊόντων της πυρόλυσης του ξύλου είναι:

- βιοάνθρακας 25%
- αέριο 15%
- πυρολιγνικά οξέα 45%
- ελαιώδης πίσσα 15%

Ο βιοάνθρακας που προκύπτει από τη πυρόλυση της βιομάζας αποτελείται από διάφορα υλικά με διαφορετική σύσταση: Άνθρακας 83%, Υδρογόνο 3% , Οξυγόνο 11%, Άζωτο 0,3% , Τέφρα 2,7%. Ενδεικτικά, η θερμαντική αξία του βιοάνθρακα που προκύπτει από την πυρόλυση κλαδοδεμάτων ελιάς είναι 6644 KJ/kg. Η ελαιώδης πίσσα (βιοέλαιο) που προκύπτει από την πυρόλυση της βιομάζας έχει την ακόλουθη σύνθεση: Άνθρακας 51%, Υδρογόνο 8%, Οξυγόνο 40%, Άζωτο 0,9%, Θείο 0,01% , Τέφρα 0,09% [37]. Η θερμαντική αξία του βιοελαίου που προκύπτει από την πυρόλυση κλαδοδεμάτων ελιάς είναι 34595 KJ/kg. Το αέριο (βιοαέριο) που προκύπτει από τη πυρόλυση της βιομάζας έχει ογκομετρική σύνθεση: Διοξείδιο του άνθρακα 28 % , μονοξείδιο του άνθρακα 15% , υδρογόνο 6,5%, μεθάνιο 3,5%, άζωτο 45%. Η θερμαντική αξία του αερίου που παράγεται κατά την πυρόλυση της βιομάζας κυμαίνεται στα 7443-10467 KJ/kg [34].

### 3.1.4 Απευθείας Καύση

Η απευθείας καύση αποτελεί την πιο απλή και αναπτυγμένη μέθοδο παραγωγής θερμότητας συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες θερμοχημικές διεργασίες (π.χ. πυρόλυση). Για να επιτευχθούν καλύτεροι βαθμοί απόδοσης κατά την καύση προτείνεται η περιεκτικότητα της βιομάζας σε υγρασία να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, συνήθως κάτω του 20%. Για να είναι εύκολη η χρήση της σε διάφορες συσκευές και φούρνους μπορεί πρώτα να απαιτείται τεμαχισμός της βιομάζας σε μικρά κομμάτια. Όταν η βιομάζα έχει τη μορφή πολύ μικρών κόκκων τότε μετατρέπεται πρώτα σε μπρικέτες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μορφοποίησή της κάτω από υψηλή πίεση σε κατάλληλα μηχανήματα. Πέρα από τη δασική βιομάζα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για καύση γεωργικά υποπροϊόντα όπως άχυρο, καλάμια, κλαδοδέματα και φυσικά υπολείμματα ξύλου. Για την παραγωγή ατμού η βιομάζα καίγεται σε κατάλληλους καυστήρες με την παραγόμενη θερμότητα να χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του νερού σε βραστήρες.



Οι περισσότερες μορφές βιομάζας συνίστανται από τρεις σύνθετες χημικές ενώσεις:

- κυτταρίνες
- ημικυτταρίνες και
- λιγνίνες

Περιέχουν επίσης νερό, μικρές ποσότητες ρητινών και άλατα. Η τυπική σύνθεση της βιομάζας είναι:

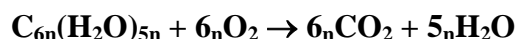
- 50% άνθρακας
- 43% οξυγόνο
- 6% υδρογόνο

Η διεργασία της καύσης πραγματοποιείται σε στάδια. Αφού εισαχθεί το καύσιμο στο θάλαμο καύσης θερμαίνεται γρήγορα λόγω ακτινοβολίας των τοιχωμάτων και λόγω συναγωγής από τα θερμά αέρια που υπάρχουν στο θάλαμο. Η υγρασία του καυσίμου απομακρύνεται, όπως απομακρύνονται και τα πτητικά συστατικά του. Τότε τα πτητικά αναφλέγονται και παραμένει ο καθαρός άνθρακας που καίγεται. Η διάρκεια του κάθε βήματος, όπως επίσης και ο συνολικά απαιτούμενος χρόνος εξαρτάται από τη φύση του καυσίμου και το μέγεθος των σωματιδίων του [35].

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος καύσης της βιομάζας πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι η φωτιά απαιτεί τρεις παράγοντες για να αρχίσει και να συνεχίσει να υπάρχει, ήτοι καύσιμο, οξυγόνο και θερμότητα. Η θερμότητα που παράγεται κατά τη καύση της βιομάζας διαδίδεται με τρεις τρόπους και μηχανισμούς:

- Με αγωγιμότητα
- Με ακτινοβολία
- Με μεταφορά

Αν η εστία καύσης είναι μονωμένη, εννοώντας ότι περικλείεται από κάποια τοιχώματα τότε μπορούν να ελαχιστοποιηθούν και οι απώλειες θερμότητας με μεταφορά. Ταυτόχρονα τα τοιχώματα θα πρέπει να απορροφούν την ακτινοβολούμενη θερμότητα, μέρος της οποίας θα πρέπει να ακτινοβολούν πάλι. Η θερμότητα που χάνεται με τα αέρια καύσης μπορεί να ανακτηθεί σε σημαντικό βαθμό, εφόσον χρησιμοποιηθεί κατάλληλος εναλλάκτης θερμότητας. Σήμερα υπάρχουν σόμπες και τζάκια που επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης από 20% έως 80%, ανάλογα με το βαθμό που εξοικονομούν θερμότητα. Η τυπική χημική αντίδραση κατά τη καύση της βιομάζας είναι [30] :



Οι θερμοκρασίες στις οποίες επιτυγχάνεται η καύση της βιομάζας κυμαίνονται ανάμεσα στους 1000-1500°C. Η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγιμότητα όταν διέρχεται δια μέσου μιας στερεάς επιφάνειας από μία θερμή περιοχή σε μία ψυχρή.

Η εξίσωση που δίδει τη μεταφερόμενη θερμότητα είναι :

$$\text{Μεταφερόμενη θερμότητα} = \frac{K * A * (T_1 - T_2)}{L}$$

όπου  $K$  = θερμική αγωγιμότητα του στερεού σώματος  
 $A$  = επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας  
 $L$  = απόσταση μεταξύ θερμής και ψυχρής επιφάνειας  
 $T_1$  = υψηλότερη θερμοκρασία  
 $T_2$  = χαμηλότερη θερμοκρασία

Η μεταφορά της θερμότητας με ακτινοβολία οφείλεται στο γεγονός ότι όλα τα σώματα ακτινοβολούν θερμότητα. Η ποσότητα της ακτινοβολούμενης θερμότητας είναι ανάλογη της διαφοράς της τέταρτης δύναμης της απολύτου θερμοκρασίας του ακτινοβολούντος σώματος και του λαμβάνοντος τη θερμότητα σώματος.

$$E = \epsilon \sigma T_1^4$$

$E$  = ενέργεια εκπομπής

$\sigma$  = σταθερά του Stefan-Boltzmann =  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$\epsilon$  = ικανότητα εκπομπής ( $0 < \epsilon < 1$ )

$T_1$  = θερμοκρασία της επιφάνειας

Τέλος, μεταφορά θερμότητας προκαλείται με τη ροή κάποιου ρευστού (αέρα ή νερού) είτε με φυσικό τρόπο είτε με βεβιασμένο. Στη περίπτωση αυτή η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή είναι :

$$\text{Μεταφερόμενη θερμότητα} = a * A * (T_1 - T_2)$$

Όπου:

$a$  = ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας,

$A$  = επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας

$T_1$  = θερμοκρασία επιφάνειας και

$T_2$  = θερμοκρασία ρευστού.

### 3.1.5 Ανθρακοποίηση

Μέσω της διαδικασίας της ανθρακοποίησης παράγεται το κάρβουνο ένα υλικό το οποίο χρησιμοποιείται πάρα πολύ στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η διεργασία αυτή επιτυγχάνει τη θέρμανση του ξύλου παρουσία αέρα σε αναλογία μικρότερη από τη

στοιχειομετρική, και σαν προϊόν να παράγεται το κάρβουνο καθώς και υγρά και αέρια παραπροϊόντα.

Η διεργασία της ανθρακοποίησης πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια.

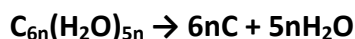
Το **πρώτο** στάδιο περιλαμβάνει την ξήρανση του ξύλου που πρόκειται να ανθρακοποιηθεί και καταναλώνει ενέργεια. Η θερμοκρασία είναι περίπου 200°C.

Το **δεύτερο** στάδιο περιλαμβάνει τη φάση της προανθρακοποίησης και γίνεται σε θερμοκρασίες 170-300°C, ενώ παράγονται υγρά και αέρια προϊόντα. Το στάδιο αυτό απαιτεί επίσης την κατανάλωση ενέργειας.

Το **τρίτο** στάδιο που παράγει ενέργεια γίνεται σε θερμοκρασίες 250-300°C. Στο στάδιο αυτό εκλύονται υγρά και αέρια παραπροϊόντα, ενώ το ξύλο ανθρακοποιείται πλήρως.

Στο **τέταρτο** στάδιο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300°C απομακρύνονται όλες οι πτητικές ουσίες από το κάρβουνο και λαμβάνεται το τελικό προϊόν.

Η βασική χημική αντίδραση κατά την ανθρακοποίηση της βιομάζας είναι:



Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ανθρακοποίησης το κάρβουνο ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι ιδιότητες του κάρβουνου εξαρτώνται από την υγρασία της βιομάζας, τον τύπο του ξύλου και τη χημική του σύσταση καθώς και τη θερμοκρασία της ανθρακοποίησης.

Η σύσταση κάρβουνου ικανοποιητικής ποιότητας είναι : Άνθρακας περισσότερο από 70%, Πτητικές ουσίες 25%, Στάχτη 5%. Η πυκνότητά του κυμαίνεται περίπου 250-300 kg/m<sup>3</sup>, ενώ η θερμιδική του αξία είναι 25 MJ/kg σε σύγκριση με τα 15 MJ/kg του ξύλου. Ο τελικός όγκος του παραγόμενου κάρβουνου είναι περίπου το μισό του αρχικού όγκου του ανθρακοποιούμενου ξύλου. Υπάρχουν διάφορα συστήματα για την ανθρακοποίηση της βιομάζας, τα οποία είναι συνήθως απλής κατασκευής. Η διάρκεια της διαδικασίας ανθρακοποίησης είναι συνήθως 2-20 ημέρες, ενώ η απόδοση κυμαίνεται από 15 έως 25% [34].

### 3.1.6 Αεριοποίηση

Αεριοποίηση ονομάζεται η θερμοχημική διεργασία που μετατρέπει στερεά ή υγρά καύσιμα σε αέριο καύσιμο μίγμα χαμηλής ή μέτριας θερμογόνου δύναμης, χρησιμοποιώντας αέρα ή οξυγόνο ή ατμό (H<sub>2</sub>O) ως οξειδωτικό μέσο. Το παραγόμενο αέριο ονομάζεται αέριο σύνθεσης (syngas) και αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα (CO), υδρογόνο (H<sub>2</sub>), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και μεθάνιο (CH<sub>4</sub>). Το παραγόμενο αέριο μπορεί να καίγεται σε καυστήρες ή να χρησιμοποιείται σαν καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή να αποθηκεύεται όταν το αέριο αυτό είναι είτε υδρογόνο είτε περιέχει υδρογόνο σε μεγάλη περιεκτικότητα. Εκτός του αερίου σύνθεσης, παράγεται στερεό υπόλειμμα που ονομάζεται εξανθράκωμα μαζί με τέφρα καθώς και πίτσες, δηλαδή οργανικές ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους. Τέλος, παράγονται ενώσεις όπως H<sub>2</sub>S, COS, HCl,

NH<sub>3</sub> και HCN της τάξεως των ppmv. Το τυπικό θερμοκρασιακό εύρος για την αεριοποίηση βιομάζας είναι 650-1000°C, ενώ πολύ υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 1200-1500°C εφαρμόζονται κατά κανόνα στην περίπτωση ορυκτών καυσίμων. Συμπερασματικά το συγκριτικό πλεονέκτημα της αεριοποίησης της βιομάζας, σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδο της καύσης ή την πυρόλυση είναι η πολύ μεγάλη ενεργειακή της απόδοσή της. Η επεξεργασία βιομάζας με τη μέθοδο της αεριοποίησης επιφέρει τριπλάσιου μεγέθους θερμογόνο δύναμη από οποιαδήποτε άλλη σχετική επεξεργασία. Στα σημαντικά πλεονεκτήματα της αεριοποίησης συγκαταλέγεται ο οικολογικός της χαρακτήρας, αποτέλεσμα της μηδενικής επιβάρυνσης του περιβάλλοντος, καθώς και η παραγωγή πολλών λοιπών πολύτιμων εκμεταλλεύσιμων προϊόντων [38].

#### *Στάδια αεριοποίησης*

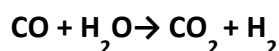
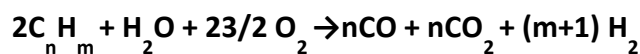
Η αεριοποίηση αποτελείται από τέσσερα επιμέρους στάδια: της ξήρανσης (drying), της πυρόλυσης (pyrolysis), της καύσης (combustion), και της αεριοποίησης (gasification) [39]. Το **πρώτο στάδιο** περιλαμβάνει τη ξήρανση του καυσίμου, δηλαδή είναι αποτελεί την διαδικασία της απομάκρυνσης της υγρασίας του καυσίμου μέσω της εξάτμισης και της διάχυσης μορίων του νερού από το καύσιμο προς το εξωτερικό περιβάλλον, κυρίως πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 150-200°C. Ακολουθεί το στάδιο της πυρόλυσης, που πραγματοποιείται στο θερμοκρασιακό εύρος 280-500 °C και η διάρκειά του είναι μικρή. Κατά τη φάση αυτή, η βιομάζα αποδομείται σε πτητικές ενώσεις, εξανθράκωμα και αρωματικούς υδρογονάνθρακες μεγάλου μοριακού βάρους (πίσσες). Ο χρόνος της πυρόλυσης δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια γιατί κάθε φορά εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από το είδος του καυσίμου. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κυρίως στο στάδιο αυτό είναι ενδόθερμες, καθώς η διεξαγωγή τους απαιτεί κατανάλωση ενέργειας, με συνέπεια να δημιουργείται αναπτυσσόμενη θερμοκρασία στο σύστημα, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της ξήρανσης [40]. Ακολουθούν οι εξώθερμες αντιδράσεις οξείδωσης και **καύσης** του άνθρακα που πραγματοποιούνται μεταξύ του οξειδωτικού μέσου και των καυσίμων συστατικών της βιομάζας. Αυτές αποτελούν τις βασικότερες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στον αεριοποιητή, λόγω του γεγονότος ότι παράγουν όλη τη θερμική ενέργεια που απαιτείται για την πραγμάτωση των υπόλοιπων ενδόθερμων αντιδράσεων της αεριοποίησης. Επίσης, κατά το στάδιο αυτό, παρέχεται η απαιτούμενη θερμότητα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της διεργασίας σε επιθυμητά επίπεδα [41].

- Η αεριοποίηση μπορεί να γίνεται με αέρα ή ατμό. Η περίπτωση αεριοποίησης με ατμό προτιμάται για την παραγωγή υδρογόνου, ενώ η αεριοποίηση με αέρα προτιμάται για την παραγωγή αερίου που είτε καίγεται σε καυστήρες είτε καταναλώνεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης.

#### Αεριοποίηση με ατμό.

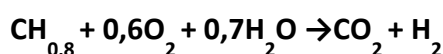
Η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα επιτυγχάνεται, μέσω της αεριοποίησης με ατμό, με τους εξής τρόπους:

- Από τη μερική οξείδωση υδρογονανθράκων μέσω των χημικών εξισώσεων



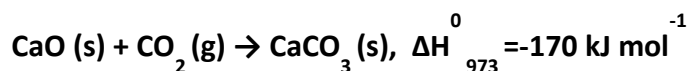
Η συγκεκριμένη διεργασία γίνεται υπο υψηλή πίεση παρουσία ή απουσία καταλυτών.

- Από την αεριοποίηση του άνθρακα μέσω της χημικής εξίσωσης

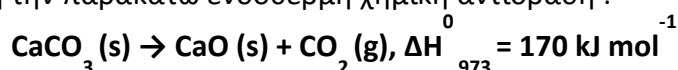


Και αυτή η διεργασία γίνεται υπό υψηλή πίεση (450 psi). Βασικό μειονέκτημα των μεθόδων είναι η παραγωγή  $CO_2$  το οποίο πρέπει να απομακρυνθεί. Για την απομάκρυνση του  $CO_2$  προτείνεται είτε η μετατροπή του σε ανθρακικό ασβέστιο και απομάκρυνσή του είτε η πλύση του αερίου σε διάλυμα υδροξειδίου του καλίου ή και η προσθήκη στον αεριοποιητή ουσιών που κατακρατούν το  $CO_2$  [42].

Ενδεικτικά αναλύεται η πρώτη από τις τρεις μεθόδους όπου το  $CO_2$  απορροφάται από CaO σε θερμοκρασία 973 K με βάση τη παρακάτω χημική εξίσωση :



Το ανθρακικό ασβέστιο σε δεύτερη φάση διασπάται σε δεύτερη συσκευή σε CaO και  $CO_2$  με βάση την παρακάτω ενδόθερμη χημική αντίδραση :



Δηλαδή το CaO αναγεννάτε και μάλιστα υπό καθεστώς θερμικής ισορροπίας. Μπορεί όμως σε τακτά χρονικά διαστήματα να απαιτείται συμπλήρωμα της ποσότητας του CaO λόγω του αναπόφευκτης αδρανοποίησης του CaO. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δυο αντιδραστήρες κατά τη διεργασία της αεριοποίησης. Στον πρώτο εισέρχεται η βιομάζα και ο ατμός και μέσω της απορρόφησης του  $CO_2$  προκύπτει  $H_2$ . Από τον αντιδραστήρα απομακρύνονται η στάχτη, η τέφρα και το απενεργοποιημένο CaO. Στον δεύτερο αντιδραστήρα αναγεννάται το CaO με αποτέλεσμα την αποβολή  $CO_2$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι η διεργασία παραγωγής υδρογόνου γίνεται υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Στα 30 bar και 923 K παράγεται αέριο με περιεκτικότητα επί ξηρού 91 mol% [43].

### *Αεριοποίηση με αέρα.*

Το ξυλοκάρβουνο και το ξύλο είναι τα δύο κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται σαν πρώτες ύλες κατά τη διαδικασία αεριοποίησης με αέρα [44]. Το ξύλο αποτελείται από τρία είδη πολυμερών: κυτταρίνη ( $C_6H_{10}O_5$  ή  $CH_{1,66}O_{0,83}$ ), λιγνίνη ( $C_9H_{10}O_3$  ή  $CH_{1,23}O_{0,38}$ ) και ξυλάνη ( $C_5H_8O_4$  ή  $CH_{1,6}O_{0,8}$ ). Τα τρία αυτά συστατικά υπάρχουν σε διαφορετική σύσταση συγκροτώντας τα διάφορα είδη ξύλου, ενώ υπάρχουν και προσθήκες αλάτων και τέφρας. Έτσι λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί ότι μία αρκετά αντιπροσωπευτική σύσταση ξύλου δίδεται από τον εξής χημικό τύπο  $CH_{1,4}O_{0,6}$  ή  $C_5H_7O_3$ .

Βέβαια πίσω από τους διαφορετικούς συνδυασμούς το τριών κύριων βασικών συστατικών κρύβεται μια πολύ μεγάλη ποικιλία υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν, όπως δασικά ή αγροτικά απόβλητα (ξερόχορτα, κατάλοιπα κλαδιά από δέντρα, άχυρα κλπ). Η αεριοποίηση με αέρα είναι μια σχετικά εύκολη και φθηνή μέθοδος αξιοποίησης των υλικών αυτών. Η θερμογόνο δύναμη της βιομάζας μπορεί να οριστεί μέσω της εξίσωσης:

$$\Delta H_c = HHV \text{ (Btu/lb)} = 146.58 C + 568.78 H - 51.53 O - 6.58 A + 29.45$$

ή

$$HHV \text{ (KWh/Kg)} = 1,318 \cdot 10^{-4} [146.58 C + 568.78 H - 51.53 O - 6.58 A + 29.45]$$

Όπου C, H, O και A οι εκατοστιαίες συστάσεις επί ξηρού του άνθρακα, υδρογόνου, οξυγόνου και τέφρας αντιστοίχως. Οι μετρούμενες τιμές των θερμογόνων δυνάμεων διαφέρουν από τις υπολογιζόμενες μέσω των παραπάνω εξισώσεων όχι περισσότερο από 2% για στερεά καύσιμα και 6% για άλλα αέρια καύσιμα [45].

### *Τύποι συσκευών αεριοποίησης*

Οι αεριοποιητές κατηγοριοποιούνται κατ' αναλογία με τους λέβητες πλήρους καύσης. Ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν υπάρχουν συσκευές αεριοποίησης για άνθρακα ή ξύλο. Εδώ πρέπει να επισημανθούν οι διαφορές του ξύλου ως πρώτη ύλη αεριοποίησης από τον άνθρακα ή το ξυλοκάρβουνο. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι μόνο το ένα τρίτο του άνθρακα είναι πτητικό σε αντίθεση με τα τέσσερα πέμπτα του ξύλου. Η αντιδραστικότητα του ξυλοκάρβουνου είναι είκοσι πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτή του άνθρακα λόγω της μικρότερης πυκνότητας και συνεπώς της αυξημένης επιφάνειας αντίδρασης καθώς και του χαμηλού περιεχόμενου σε τέφρα και της άμορφης φύσης του άνθρακα. Το κύριο πρόβλημα στη χρήση βιομάζας είναι η εξάλειψη της πίσσας που περιέχεται στο παραγόμενο αέριο. Στη χρήση άνθρακα το κύριο πρόβλημα είναι η αεριοποίηση του άνθρακα.

Μια καλή συσκευή αεριοποίησης για κάρβουνο μπορεί σχετικά εύκολα να μετατραπεί σε αντίστοιχη συσκευή για ξύλο αν και οι συσκευές αεριοποίησης ξύλου έχουν αρκετές διαφορές από αυτές που λειτουργούν με πρώτη ύλη τον άνθρακα κυρίως λόγω των διαφορών του άνθρακα από το ξύλο [39]. Ανάλογα με τον τύπο της κλίνης υπάρχουν αεριοποιητές σταθερής, κινούμενης ή ρευστοποιημένης κλίνης.

#### *Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης*

Σε ότι αφορά τους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης μπορούν να εκμεταλλευτούν υλικά με διαφοροποιήσεις στη σύσταση και το περιεχόμενο υγρασίας ενώ η λειτουργία τους βασίζεται στην καλή ανάμιξη του υλικού με τον αέρα λόγω του υλικού στο εσωτερικό της κλίνης. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι άμμος, δολομίτης, ολιβίνης, αλουμίνα ή κάποιο άλλο. Η βιομάζα τροφοδοτείται στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα, όπως και η παροχή του αέρα, ενώ το παραγόμενο αέριο εξέρχεται από το πάνω μέρος. Τυπική θερμοκρασία για την αεριοποίηση βιομάζας είναι οι 700-900°C. Διαδεδομένοι τύποι αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης είναι η κλίνη φυσαλίδων και η κλίνη ανακυκλοφορίας [46].

Σημαντικό πλεονέκτημα των αεριοποιητών ρευστοποιημένης κλίνης είναι πως δεν απαιτούν βιομάζα συγκεκριμένου είδους και μορφής. Επιπλέον, λόγω της βελτιωμένης μεταφοράς θερμότητας σε σχέση με τους αντιδραστήρες σταθερής κλίνης, παρατηρείται ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας και όχι μεμονωμένα θερμά σημεία (hot spots). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν διακριτές ζώνες ξήρανσης, πυρόλυσης, καύσης και αεριοποίησης όπως στην περίπτωση σταθερών κλινών. Αποτέλεσμα της μείωσης της πιθανότητας σχηματισμού τέτοιων σημείων είναι η αποφυγή φαινομένων τήξης της τέφρας του καυσίμου.

#### *Αεριοποιητές σταθερής κλίνης*

Σε ότι αφορά του αεριοποιητές σταθερής κλίνης, η διεύθυνση ροής του αερίου διαχωρίζει τις συσκευές αεριοποίησης βιομάζας σταθερής κλίνης σε αυτές της ανερχόμενης ροής (updraught gasifiers), σε εκείνες της κατερχόμενης ροής (downdraught gasifiers) και εκείνες που η ροή κινείται οριζόντια στην κλίνη (crossdraught gasifiers) [47].

- ***Αεριοποιητής ανερχόμενης ροής***

Οι αεριοποιητές ανερχόμενης ροής παράγουν ζεστό αέριο (300-600°C) το οποίο έχει υψηλή περιεκτικότητα πυρολυτικής πίσσας, τέφρας και αιθάλης. Ο αέρας εισέρχεται στον πάτο της κλίνης και το παραγόμενο αέριο φεύγει από το πάνω μέρος της συσκευής. Η θερμοκρασία είναι υψηλή κατά τη διάρκεια της διεργασίας και για αυτό πιθανή παρουσία ατμού θα βοηθούσε στον έλεγχο της θερμοκρασίας λόγω της ισχυρής θερμικής απορροφητικότητας του ατμού. Το θερμό αέριο είναι η πηγή θερμότητας που ξηραίνει και πυρολύει την εισερχόμενη βιομάζα παράγοντας ένα πισσώδες έλαιο που περιέχει το 30% της εισερχόμενης ενέργειας. Το αέριο σύνθεσης προτιμάται κυρίως για τους καυστήρες αερίου αλλά θα πρέπει πρώτα να ψυχθεί και να καθαρισθεί από πίσσες όταν θα χρησιμοποιηθεί για τροφοδοσία μηχανών. Βέβαια, με αυτόν τον τρόπο αποβάλλοντας τις πίσσες μειώνεται η απόδοση του αερίου γιατί οι πίσσες περιλαμβάνουν σημαντικό κομμάτι της θερμαντικής αξίας του παραγόμενου αερίου [48]. Το πλεονέκτημα αυτών των συσκευών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιήσουν υλικά με μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία. Είναι ιδανικές για την παραγωγή υγρών καυσίμων από απόβλητα βιομάζας. Τα μειονεκτήματά τους είναι ότι παράγεται μεγάλη ποσότητα πίσσας που είναι πολύ διαβρωτική και είναι σχεδόν αδύνατον να απομακρυνθεί. Έτσι αυτού του



είδους οι συσκευές χρησιμοποιούνται κυρίως για να παρέχουν καύσιμο σε καυστήρες [49].

- **Αεριοποιητής οριζόντιας ροής**

Σε αυτή τη συσκευή η ροή του αέρα γίνεται οριζόντια και κεκλιμένα διαμέσου της κλίνης. Η θερμοκρασία λειτουργίας της συσκευής είναι αρκετά υψηλή (ως 2000°C) με αποτέλεσμα να απαιτείται σύστημα ψύξης. Επιπλέον αυτού του τύπου οι αεριοποιητές χαρακτηρίζονται από μειωμένη παραγωγή πίσσας [39].

- **Αεριοποιητής κατερχόμενης ροής**

Οι συσκευές αυτές αναπτύχθηκαν με την προοπτική να διασπούν την παραγόμενη πίσσα και έτσι το παραγόμενο αέριο να μπορεί να κινηθεί σε δίκτυα μεγάλων αποστάσεων από τη συσκευή ή να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Αν το ξύλο που θα χρησιμοποιηθεί έχει περιεκτικότητα σε υγρασία μικρότερη του 25% τότε το παραγόμενο αέριο δεν θα περιέχει καθόλου πίσσα.

Η συσκευή αυτή έχει τη ζώνη πυρόλησης και ξήρανσης πάνω από την ζώνη καύσης (καρδιά), ενώ τη ζώνη αναγωγής κάτω από τη ζώνη καύσης. Στον αεριοποιητή αυτόν η εισαγωγή του αέρα γίνεται από την κορυφή του αντιδραστήρα ενώ το παραγόμενο αέριο εξέρχεται από το κάτω μέρος του. Ο αέρας εγχύεται μέσω ακροφυσίων πυρολύοντας το ξύλο προς παραγωγή ξυλοκάρβουνου και πίσσας. Μέρος των προϊόντων της πυρόλυσης καίγονται πλήρως παράγοντας θερμότητα, διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμό. Τα προϊόντα της τέλει καύσης ανάγονται καταναλίσκοντας τα υπόλοιπα προϊόντα της πυρόλυσης. Με αυτό τον τρόπο το περιεχόμενο της πίσσας μειώνεται σε 0,1% κατά βάρος του συνολικού παρεχόμενου ξύλου. Το παραγόμενο αέριο είναι πιο κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί σε καυστήρες, μηχανές εσωτερικής καύσης και αεριοστροβίλους αν και μπορεί να περιέχει κάποια προϊόντα πυρόλυσης και ατμό. Η θερμοκρασία του παραγόμενου αερίου στην έξοδο της συσκευής είναι περίπου 300-400°C, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται σύστημα ψύξης.

Μειονεκτήματα των συσκευών αυτού του τύπου είναι:

- Τα κομμάτια καύσιμου ξύλου που χρησιμοποιούνται πρέπει να έχουν ομοιόμορφο μέγεθος και χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία σε σχέση με τους αντιδραστήρες ανερχόμενης ροής.
- Οι αεριοποιητές κατερχόμενης ροής παρουσιάζουν δυσκολίες στη διανομή του απαιτούμενου οξυγόνου/αέρα σε μια αρκετά ευρεία περιοχή, όπως η περιοχή της κλίνης. Γι αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διατάξεις διανομής του αέρα μέσα από πολλά ακροφύσια που βρίσκονται πάνω σε ένα κεντρικό κλάδο που είτε είναι σταθερός είτε διαθέτει πρόσθετους κλάδους οι οποίοι περιστρέφονται μέσα στον αεριοποιητή [44].

### **3.1.7 Κυψέλες καυσίμου ( fuel cells)**

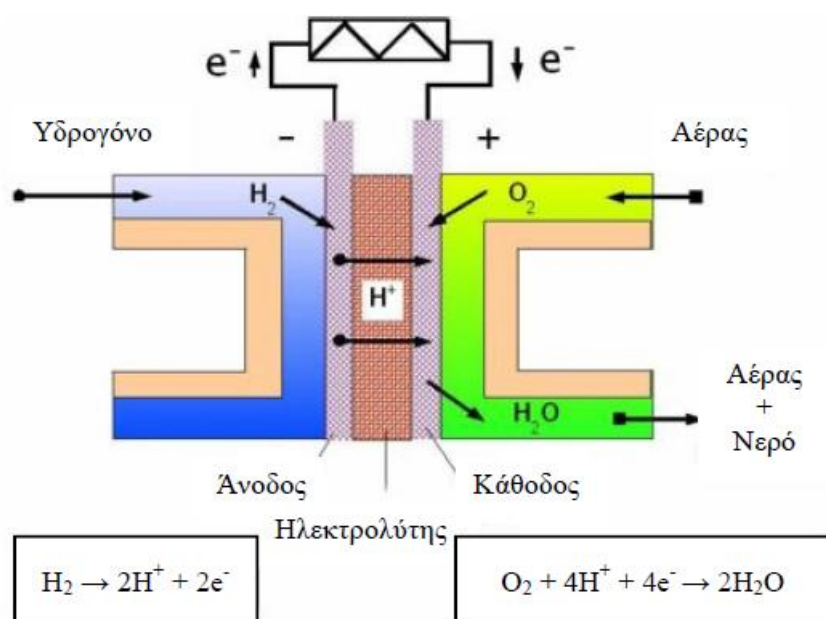
Οι κυψέλες είναι ηλεκτροχημικές συσκευές οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα απευθείας μετατροπής της χημικής ενέργειας ενός καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Μια



κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί συνήθως το υδρογόνο, ως καύσιμο, και το οξυγόνο ως οξειδωτικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με το νερό και τη θερμότητα ως υποπροϊόντα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Η πρώτη κυψέλη φτιάχτηκε από τον Sir William Grove το 1839.

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: ένα καύσιμο που περιέχει συνήθως υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα).

Ορισμένοι τύποι κυψελών μπορούν επίσης να λειτουργήσουν και με διοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες. Όσο είναι δυνατός ο ανεφοδιασμός με καύσιμα η κυψέλη καυσίμου θα συνεχίσει να παράγει ενέργεια. Εφόσον η μετατροπή του καυσίμου σε ενέργεια πραγματοποιείται μέσω μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας, και όχι καύσης, η διαδικασία είναι καθαρή, ήσυχη και υψηλής απόδοσης – δύο έως τρεις φορές πιο αποτελεσματική από την καύση [35]. Στο παρακάτω σχήμα περιγράφεται η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου.



**Διάγραμμα 5:** Περιγραφή της αρχής λειτουργίας των κυψελίδων καυσίμου. Πηγή: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Fuell\\_cell.jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Fuell_cell.jpg)

### *Τύποι κυψελίδων καυσίμου*

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελίδων καυσίμου. Η διαφορετικότητά τους έγκειται στο είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται στον κάθε τύπο. Το είδος του ηλεκτρολύτη καθορίζει την θερμοκρασία λειτουργίας της κάθε κυψελίδας. Έτσι, οι κυψελίδες καυσίμου μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που λειτουργούν σε υψηλές και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στην πρώτη κατηγορία οι πιο γνωστές κυψελίδες είναι οι κυψελίδες τηγμένου άλατος και στερεού ηλεκτρολύτη ενώ στη δεύτερη οι αλκαλικές κυψελίδες, φωσφορικού οξέος και μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Παρακάτω αναλύεται συνοπτικά ο κάθε τύπος κυψελίδας καυσίμου [16].

- ***Κυψελίδες καυσίμου τηγμένου άλατος (MCFC)***

Οι κυψελίδες καυσίμου τηγμένου άλατος (Molten Carbonate Fuel Cells) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη τηγμένα ανθρακικά άλατα, ενώ λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από περίπου 650°C. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας δε χρησιμοποιούνται ως καταλύτες ευγενή μέταλλα, αλλά συνήθως νικέλιο (Ni). Επίσης, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να γίνει και «εσωτερική αναμόρφωση» του καυσίμου στην συγκεκριμένη κυψελίδα και άρα δεν απαιτείται μεγάλη καθαρότητα. Το κύριο μειονέκτημα των MCFC είναι ο χρόνος ζωής τους. Οι υψηλές θερμοκρασίες και οι διαβρωτικοί ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται επιταχύνουν τη διάβρωση των εξαρτημάτων των συγκεκριμένων κυψελίδων. Επίσης, οι ίδιες αιτίες απαιτούν την χρήση κατάλληλων υλικών και άρα την αύξηση του κόστους κατασκευής.

- ***Κυψελίδες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (SOFC)***

Οι κυψελίδες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (Solid Oxide Fuel Cells) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη κεραμικά υλικά. Η μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται με απόδοση 50-60%, ενώ με εκμετάλλευση και της παραγόμενης θερμότητας η συνολική της τιμή αυξάνεται σε ποσοστό 80%. Οι SOFC λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως μεγαλύτερες από 800°C. Οι συγκεκριμένες κυψελίδες είναι και πιο ανθεκτικές στη δηλητηρίαση από θείο(S), συγκρινόμενες με αυτές τηγμένου άλατος. Τα μειονεκτήματα των SOFC, όπως και των MCFC, έγκειται στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και αφορούν την διάρκεια ζωής τους, το υψηλό κόστος κατασκευής, αλλά και τα μεγάλα χρονικά διαστήματα που απαιτούνται κατά την εκκίνησή τους.

- ***Αλκαλικές κυψελίδες καυσίμου (AFC)***

Οι αλκαλικές κυψελίδες καυσίμου (Alkali Fuel Cells) ήταν οι πρώτες κυψελίδες που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ για απευθείας παραγωγή ενέργειας και πόσιμου νερού στα διαστημόπλοια (Apollo). Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται είναι συνήθως υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH), ενώ ως καταλύτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα μη-

ευγενή μέταλλα. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των AFC κυμαίνονται από 100-250°C, αλλά πρόσφατα έχουν αναπτυχθεί και κυψελίδες που λειτουργούν σε θερμοκρασίες 25-70°C. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των αλκαλικών κυψελίδων καυσίμου είναι ότι δηλητηριάζονται πολύ εύκολα από το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), απαιτώντας τροφοδοσία με υψηλής καθαρότητας υδρογόνο και οξυγόνο, μια διεργασία αρκετά δαπανηρή.

- ***Κυψελίδες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)***

Οι κυψελίδες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν το φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη, ενώ ως καταλύτη τον λευκόχρυσο (Pt). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των PAFC είναι περίπου 150-200°C και η συνολική απόδοσή τους ανέρχεται σε ποσοστό 80% (αν και η απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κυμαίνεται σε μάλλον χαμηλά επίπεδα 35-45%). Οι κυψελίδες φωσφορικού οξέος μπορούν να λειτουργήσουν μέχρι 1.5% περιεκτικότητα του καυσίμου σε CO, οπότε αυξάνει το εύρος των πιθανών χρησιμοποιούμενων καυσίμων. Τα μειονεκτήματα των PAFC είναι το κόστος τους (λόγω των καταλυτών Pt), η μειωμένη αποδοτικότητά τους, αλλά και ο μεγάλος όγκος τους.

- ***Κυψελίδες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)***

Οι κυψελίδες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη στερεά πολυμερή, ενώ τα ηλεκτρόδια περιέχουν καταλύτη λευκόχρυσου. Οι PEM λειτουργούν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες (~80 °C), με αποτέλεσμα η εκκίνηση της λειτουργίας τους να γίνεται γρήγορα. Η συνολική τους απόδοση αγγίζει το ποσοστό του 60%. Για τη λειτουργία τους χρειάζονται υδρογόνο, οξυγόνο από τον αέρα και νερό, ενώ δεν απαιτούν ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά, όπως οι άλλες κυψελίδες, με αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής τους. Τα μειονεκτήματά τους είναι το κόστος τους, λόγω των καταλυτών Pt, και η ευαισθησία τους στη δηλητηρίαση από το μονοξείδιο του άνθρακα.

#### *Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των κυψελίδων καυσίμου*

Οι κυψελίδες καυσίμου, συγκρινόμενες με τα υπόλοιπα συστήματα παραγωγής ενέργειας, συγκεντρώνουν αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχήν, είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αφού τα μόνα παραπροϊόντα που προέρχονται από την καύση του H<sub>2</sub> είναι νερό και θερμότητα. Επίσης, η απόδοσή τους είναι αρκετά μεγάλη, αφού η τιμή της δεν περιορίζεται από τον κύκλο Carnot, όπως συμβαίνει με τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η απόδοσή τους μάλιστα μπορεί και να αγγίξει το 90% σε συστήματα συμπαραγωγής με εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας. Οι κυψελίδες καυσίμου μπορούν να λειτουργούν συνεχώς και επιδεικνύουν μεγάλη προσαρμοστικότητα στις ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ παράγουν συνεχές ρεύμα μεγάλης σταθερότητας, γεγονός σημαντικό σε ευαίσθητους τομείς όπως η μικροηλεκτρονική. Θεωρούνται αξιόπιστες αφού δεν έχουν κινητά μέρη, ενώ άλλο ένα πλεονέκτημα είναι η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας αρκετών τύπων κυψελίδων. Τέλος, λειτουργούν αθόρυβα με αποτέλεσμα να μειώνεται η

ηχορύπανση γεγονός που επιτρέπει την εγκατάστασή τους σε κοντινές αποστάσεις από οικισμούς. Τα δύο βασικά μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής [16,35].

#### *Απόδοση συστημάτων Κυψελών Καυσίμου*

Η απόδοση των συστημάτων των κυψελών καυσίμου εξαρτάται από τον τύπο της κυψέλης και της δυναμικότητάς της. Η ηλεκτρική απόδοση μιας κυψέλης, καθορίζεται από τις αντίστοιχες αποδόσεις των επί μέρους υποσυστημάτων που τη συνθέτουν. Γενικά, παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης κατά  $1/6$  έως  $1/3$  από τις μονάδες εσωτερικής καύσης (ηλεκτρική απόδοση μέχρι και 45% αλλά μικρή απόδοση συμπαραγωγής) με σαφώς μικρότερες εκπομπές ρύπων και πιο αθόρυβη λειτουργία. Η επισκευή τους όμως απαιτεί περισσότερο εξειδικευμένο προσωπικό από εκείνο των παραδοσιακών τεχνολογιών και υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία στην ποιότητα καυσίμου.

Ανάλογα με τον τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται διαχωρίζονται διάφορα είδη κυψελών καυσίμου: μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) , φωσφορικού οξέος (PAFC), λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC), στερεού οξειδίου (SOFC), άμεσης μεθανόλης (DMFC), αλκαλικά (AFC) [35].

Ο πίνακας που ακολουθεί συγκεντρώνει τα κυριότερα χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων κυψελών καυσίμου. Κάποια από τα κυριότερα χαρακτηριστικά μπορούν να θεωρηθούν ο βαθμός απόδοσης και η ισχύς. Λαμβάνοντας υπόψιν τον πίνακα οι κυψέλες καυσίμου SOFC, MCFC και PEMFC συγκεντρώνουν τις υψηλότερες τιμές στο βαθμό απόδοσης και στην ισχύ.

**Πίνακας 13:** Σύνοψη των κυριότερων χαρακτηριστικών των κυψελών καυσίμου [35].

	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Ηλεκτρολύτης</b>	Υδροξείδιο του καλίου	Πολυμερές	Πολυμερές	Φωσφορικό Οξύ	Μίγμα Ανθρακικών Αλκαλίων	Σταθεροποιημένο ζirkόνιο
<b>Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)</b>	60-90	70-100	90	150-220	600-700	650-1000
<b>Θερμότητα από Συμπαγωγή</b>	Καθόλου	Χαμηλής ποιότητας	Καθόλου	Αποδεκτή για πολλές εφαρμογές	Υψηλή	Υψηλή
<b>Βαθμός Απόδοσης</b>	50-70%	40-50%	25-40%	40-45%	50-60%	50-60%
<b>Καύσιμο</b>	H <sub>2</sub> . Απαραίτητη η απομάκρυνση του CO <sub>2</sub> από τα αέρια της ανόδου και της καθόδου.	H <sub>2</sub> . Αν αυτό προέρχεται από αναμόρφωση, η περιεκτικότητά σε CO να είναι <10ppm	Διάλυμα νερού/ μεθανόλης	H <sub>2</sub> Και από αναμόρφωση	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο	H <sub>2</sub> , CO, φυσικό αέριο
<b>Ισχύς</b>	Μέχρι 20kW	Μέχρι 250kW	<10kW	>50kW	>1MW	>200kW
<b>Εφαρμογές</b>	Μικρές μονάδες. Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές.	Οικιακή και εμπορική παραγωγή Συστήματα κίνησης οχημάτων	Φορητές συσκευές	Εμπορική παραγωγή. Μεγάλα οχήματα (λεωφορεία)	Εμπορική και βιομηχανική παραγωγή. Μονάδες μεγάλης ισχύος (MW)	Οικιακή, εμπορική και βιομηχανική παραγωγή (μεγάλη ισχύς).
<b>Χρόνος Εκκίνησης (h)</b>	<0.1	<0.1	<0.2	1-4	>10	5-10

#### *Κυψελίδες καυσίμου άμεσης τροφοδοσίας με βιομάζα*

Η βιομάζα ως καύσιμο σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι συνήθως αντικοινομική λόγω της μικρής απόδοσης σε ηλεκτρισμό και του μεγάλου κόστους μεταφοράς. Μεγαλύτερη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί με τις κυψελίδες καυσίμου οι οποίες προαπαιτούν ένα επιπλέον στάδιο προεπεξεργασίας το οποίο ονομάζεται αεριοποίηση έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα καύσιμο πλούσιο σε υδρογόνο. Η δημιουργία της απευθείας τροφοδοσίας κυψελίδας καυσίμου άνθρακα (DCFC) δημιουργεί νέες προοπτικές στην αξιοποίηση της βιομάζας σε κυψελίδες καυσίμου λόγω της απλότητάς τους. Περιλαμβάνονται δύο στάδια: α) αποξήρανση (ή/και

πυρόλυση ή υδροθερμική απανθράκωση) και β) απευθείας τροφοδοσία στο DCFC με το προεπεξεργασμένο καύσιμο. Το κάρβουνο είναι κατάλληλο καύσιμο για το DC-SOFC παρέχοντας επαρκώς υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Ένας πιθανός τρόπος βελτίωσης της DCFC παραμέτρου είναι η εφαρμογή νέων υλικών ανόδου που είναι καλοί καταλύτες για την αντίδραση Bodouard και αντιστέκονται ενάντια των πιθανών χημικών αντιδράσεων. Το καύσιμο ξυλάνθρακα το οποίο παράγεται από την βιομάζα και τα απόβλητα έχει πολλά πλεονεκτήματα [50]:

- Είναι φτηνό στην παραγωγή και εύκολο στην αποθήκευση
- Είναι εύκολα διαθέσιμο στους καταναλωτές παγκοσμίως
- Δεν αφήνει υπολείμματα υδραργύρου, σχεδόν καθόλου θείου, λίγο άζωτο και παράγει πολύ λίγη στάχτη αφού καεί
- Έχει μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Έχει μεγάλη επιφάνεια και πολλούς δεσμούς οι οποίοι το κάνουν αντιδραστικό σε σχετικά μέτριες θερμοκρασίες

### 3.1.8 Συστήματα συμπαραγωγής

Ο συμβατικός τρόπος που χρησιμοποιούταν ευρέως μέχρι πριν λίγα χρόνια για την κάλυψη των αναγκών σε ενέργεια είναι η προμήθεια ρεύματος από το δίκτυο και η παραγωγή θερμότητας επί τόπου από την καύση πετρελαίου σε ένα λέβητα ή την προμήθεια φυσικού αερίου από το δίκτυο. Δηλαδή είχαμε διαφορετικές πηγές ενέργειας. Στα συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (Σ.Η.Θ. – γνωστή και ως Συμπαραγωγή) παράγεται από την ίδια πηγή ενέργειας την ίδια στιγμή, παράλληλα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια (πχ. Τηλεθέρμανση στην Κοζάνη). Για την συμπαραγωγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε καύσιμο συμβατικό ή ΑΠΕ. Στα συστήματα συμπαραγωγής έχουμε ποιο μεγάλη απόδοση της παραγόμενης ενέργειας, διότι μειώνονται οι απώλειες μέσω της ανάκτησης για επαναχρησιμοποίηση. Στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το μεγαλύτερο τμήμα της ενέργειας χάνεται σε απώλειες. Αποτέλεσμα αυτού είναι η απόδοση να βρίσκεται σε ποσοστό 30 έως 45%. Σε αντιδιαστολή τα συστήματα συμπαραγωγής εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερα ποσοστά απόδοσης τα οποία φθάνουν στο 80 έως 85%. Το πόσο μεγάλη θα είναι η απόδοση εξαρτάται από το αν υπάρχει ζήτηση σε θερμικό και ηλεκτρικό φορτίο [51].

Τα αποδοτικότερα συστήματα ΣΗΘ θεωρούνται όσα έχουν την δυνατότητα να ικανοποιήσουν μεγάλη θερμική ζήτηση αλλά παράγοντας όσο είναι εφικτό σχετικά μικρότερης ηλεκτρικής ισχύος. Είναι αναμενόμενο ότι η αναλογία μεταξύ της θερμοκρασία και της παραγόμενης ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογη, δηλαδή όσο αυξάνεται η απαιτούμενη θερμοκρασία της ανακτώμενης ενέργειας, τόσο μειώνεται ο λόγος της παραγόμενης ισχύος προς τη θερμότητα. Τα ΣΗΘ συμβάλλουν στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και αποτελούν μια οικονομική λύση σε αντίθεση, με τον παραδοσιακό έλεγχο της ρύπανσης που επιτυγχάνεται απλά μέσω της επεξεργασίας των καυσαερίων, μειώνοντας την απόδοση και την ωφέλιμη παραγωγή ενέργειας [52].

Όπως προαναφέραμε τα ΣΗΘ καθίστανται οικονομικά συμφέροντα και βρίσκουν ανταπόκριση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τα ΣΗΘ είναι ένας συνδυασμός διαφορετικών εφαρμογών με σκοπό την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης ή ψύξης με σκοπό την παραγωγή μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας. Από ένα σύστημα συμπαραγωγής είναι δυνατόν να προκύψουν δύο ή περισσότερα χρησιμοποιήσιμα ενεργειακά προϊόντα, με την συνολική απόδοση να προκύπτει ως η συνισταμένη της απόδοσης των δύο υποσυστημάτων. Δηλαδή έχουμε δύο υποσυστήματα (το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και το σύστημα ανάκτησης θερμότητας) που το καθένα έχει το δικό του βαθμό απόδοσης αλλά η διάθεση της ενέργειας που παράγεται συνολικά καθορίζει την συνολική απόδοση. Η εφαρμογή του συστήματος ΣΗΘ, εξαρτάται από το μέγεθος που καλείται να καλύψει (αν θα είναι ένα κτήριο ή ένας οικισμός, αν θα είναι μια μικρή επιχείρηση ή μια βιομηχανία), εξαρτάται από την ζήτηση που υπάρχει, την απόσταση ανάμεσα στις περιοχές που θα πρέπει να ικανοποιήσει, καθώς και από το είδος του καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί. [53].

Ο πίνακας 15 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων συμπαραγωγής. Στο πίνακα δίνονται στοιχεία που αφορούν στο πεδίο εφαρμογής των ΣΗΘ, στα καύσιμα που δύναται να χρησιμοποιήσουν, στην παραγόμενη ισχύ, στο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, κλπ.

**Πίνακας 15:** Εφαρμογές τεχνολογιών συμπαραγωγής [35].

Συγκριτικά στοιχεία	Τεχνολογίες					
	Κύκλος ατμού	Ατμομηχανή	Οργανικός κύκλος Rankine	Αντίστροφος κύκλος ανεμοστροβίλου	Κύκλος στροβίλου θερμού αέρα	Ατμομηχανή τύπου έλικα
<b>Εφαρμογή</b>	Διάφορες χρήσεις θερμότητας και ηλεκτρισμού. Βιομηχανίες υπηρεσίες παροχής ισχύος.	Αποκεντρωμένα συστήματα ισχύος και θέρμανσης. Οικιακή χρήση, νοσκομεία και βιομηχανίες	Αποκεντρωμένα συστήματα ισχύος και θέρμανσης. Βιομηχανίες, βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου, κατασκευαστικές εταιρείες.	Παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.	Παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.	Αποκεντρωμένα συστήματα ισχύος και θέρμανσης.
<b>Καύσιμα</b>	Άνθρακας, πετρέλαιο, βιομάζα, κάθε είδους καύσιμο.	Άνθρακας, πετρέλαιο, βιομάζα, κάθε είδους καύσιμο.	Βιομάζα κάθε καύσιμο είναι πιθανό.	Βιομάζα	Βιομάζα πετρέλαιο, άνθρακας, κάθε είδους καύσιμο.	Βιομάζα πετρέλαιο, άνθρακας, κάθε είδους καύσιμο.
<b>Ισχύς</b>	0,5-30MW και πάνω	20-2000 kW	300kW και πάνω	1 MW και πάνω	400 kW και πάνω	20-2000 kW
<b>Θόρυβος</b>	-	Χρειάζεται μόνωση	-	-	-	Χρειάζεται μόνωση
<b>Συντήρηση</b>	1 φορά την εβδομάδα επιθεώρηση στροβίλων και σωληνώσεων	Χρειάζεται πολύ εργασία	4 ώρες εβδομαδιαίως	Εάν χρησιμοποιούνται τυποποιημένα εξαρτήματα δεν υπάρχει πρόβλημα.	Τα μέρη των εναλλακτών θερμότητας καθαρίζονται αυτόματα, τα μέρη που δέχονται υψηλή θερμική καταπόνηση θα πρέπει να ελέγχονται τακτικά για τυχόν ρωγμές.	Πολύ χαμηλές απαιτήσεις σε συντήρηση



<b>Οικολογικές πτυχές</b>	Αφαλάτωση και απομάκρυνση λάσπης από το νερό που κυκλοφορεί.	Αφαλάτωση και απομάκρυνση λάσπης από το νερό που κυκλοφορεί.	Λόγω του χαμηλού σημείου ανάφλεξης οι απώλειες από διαρροή του εργαζόμενου ρευστού πρέπει να αποφευχθούν πλήρως.	Χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου λόγω καύσης βιομάζας.	Χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου λόγω καύσης βιομάζας.	Αφαλάτωση και απομάκρυνση λάσπης από το νερό που κυκλοφορεί.
<b>Λειτουργία</b>	Κακή λειτουργία σε μερικά φορτία.	Καλή εφαρμογή μερικών φορτίων.	Καλή εφαρμογή μερικών φορτίων.	-	Μεγάλες θερμικές καταπονήσεις στον εναλλακτή θερμότητας.	Καλή εφαρμογή μερικών φορτίων.
<b>Μέγεθος εγκατάστασης</b>	1 MW	500 kW	500 kW	500-1500 kW	250-500 kW	500-700 kW
<b>Κόστος επένδυσης</b>	1500€/kW	1500€/kW	2300€/kW	3600€/kW	3900€/kW	1600€/kW
<b>Ειδικό κόστος συντήρησης</b>	0,007€/kW	0,007-0,011€/kW	0,07€/kW	Άγνωστο	Άγνωστο	0,004-0,007€/kW
<b>Ηλεκτρική απόδοση</b>	10-20%	6-20%	10-20%	22%	30%(με έγχυση ατμού)	10-15%
<b>Συνολική απόδοση</b>	70-85%	80-90%	85%	75%	80%	90%
<b>Παρόν στάδιο ανάπτυξης</b>	Έτοιμο για αγορά.	Έτοιμο για αγορά.	Έτοιμο για αγορά.	Αρχικό στάδιο.	Στάδιο επίδειξης.	Στάδιο επίδειξης.
<b>Δυνατότητα βραχυπρόθεσμης μείωσης του κόστους</b>	Σε 2 χρόνια	Σε 3 χρόνια	Σε 3 χρόνια	Σε 3 χρόνια	Σε 3 χρόνια	Σε 2 χρόνια
<b>Δυνατότητα βραχυπρόθεσμης ανάπτυξης</b>	Σε 3 χρόνια	Σε 2 χρόνια	Σε 2 χρόνια	Σε 3 χρόνια	Σε 3 χρόνια	Σε 3 χρόνια

### Τεχνικές συμπαραγωγής

Τα συστήματα συμπαραγωγής διακρίνονται σε συστήματα «κορυφής» και «βάσης». Στα συστήματα «κορυφής» η πρωταρχική λειτουργία είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω ενός κινητήρα, με την θερμική ενέργεια που απορρίπτεται να χρησιμοποιείται για τις διεργασίες της μονάδας. Αντίθετα, στα συστήματα «βάσης» παράγεται πρωτίστως θερμότητα και από την απορριπτόμενη ενέργεια παράγεται στη συνέχεια η ηλεκτρική ισχύς.

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η ενεργειακή ανάλυση ενός συστήματος συμπαραγωγής. Προς τούτο εισάγονται οι κάτωθι συμβολισμοί [54]:

**W**: ηλεκτρική (ή μηχανική) ισχύς,

**Q**: θερμική ισχύς,

**H<sub>fz</sub>**= ισχύς καυσίμου που καταναλίσκεται από το σύστημα συμπαραγωγής

= **m<sub>fz</sub>** (παροχή καυσίμου) x **H<sub>u</sub>** (κατώτερη θερμογόνο ικανότητα καυσίμου).

**H<sub>fw</sub>**: ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος

**H<sub>fQ</sub>**: ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή θερμότητας Q,

**H<sub>fx</sub>**: ολική ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή των W και Q (χωρίς συμπαραγωγή).

$$H_{fx} = H_{fw} + H_{fQ} = (m_{fz} \times H_u)W + (m_{fz} \times H_u)Q$$

Ηλεκτρικός(ή μηχανικός) βαθμός απόδοσης συμπαραγωγής: **n<sub>e</sub> = W/H<sub>fz</sub>**

Θερμικός βαθμός απόδοσης συμπαραγωγής: **n<sub>h</sub> = Q/H<sub>fz</sub>**

Ολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης συμπαραγωγής: **n = n<sub>e</sub> + n<sub>h</sub>**

Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα (Power to Heat Ratio): **PHR = W/Q = n<sub>e</sub>/n<sub>h</sub>**

Λόγος εξοικονομήσεως ενέργειας καυσίμου (Fuel Energy Savings Ratio):

$$FESR = (H_{fx} - H_{fz})/H_{fx}$$

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά των συστημάτων συμπαραγωγής με βάση την ισχύ, τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, τον ολικό βαθμό απόδοσης και τον λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα. Είναι εμφανές με βάση τον ολικό βαθμό απόδοσης (B.A.) ότι από την κατηγορία των τεχνικών συμπαραγωγής, ο συνδυασμός αεροστροβίλου και ατμοστροβίλου έχει τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, ενώ αντίστοιχα από την κατηγορία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής οι κυψέλες καυσίμου συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό.

**Πίνακας 14:** Χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής [35].

Τεχνικές συμπαραγωγής	Ισχύς (MW)	Ηλεκτρικός Β.Α. (%) για πλήρες φορτίο	Ολικός Β.Α. (%)	Λόγος ηλεκτρισμού/ θερμότητα
Ατμοστρόβιλος	0,5-100	14-30	60-85	0,1-0,3
Αεριοστρόβιλος ανοικτού κύκλου	0,1-100	20-35	60-80	0,5-0,8
Αεριοστρόβιλος κλειστού κύκλου	0,5-100	30-35	60-80	0,5-0,8
Συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου/ατμοσ τρόβιλου	4-100	35-45	70-88	0,6-1,1
<b>ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ</b>				
Μικροτουρμπίνες	0.03-0.2	26-30%	76-80%	0.4-0.57
Μονάδες Εσωτερικής καύσης	0.005–7	25-42%	75 –85%	0.6-0.9
Κυψέλες Καυσίμου	0.001-0.25	32-55%	80-85%	0.8-1

### *Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΣΗΘ*

Τα συστήματα συμπαραγωγής εμφανίζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με την αποτίμηση της επιρροής τους στο περιβάλλον, την οικονομία και την τοπική κοινωνία, όπως και στο θέμα της εξοικονόμησης καυσίμου. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής, η θέση και το είδος του συστήματος μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις αρνητικές επιπτώσεις. Η εξειδικευμένη μελέτη ώστε να επιλεγεί κάθε φορά το ιδανικότερο σύστημα, φέρνει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ΣΗΘ συνοψίζονται παρακάτω [35]:

- Τα συστήματα συμπαραγωγής εκμεταλλεύονται αποδοτικότερα την χρησιμοποιούμενη ενέργεια με αποτέλεσμα να έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.
- Λόγω της καλύτερης αξιοποίησης των καυσίμων, υπάρχει μικρότερη κατανάλωση, από αυτή που θα είχαμε σε περίπτωση που θα χρησιμοποιούσαμε αν είχαμε δύο ανεξάρτητα συστήματα παραγωγής. Αυτό οδηγεί σε μειωμένες εκπεμπόμενων αέριων ρύπων ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ). Εάν δε χρησιμοποιηθεί και ανανεώσιμο καύσιμο, οι αέριοι ρύποι, μπορούν να τείνουν στο μηδέν.
- Απαιτείται σύντομος χρόνος για την κατασκευή τους, το μέγεθος τους είναι μικρό και αυτό καθιστά τα συστήματα ευέλικτα, με αποτέλεσμα να μπορούν να ικανοποιήσουν τους τοπικούς καταναλωτές καλύτερα σε σχέση με τις μεγάλες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.
- Η δυνατότητα τοποθέτησης των μονάδων συμπαραγωγής, σε θέση κοντά στους καταναλωτές, μειώνει σε μεγάλο βαθμό τις απώλειες μεταφοράς. Γεγονός που δεν μπορεί να επιτευχθεί με τις κλασικές μεγάλες μονάδες.
- Η μεταβολή στη ζήτηση που μπορεί να υπάρχει μακροπρόθεσμα μπορεί να καλυφθεί πιο εύκολα, διότι λόγω του μικρού μεγέθους των μονάδων υπάρχει ευελιξία και αυτό τις καθιστά πιο αξιόπιστες.

- Το συγκριτικά χαμηλότερο κόστος συμβάλει στη δημιουργία αύξησης της ανταγωνιστικότητας.
- Με τα καινούρια συστήματα δημιουργούνται σύγχρονες καινοτόμες εφαρμογές αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στη χώρα μας είναι η τηλεθέρμανση
- Υπάρχουν μικρότερες απαιτήσεις για εισαγωγή καυσίμων, διότι απαιτούνται λιγότερα καύσιμα ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. Γεγονός ιδιαίτερα ωφέλιμο για την οικονομία.
- Η δυνατότητα να δημιουργηθούν νέες επενδύσεις με την κατασκευή μικρών μονάδων συμπαραγωγής, συνδράμουν στην αύξηση της απασχόλησης στο βιομηχανικό τομέα σε γεωγραφική διασπορά. Δηλαδή δεν έχουμε συσσώρευση της απασχόλησης στις μεγάλες βιομηχανικές ζώνες.

Εκτός όμως από τα θετικά αποτελέσματα της χρήσης των μονάδων συμπαραγωγής, υπάρχουν και αρνητικές συνέπειες από την εφαρμογή τους και αναφέρουμε κυρίως τις ακόλουθες:

Η χρήση συμβατικών καυσίμων στα συστήματα συμπαραγωγής, δεν βελτιώνει την εκπομπή ρυπογόνων ουσιών. Συνεπώς η ρύπανση εξακολουθεί να είναι αυξημένη.

- Στην περίπτωση που οι μονάδες συμπαραγωγής κατασκευαστούν κοντά σε αστικά κέντρα, ή ρύπανση που θα επιφέρουν στο αστικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη από της κλασικές μεγάλες μονάδες, διότι οι μεγάλοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά κανόνα βρίσκονται μακριά από τα αστικά κέντρα.
- Η χρήση συμβατικών καυσίμων στα συστήματα συμπαραγωγής, δεν βελτιώνει την εκπομπή ρυπογόνων ουσιών. Συνεπώς η ρύπανση εξακολουθεί να είναι αυξημένη.
- Υπάρχει πιθανότητα να προκληθεί πρόβλημα στην ευστάθεια του ηλεκτρικού δικτύου, εάν ο ρυθμός της ζήτησης δεν είναι ανάλογος με το ρυθμό παραγωγής. Ειδικότερα η δημιουργία πολλών μικρών μονάδων μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη παραγωγή από τη ζήτηση.
- Η τεχνολογία των νέων μονάδων που δημιουργούνται, ενδέχεται να προκαλέσει αισθητική επιβάρυνση, ηχορύπανση ή ακόμη και ρύπανση του εδάφους και των υπογείων υδάτων από τα κατάλοιπα της καύσης.

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τη συνεισφορά των ΣΗΘ στη συνολική ηλεκτρική παραγωγή κατά τα έτη 1996-2010 σε διάφορες χώρες.

**Πίνακας 15:** Συνεισφορά (%) των ΣΗΘ στη συνολική ηλεκτρική παραγωγή. Πηγή: Eurostat.

	1996	1997	1998	2000	2002	2004	2006	2007	2008	2009	2010
EU (27 countries)	:	:	:	:	:	10.5	10.9	10.9	11	11.4	11.7
EU (25 countries)	:	:	:	:	9.9	10.2	10.8	10.9	11	11.5	11.8
EU (15 countries)	9.4	10.1	10.9	9.6	9.2	9.5	10.1	10.3	10.3	11	11.4
Belgium	3.9	3.9	4.1	6.5	7.5	8.4	8.7	12.5	:	14.5	16.0
Bulgaria	:	:	:	:	:	7.3	6	9.4	10	9.4	8.0
Czech Republic	:	:	:	:	17.1	16.4	15.1	13	14.2	13.4	14.2
Denmark	54.6	59.9	62.3	52.6	49.1	50	40.7	42.8	46.1	45.3	49.2
Germany	6.8	6.7	7.5	10.6	9.8	9.3	12.5	12.2	12.5	13	13.2
Estonia	:	:	:	:	11	9.9	10.7	7.2	8.6	9.2	10.3
Ireland	1.9	2.3	1.9	2.4	2.5	2.6	5.6	6.3	6.2	6.3	6.7
Greece	2.1	2.2	2.1	2.1	1.9	1.5	1.7	1.6	1.9	3	4.3
Spain	7.7	9.8	11.2	9.2	7.8	7.9	7.2	7.1	7	7.5	7.4
France	1.9	2.1	2.5	3	4	4.1	3.2	3.2	3.1	4.3	2.8
Italy	12.9	16	17.3	8.3	7.4	8.1	9.8	10.3	9.5	10.2	11.5
Cyprus	0	0	0	0	0	0	0.3	0.3	0.3	0.4	1.0
Latvia	:	:	:	:	37.5	32	42.6	40.9	33.6	19.7	45.0
Lithuania	:	:	:	:	9.7	11.6	14.3	13.2	12.7	13.9	34.6
Luxembourg	:	9.5	22.5	17.7	7.9	10.6	10.9	9.9	11.9	10.1	9.6
Hungary	:	:	:	:	21.5	18.2	22.4	21.4	21.1	20.5	19.6
Malta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Netherlands	42.7	47.9	52.6	37.6	29.9	29.5	29.9	30.1	33.6	32.1	33.2
Austria	24.7	24.7	24.8	10.4	13.6	15.2	16.1	15.6	15.3	13.2	15.4
Poland	:	:	:	:	16	17	16	17.3	16.9	17.2	17.6
Portugal	8.2	8.6	8.4	10	10	11	11.6	12.3	11.9	11	11.8
Romania	:	:	:	:	:	26.4	18	10.7	9.6	10.8	10.8
Slovenia	:	:	:	:	5.9	6.4	7.4	7.2	6.7	6.2	6.9
Slovakia	:	:	:	:	17.5	15.3	27.6	25.6	24	19.2	15.9
Finland	32.5	33.3	35.8	36.4	38	34	34.9	34.4	35.6	35.8	36.2
Sweden	7.3	6.2	6	5.9	6.8	8.1	8	8.2	9.6	10.5	12.5
United Kingdom	4.3	4.9	5.2	6.1	5.4	6.7	6.3	6.4	6.4	6.5	6.2
Iceland	:	:	:	:	:	:	14.4	14.4	:	:	:
Norway	:	:	:	:	:	:	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Croatia	:	:	:	:	:	:	:	:	:	12.7	14.3
Turkey	:	:	:	:	:	4	4.4	4.6	4.2	3.8	3.8

## Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η βιομάζα είναι η πρώτη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή. Στη σύγχρονη εποχή και με την δυνατότητα που μας δίνει η ανάπτυξη της τεχνολογίας, η χρήση της βιομάζας έχει ευρύτερη και πιο εξειδικευμένη εφαρμογή. Επιπλέον, οι πρώτες ύλες δεν περιορίζονται στο ξύλο.

Γνωρίζουμε ότι η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι ένα από τα σημαντικά προβλήματα παγκοσμίως. Η Ευρωπαϊκή Ένωση στο πλαίσιο αυτό έχει ως στρατηγικό στόχο τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20 % μέχρι το 2020 (σε σχέση με τα επίπεδα του έτους 1990). Επίσης στόχο της Ε.Ε. αποτελεί η αύξηση των Α.Π.Ε. κατά 20% καθώς και η αύξηση κατά 20% της ενεργειακής απόδοσης. Για την επίτευξη αυτών των στόχων η Ευρωπαϊκή Ένωση συγχρηματοδοτεί δράσεις (επενδύσεις έρευνας, και υποδομές) που συμβάλουν σε αυτό.

Είναι λοιπόν αυτονόητη η σημαντική συνδρομή της χρήσης βιοκαυσίμων και συνεπώς η αναγκαιότητα για επέκταση και βελτίωση της εφαρμογής τους. Ο συγκεκριμένος κλάδος έχει προοπτικές περαιτέρω ανάπτυξης και εφαρμογής, τόσο τεχνολογικά όσο και αναφορικά με τις πρώτες ύλες που θα χρησιμοποιηθούν. Η χρήση βιοκαυσίμων μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη των παραπάνω στόχων, σε συνδυασμό με την αξιοποίηση άλλων εναλλακτικών τεχνολογιών ενέργειας, όπως π.χ. η ηλεκτροκίνηση στις μεταφορές.

Παρατηρούμε ότι όλο και περισσότερο ενδιαφέρον συγκεντρώνεται για την βιομάζα δεύτερης γενιάς και τις τεχνικές επεξεργασίας της, όπως π.χ. η αεριοποίηση, η πυρόλυση, η υδρόλυση, και η ζύμωση. Με τις σύγχρονες αυτές τεχνικές δύναται να παραχθούν μια σειρά από υγρά και αέρια καύσιμα. Η έρευνα για την παραγωγή βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς με νέες τεχνολογίες που καθιστούν τη χρήση τους ανταγωνιστική βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη. Επικεντρώνεται κυρίως στην παραγωγή βιοαλκοολών, με πρώτη την βιοαιθανόλη, από λιγνοκυτταρινούχα άχρηστα φυτικά παραπροϊόντα (κοτσάνια καλαμποκιού, στελέχη βαμβακιού, άχυρα, δασικά υπολείμματα, κλπ).

Παράλληλα έχουμε τα βιοκαύσιμα τρίτης και τέταρτης γενιάς στα οποία η έρευνα – εφαρμογή έχει αρχίσει να παρουσιάζει τα πρώτα θετικά αποτελέσματα. Παράδειγμα αναφέρουμε την παραγωγή βιοκαυσίμων από φύκια αλλά και από CO<sub>2</sub> συνθετικά.

Σημαντική επίσης εξέλιξη έχει αρχίσει να σημειώνεται στην παραγωγή καυσίμων από το βιοαέριο. Το βιοαέριο έχει πλήθος εφαρμογών, όπως χρήση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καύσιμο για μεταφορικά μέσα και οικιακές χρήσεις. Πλεονέκτημα που ενισχύει τη χρήση του βιοαερίου είναι ο μεγάλος αριθμός καθαρών καυσίμων που μπορούν να προκύψουν κατά τη χημική επεξεργασία του. Όπως μελετήθηκε και αναλύθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία υπάρχει δυνατότητα αναμόρφωσης βιοκαυσίμων, όπως το βιοέλαιο και η βιοαιθανόλη, για την παραγωγή αερίου ρεύματος πλούσιο σε υδρογόνο με σκοπό την τροφοδοσία

κυψελίδων καυσίμου. Οι συγκεκριμένες διεργασίες χαρακτηρίζονται από την πρωτοτυπία και καινοτομία τους αλλά και την υψηλή αποδοτικότητά τους.

Τέλος αναφέρουμε ότι, για την επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί για την καταπολέμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ΕΕ, υπάρχει νέο θεσμικό πλαίσιο που αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας και τις ΑΠΕ, το πλαίσιο αυτό είναι υποχρεωτικό για την εφαρμογή του από όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στην κατεύθυνση αυτή εντατικοποιείτε και προωθείτε η χρήση νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας και νέων εναλλακτικών καυσίμων, αντί των συμβατικών. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα δίνονται κίνητρα μέσω της συγχρηματοδότησης για νέες επενδύσεις στον τομέα της παραγωγής ενέργειας από βιομάζα και στη χρήση των βιοκαυσίμων. Επίσης δίνονται επιχορηγήσεις σε επενδύσεις βιομηχανικών μονάδων. Ανοίγεται μια νέα αγορά σε προϊόντα καινοτόμα, φιλικά στο περιβάλλον αυξάνοντας την απασχόληση και συμβάλλοντας στην παραμονή του αγροτικού πληθυσμού στον τόπο του.

Με βάση αυτά που προαναφέρθηκαν προτείνεται η ενίσχυση της έρευνας για την εξέλιξη των βιοκαυσίμων, η προώθηση της χρήσης τους σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, η διερεύνηση όλων των δυνατοτήτων χρηματοδότησης που υπάρχουν από την ΕΕ καθώς και η ενημέρωση των πολιτών για τα οφέλη από τη χρήση των βιοκαυσίμων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Α. Κατσίρη, “Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία Ενέργεια από βιομάζα”, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, 2010-2011, Αθήνα.
- [2] Β. Δαβόρας “Βιοκαύσιμα Βιοαιθανόλη συμβάλλουν στη βιώσιμη λύση του ενεργειακού προβλήματος”, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης τμήμα Χημείας, 2009, Θεσσαλονίκη.
- [3] D.O. Hall, “Biomass energy in industrialized countries – a view of the future”, Forest ecology and management 91 (1997) 18–19.
- [4] Κ. Αποστολάκης, Σ. Κυρίτσης, Χ. Σούτερ, “Το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας γεωργικών και δασικών υποπροϊόντων”, ΕΛΚΕΠΑ-ΙΤΕ, 1987, Αθήνα
- [5] Η. Γουσγουριώτης, “Αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων ανάπτυξης συστημάτων θέρμανσης με στερεά βιομάζα”, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, 2005, Χανιά
- [6] Γ. Μανέλης, “Τεχνοοικονομική μελέτη ενεργειακών καλλιεργειών για την παραγωγή και εκμετάλλευση βιομάζας”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2012, Αθήνα.
- [7] Λ. Διαμαντοπούλου “Ολοκληρωμένη Τεχνική, Οικονομική και Περιβαλλοντική Διερεύνηση του Κύκλου Ζωής για την Παραγωγή και Χρήση Βιο-υδρογόνου στην Ελλάδα”, διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, 2012, Αθήνα
- [8] Μ. Κουγιουμτζής, “Τεχνοοικονομική μελέτη βιοδιυλιστηρίου”, διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014, Αθήνα
- [9] Δ. Μαρούλη, “Σχεδιασμός και εκπόνηση τεχνο-οικονομικής μελέτης διεργασιών παραγωγής βιοντίζελ από απόβλητα και παραπροϊόντα βιομηχανιών τροφίμων”, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011, Αθήνα
- [10] Ε. Κοντόζογλου, “Έλεγχος ιδιοτήτων μιγμάτων ντήζελ/βιοντίζελ σε υψηλές συγκεντρώσεις βιοντίζελ”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, 2012, Αθήνα.
- [11] N.N.A.N. Yusuf, S.K. Kamarudin, Z. Yaakub. “Overview on the current trends in biodiesel production” Energy Conversion and Management 52 (2011) 2741-2751.
- [12] A. Demirbas, “Progress and recent trends in biodiesel fuels”, Energy Conversion and Management 50 (2009) 14–34.



- [13] G. Knothe, "Biodiesel and renewable diesel: A comparison", *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010) 364–37
- [14] M.A. Fazal, A.S.M.A. Haseeb, H.H. Masjuki, "Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1314 - 1324.
- [15] S. A. Basha, K. R. Gopal, S. Jebaraj. "A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2008) 1628-1634.
- [16] Α. Μπασαγιάννη, "Αναμόρφωση βιοκαυσίμων για την παραγωγή υδρογόνου", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας, 2007, Πάτρα.
- [17] G. Knothe, J. Van Gerpen, J. Krahl, "The Biodiesel Handbook". AOCS PRESS. Champaign, Illinois, 2005
- [18] Μ. Ζαρκαδούλα, "Βιοντίζελ, Επισκόπηση: ιδιότητες- Ευρωπαϊκή προοπτική δυνατότητες παραγωγής στην Ελλάδα", μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, 2006, Αθήνα
- [19] Ν. Δημητρακοπούλου, "Η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βιώσιμη ανάπτυξη της Πάτρας", Πτυχιακή μελέτη, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, 2009, Αθήνα
- [20] Α. Τσεπλετίδου, "Χρήση βιομάζας για θέρμανση στο αστικό περιβάλλον: τάσεις και προοπτικές ", Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2013, Θεσσαλονίκη.
- [21] Κ. Κωνσταντίνου, Ε. Τσακιρίδου, "Παραγωγή Pellets από Αγροτικά Υπολείμματα", Ημερίδα: Στερεά καύσιμα από υπολείμματα αγροτικής και δασικής βιομάζας. AGROTICA, 2015, Θεσσαλονίκη
- [22] Α. Γεωργίου, "Τεχνοοικονομική μελέτη μονάδας παραγωγής καυσίμων προϊόντων από υπολείμματα βιομηχανίας ξύλου και αγροτικά υπολείμματα", Πτυχιακή εργασία, Περιφερειακό Ενεργειακό Κέντρο Κ. Μακεδονίας (ΠΕΚΚΜ), 2012, Μακεδονία
- [23] Β. Δημητρόπουλος, "Προμελέτη σκοπιμότητας παραγωγής βιοαιθανόλης στην Ελλάδα", Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, 2009, Πειραιάς.
- [24] Ε. Καλαμπόγια, "Ανάλυση κύκλου ζωής βιοαιθανόλης και βιοντίζελ ως καύσιμα μεταφοράς", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2005, Χανιά.

- [25] Wyman and Charles, Handbook on bioethanol: production and utilization, Washington (2007), 7-11
- [26] M. K. Francis, "The economics of bioethanol production in the EU", USDA Foreign Agricultural Service, GAIN Report Number: E36081, 2006.
- [27] C. Riley, "Bioethanol: a renewable transportation fuel from biomass", National Renewable Energy Laboratory, 2002, USA
- [28] Ch. Zafiris, "Energy Exploitation of Biogas in Greece" CRES Redubar EIE/06/221/S12.442663, (2005).
- [29] Ch. Zafiris, "Biogas in Greece", National state of the Art, Redubar EIE/06/221/S12.442663, (2007).
- [30] Ch. Zafiris, "Greek Biogas Production from Pig Manure and Co- Digestion. Evaluation of Anaerobic Digestion Projects in Livestock Units" (Final report) CRES (2001).
- [31] Ch. Zafiris, "List of recommendations for installing 'Biogas feeding-in and feeding-out pool'", Redubar EIE/06/221/S12.442663, (2009).
- [32] Λ. Γιακουμέλος, "Τεχνολογίες Παραγωγής και Αξιοποίησης του Βιοαερίου" Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 2012.
- [33] Χ. Ζαφείρης, "Ενεργειακή Αξιοποίηση Βιομάζας και Εφαρμογές" ΚΑΠΕ, 2003.
- [34] Α. Μπουσδέκης, "Αξιοποίηση βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα ελληνικά νησιά", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2012, Αθήνα.
- [35] Σ. Ρογκάκου, "Αξιοποίηση βιοαερίου για παραγωγή ενέργειας και δυνατότητα ανατροφοδότησης στο δίκτυο φυσικού αερίου", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2012, Χανιά.
- [36] J.M. Encinar, F.J. Beltran, A. Ramiro, J.F Gonzalez, "Pyrolysis/Gasification of agricultural residues by carbon dioxide in the presence of different additives: influence of variables", Fuel Processing Technology 55 (1998) 219-233.
- [37] P. Morf, "Secondary reactions of tar during thermochemical biomass conversion", PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich ETH, 2001.
- [38] C. Higman, M. Van Der Burgt, Gasification, Elsevier Science, USA, (2003) 85-150.
- [39] Γ. Κυπριωτάκης, "Η αεροποίηση βιομάζας σε αεροποιητή κατερχόμενης ροής και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2008, Αθήνα.

- [40] Δ. Γκριμέκης, “Πειραματική διερεύνηση της αεριοποίησης αγροτικών υπολειμμάτων σε σχέση με την ξυλώδη βιομάζα σε ρευστοποιημένη κλίνη και ανάλυση της επίδρασης του πυρωμένου ολιβίνη στη διεργασία”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014, Αθήνα.
- [41] P. Basu, “Biomass Gasification and Pyrolysis”, Practical Design and Theory, Elsevier Inc, Kidlington, Oxford, (2010).
- [42] R. Kothari, D Buddhi, R.L Sawhney, “Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods”, Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, issue 2, (2008) 553-563
- [43] N.H Florin, A. Harris, “Hydrogen production from biomass coupled with carbon dioxide capture: The implications of Thermodynamic Equilibrium”, Elsevier, International Journal of Hydrogen Energy 32, (2007) 4119-4134
- [44] A.C. Hollingdale, R. Krishnan, A.P. Robinson, "Charcoal Production: a handbook", National Resources Institute, Commonwealth Science Council, (1991)
- [45] N. Syred, “Short Course on Waste Energy Utilisation Technology”, School of Engineering, UWCC, 1991
- [46] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 3): gasification technologies”, Bioresource Technology 83 (2002) 55-63.
- [47] Κ. Μαρινάκης, “Αεριοποίηση βιομάζας σε ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας, η επίδραση της θερμοκρασίας και του αδρανούς υλικού στην ποιότητα του αερίου σύνθεσης”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2013, Αθήνα.
- [48] KD Panopoulos, C Christodoulou, El Koytsoumpa, “Biomass gasification: gas production and cleaning for diverse applications- CHP and chemical syntheses”. In: M Aresta, A Dibenedetto, Dumeignil, Biorefinery: From biomass to chemicals and fuels, Berlin: De Gruyter, (2012): 302-305
- [49] Στ. Κουφοδήμος, “Καθαρισμός Αερίου Αεριοποίησης για Χρήση σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης Ηλεκτροπαραγωγού Ζεύγους”, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, 2009, Θεσσαλονίκη.
- [50] M. Dudek, P. Tomczyk, R. Socha, M. Skrzypkiewicz, J. Jewulski, “Biomass Fuels for Direct Carbon Fuel Cell with Solid Oxide Electrolyte”, International Journal of Electrochemical Science 8 (2013) 3229-3253.

- [51] Θ. Γέτμος, Σπ. Φουντάς, Α. Ταγαράκη, Ν. Γιαννόπουλος, “Μελέτη αξιοποίησης παραγόμενης βιομάζας στο Ν. Λάρισας με καύση για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας”, Μελέτη Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής και Αγροτικού Περιβάλλοντος Παραγωγής, 2006, Ν. Ιωνία.
- [52] Α.Γεωργιάδης, Σ. Σωτηρίου, “Αξιοποίηση της Βιομάζας στον Ελλαδικό Χώρο για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Συστημάτων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2011, Αθήνα.
- [53] Σ. Σωτηρίου, “Αξιοποίηση τη βιομάζας στον Ελλαδικό χώρο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2011, Αθήνα.
- [54] Α. Παπαδόπουλος, Σημειώσεις παραδόσεως στο μάθημα: “Οικονομική ανάλυση ενεργειακών συστημάτων”, ΑΠΘ - Πολυτεχνική Σχολή, 2002, Θεσσαλονίκη.
- [55] Μελέτη διερεύνησης δυνατοτήτων για την αξιοποίηση της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ΔΕΗ, Τομέας Βιομάζας, ΚΑΠΕ, 1997.
- [56] Γ. Βουρδούμπας “Χρήση της Βιομάζας για παραγωγή ενέργειας”, ΤΕΙ Ηρακλείου, 1998, Χανιά
- [57] LK. Diamantopoulou, LS Karaoglanoglou, EG. Koukios, “Biomass Cost Index: mapping biomass-to-biohydrogen feedstock costs by a new approach”, Bioresour. Technol. 102 (2011) 2641-50.
- [58] R.P Overend, “The Average Haul Distance and Transportation Work Factors for Biomass Delivered to a Central Plant”, Biomass 2(1982) 75-79.
- [59] Λ. Διαμαντοπούλου, “Ολοκληρωμένη Τεχνική, Οικονομική και Περιβαλλοντική Διερεύνηση του Κύκλου Ζωής για την Παραγωγή και Χρήση Βιο - υδρογόνου στην Ελλάδα”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2012, Αθήνα
- [60] Α. Γαλανοπούλου, “Ανάλυση Κόστους Καλλιέργειας, Συγκομιδής και Μεταφοράς Βιομάζας για χρήση ως βιοκαύσιμο σε Μονάδα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2012.
- [61] N. Ozbay, A.E. Putun, B.B. Uzun, E. Putun, “Biocrude from biomass: pyrolysis of cottonseed cake” Renewable Energy 24 (2001), 615-625
- [62] A. McAloon, F. Taylor, W. Yee, K. Ibsen, R. Wooley, “Determining the cost of producing ethanol from corn, starch and Lignocellulosic feedstock’s”, National Renewable Energy Laboratory, Colorado USA, 2000.

- [63] W.C. Yang, "Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems", Marcel Dekker, Inc., New York-Basel, 2003.
- [64] J. McMillan, "Bioethanol production: Status and prospects", National Renewable Energy Laboratory, Renewable Energy 10 (1997) 295-302.
- [65] E. Shahid, Y. Jamal, "Production of biodiesel: A technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 4732-4745.