

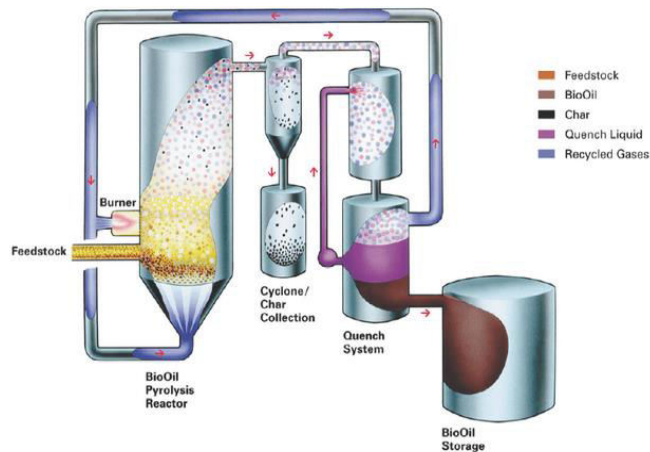


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΠΡΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ:

Καμπούρης Μάριος (ΑΜ: 36651)

Καμπούρης Νομικός (ΑΜ: 39957)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΙΝΙΟΡΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τούς Καθηγητές μου για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, τις υποδείξεις και την γνώση που μου παρείχαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο θέμα γόνιμης δημιουργίας. Επιπλέον το τεχνικό προσωπικό του και γενικότερα της εταιρείας για την παραχώρηση στοιχείων και πληροφοριών σχετικά με το συγκεκριμένο θέμα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθόλη τη διάρκεια των σπουδών καθώς και όλους τους συμφοιτητές μου που γνώρισα στην διάρκεια των προπτυχιακών μου χρόνων.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σύγχρονος πολιτισμένος κόσμος, μεταξύ των προβλημάτων που έχει να αντιμετωπίσει, επωμίζεται να προστατεύσει το περιβάλλον, το οποίο ο ίδιος, κάθε στιγμή, με τις ανεξέλεγκτες δραστηριότητες του ρυπαίνει, προσπαθώντας στη συνέχεια να αφαιρέσει τους επιβλαβείς ρύπους και τις ουσίες εκείνες που επιβαρύνουν τη φύση, για να έχει το δικαίωμα της επιβίωσης εντός αυτής . Τα οικοσυστήματα εδάφους, αέρα, λιμνών, θαλασσών και ποταμών είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και όποιο από αυτά διαταραχτεί, επιδρά και στα άλλα, ανάλογα με το μέγεθος της ρύπανσης και τον κύκλο της αλυσίδας.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η συγκέντρωση του πληθυσμού σε μεγάλα αστικά κέντρα και η παράλληλη εκβιομηχάνιση , είχαν σαν συνέπεια την ανάγκη οργάνωσης της διαδικασίας απόρριψης τους. Έτσι σταδιακά άρχισαν με την παρέμβαση της πολιτείας, στα μέσα της δεκαετίας του 1960, άρχισαν να διατυπώνονται και να εφαρμόζονται κάποιοι κανόνες διαχείρισης των αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ταχεία πυρόλυση βιομάζας αποτελεί μία ελκυστική διεργασία θερμοχημικής μετατροπής της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας σε υγρά, αέρια και στερεά προϊόντα. Η απόδοση σε υγρό προϊόν, γνωστό και ως βιο-έλαιο και η ποιότητά του μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο της βιομάζας, λόγω της διαφορετικής σύστασής της. Στη παρούσα εργασία αρχικά δόθηκε η έννοια της πυρόλυσης με τα προϊόντα αυτής και διάφορα οικονομικά στοιχεία που την αφορούν. Στην συνέχεια μελετήθηκε η πυρόλυση λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας προερχόμενη από ξύλο οξιάς. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύθηκε η χημεία της πυρόλυσης όπου έγινε διαχωρισμός της μη καταλυτικής καθώς και της καταλυτικής πυρόλυσης. Στη συνέχεια και στο τέταρτο κεφάλαιο διεξήχθη πολυκριτηριακή ανάλυση με στόχο την εξεύρεση της βέλτιστης τεχνολογίας θερμικής επεξεργασίας. Οι τεχνολογίες που συγκρίθηκαν ήταν η αποτέφρωση των αστικών στερεών αποβλήτων και απορριμματογενών καυσίμων, η αεριοποίηση και η πυρόλυση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης και της ανάλυσης ευαισθησίας, η αποτέφρωση στερεών αποβλήτων (mass fired) προκρίθηκε στην πρώτη θέση, στις περισσότερες των εξεταζόμενων περιπτώσεων μεταβολής της βαρύτητας των κριτηρίων. Παράλληλα εξετάστηκε με πραγματικά δεδομένα και με βάση τεχνοοικονομικά κριτήρια, η εφαρμογή θερμικής επεξεργασίας στο Νομό Πιερίας. Στην περίπτωση αυτή μελετήθηκε η κατασκευή και λειτουργία μονάδας αναερόβιας ζύμωσης, όπως και μονάδας πυρόλυσης. Τέλος εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

ABSTRACT

The fast pyrolysis of biomass is a process of thermochemical conversion of lignocellulosic biomass to liquid, gas and solid products for the product of bio-fuels and/or chemicals. The yield and quality of the liquid product, known as bio-oil can vary greatly depending on the type of biomass feed stock due to differences in its composition. In this paper we gave the concept of pyrolysis with its products and different financial data. To continue we studied the pyrolysis lignocellulosic biomass originating from beech wood. In the third chapter we further analysed the chemistry of pyrolysis where it separated into non-catalytic pyrolysis. In the fourth chapter we carried out a multi-criteria analysis targeting the best technology in thermal processing. The technologies we compared were the incineration of municipal solid waste, gasification and pyrolysis. According to the results of the comparative evaluation and the sensitivity analysis, the incineration of municipal soiled waste came first place, in most of the selected cases with changing gravity of the criteria. At the same time it was tested with real data and based on techno-financial criteria, the application of thermal treatment in the prefecture of Pieria. In that case we studied the construction and usage of the anaerobic fermentation unit and the pyrolysis unit. Finally we produced a useful conclusion.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Περιβάλλον, ρύπανση, οικοσυστήματα εδάφους, οικοσυστήματα αέρα, οικοσυστήματα λιμνών, οικοσυστήματα θαλασσών, οικοσυστήματα ποταμών, εκβιομηχάνιση, απορρίμματα, διαχείριση αστικών στερεών απορριμμάτων, πυρόλυση, πυρόλυση λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας, καταλυτική πυρόλυση, μη καταλυτική πυρόλυση, τεχνολογία θερμικής επεξεργασίας, αεριοποίηση, αποτέφρωση στερεών αποβλήτων, τεχνολογίες αποτέφρωσης, αξιοποίηση απορριμματογενών καυσίμων, αναερόβια ζύμωση, ανακύκλωση, οργανική ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας, απορρίμματα, υπολείμματα τροφών, χαρτί, αλουμίνιο, γυαλί, σιδηρούχα μέταλλα, πλαστικά, μηχανική ανακύκλωση, ανάκτηση υλικών, αστικά στέρεα απορρίμματα, προστασία περιβάλλοντος.

KEY WORDS

environment, pollution, soil ecosystems, air ecosystems, lake ecosystems, ocean ecosystems, river ecosystems, industrialisation, trash, management of municipal solid waste, cracking, pyrolysis of lignocellulosic biomass, catalytic cracking, non-catalytic cracking, heat processing technology, gasification, incineration of waste, incineration technologies, development of waste generating fuels
anaerobic fermentation, recycling, organic recycling, energy recovery, waste, food waste, paper, aluminium, glass, ferrous metals, plastic, mechanical recycling, recovery of materials, municipal solid waste, environmental protection

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Λέξεις Κλειδιά.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΥΡΟΛΥΣΗ	
1.1. Περιγραφή τεχνολογίας	10
1.2. Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης.....	12
1.3. Μονάδες σε λειτουργία στην ΕΕ.....	12
1.4 Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ	
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά – προϊόντα & απαιτούμενη ενέργεια.....	13
2.2 Τύποι διεργασιών πυρόλυσης.....	16
2.3 Υψηλής προστιθέμενης αξίας χημικά προϊόντα της πυρόλυσης.....	18
2.4 Αντιδραστήρες πυρόλυσης.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ	
3.1 Μη καταλυτική πυρόλυση.....	25
3.2 Καταλυτική Πυρόλυση.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΣΑ	
4.1 Τεχνολογίες Αποτέφρωσης.....	34
4.1.1 Περιγραφή Τεχνολογίας.....	34
4.1.2 Εκπομπές καυσαερίων αποτέφρωσης.....	36
4.1.3 Ενεργειακή απόδοση εγκαταστάσεων αποτέφρωσης ΑΣΑ.....	36
4.1.4 Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας.....	37
4.2 Αξιοποίηση απορριμματογενών καυσίμων.....	37
4.2.1 Περιγραφή Τεχνολογίας.....	38
4.2.2 Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης.....	39
4.2.3 Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας.....	41
4.3 Αεριοποίηση.....	43
4.3.1 Περιγραφή Τεχνολογίας.....	43
4.3.2 Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης.....	44
4.3.3 Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας.....	44
4.4 Αναερόβια ζύμωση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ.....	44
4.4.1 Περιγραφή Τεχνολογίας.....	45
4.4.2 Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης.....	48
4.4.3 Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας.....	48
4.5 Ανάλυση SWOT.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΝΑΛΥΣΗ- ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΓΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	
5.1 Κριτήρια Αξιολόγησης.....	53
5.2 Ανάλυση ευαισθησίας – προσδιορισμός βέλτιστης λύσης.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΖΥΜΩΣΗΣ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΠΙΕΡΙΑΣ	
6.1. Παρούσα κατάσταση παραγωγής αποβλήτων στο Νομό Πιερίας.....	60
6.2 Προμελέτη εφαρμογής μονάδας πυρόλυσης.....	61
6.2.1 Περιγραφή μονάδας.....	61
6.2.2 Οικονομική ανάλυση προτεινόμενης μονάδας.....	64
6.3. Προμελέτη εφαρμογής μονάδας αναερόβιας ζύμωσης.....	67
6.3.1 Περιγραφή μονάδας.....	67
6.3.2. Οικονομική ανάλυση προτεινόμενης μονάδας.....	71

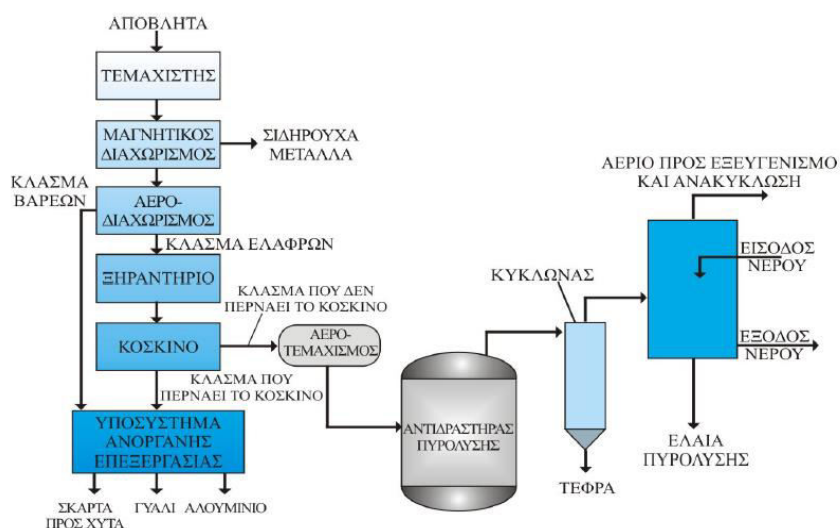
6.4. Συγκριτική αξιολόγηση μελετών εφαρμογής ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων για το Νομό Πιερίας.....	74
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΠΥΡΟΛΥΣΗ

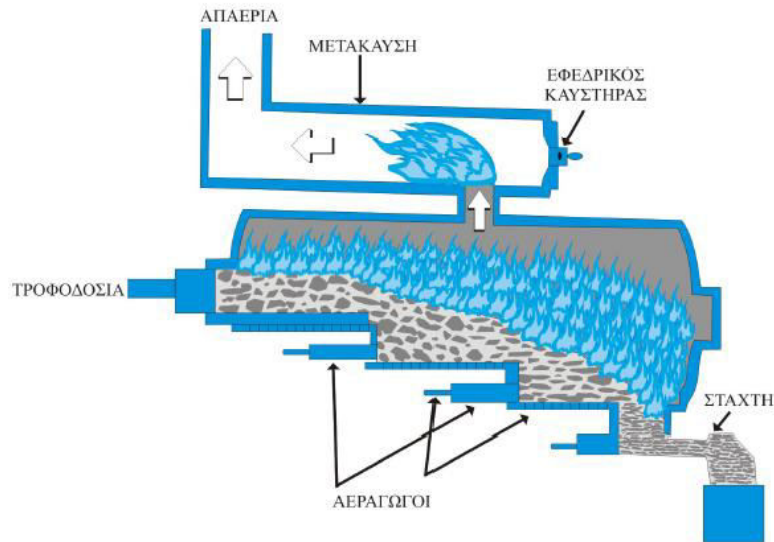
Σαν πυρόλυση ορίζεται η αποδόμηση των οργανικών ουσιών των απορριμμάτων, απουσία (ή παρουσία ελαχίστου) οξυγόνου. Η πυρόλυση αποτελεί μια σχετικά νέα θερμική διεργασία, η οποία αν και αναπτύχθηκε στα τέλη του 19ου αιώνα, άρχισε να εφαρμόζεται στην επεξεργασία ΑΣΑ τα τελευταία 20-30 χρόνια. Στην ουσία δεν αποτελεί μια ιδιαίτερος διαδεδομένη μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ, τουλάχιστον στην Ευρώπη, λόγω της μειωμένης ενεργειακής απόδοσης και οικονομικής βιωσιμότητάς της [1].

1.1 Περιγραφή Τεχνολογίας

Κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, όλα τα απορρίμματα βρίσκονται μέσα σε αγωγούς από ατσάλι ενώ έρχονται σε άμεση επαφή με φλόγα, καθιστώντας έτσι εφικτή την παραγωγή αερίων, χωρίς την άμεση αποτέφρωσή τους. Οι αρχικές αντιδράσεις που παίρνουν μέρος κατά την διάρκεια της όλης διαδικασίας είναι ενδόθερμες, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι για την πραγματοποίησή τους απαιτείται η παροχή ενέργειας, είτε εξωτερικά, είτε εσωτερικά από την ελεγχόμενη αποτέφρωση των προς επεξεργασία απορριμμάτων [1]. Στην πρώτη εικόνα παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας της πυρόλυσης και στη δεύτερη τα υποσυστήματα ενός πυρολυτικού αντιδραστήρα.



Εικόνα 1.1: Διάγραμμα ροής της διεργασίας της πυρόλυσης [2]



Εικόνα 1.2: Υποσυστήματα πυρολυτικού αντιδραστήρα [2]

Η πυρόλυση σε χαμηλές θερμοκρασίες παράγει υγρό καύσιμο. Με την μέθοδο αυτή το απόβλητο τεμαχίζεται σε διάσταση μικρότερη των 50 mm, κατόπιν γίνεται διαχωρισμός με αέρα του οργανικού κλάσματος και ξήρανση σε ξηραντήριο αέρα. Το οργανικό κλάσμα κοσκινίζεται, περνά από σφαιρόμυλο για περαιτέρω μείωση μεγέθους σε κάτω των 3 mm, και τέλος πυρολύεται σε αντιδραστήρα υπό ατμοσφαιρική πίεση. Το στερεό απόβλητο μετατρέπεται σε ιξώδες υγρό στους 500οC.

Μια άλλη παραλλαγή της πυρόλυσης περιλαμβάνει την διάσπαση του οργανικού κλάσματος σε θερμοκρασία 1400-1500° C απουσία O₂, σε αέριο καύσιμο (syngas, 35% CO, 35% H₂, 20% CO₂, 10% N₂ κλπ), που στην συνέχεια οξειδώνεται θερμικά, καθαρίζεται από στερεά και είναι έτοιμο για να χρησιμοποιηθεί σε ατμολέβητα για παραγωγή ατμού και στην συνέχεια ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ατμοστρόβιλου, ή απευθείας σε Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) με ηλεκτρογεννήτρια. Ακολούθως το στερεό υποπροϊόν που παράγεται που αποτελεί ένα είδος τέφρας, είτε χρησιμοποιείται στην κάλυψη ΧΥΤΥ, είτε σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές ανάλογα με την σύνθεση και επεξεργασία του.

1.2 Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης

Τα προϊόντα της πυρόλυσης είναι στερεά, υγρά και αέρια και η σύστασή τους εξαρτάται από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας, όπως τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής των απορριμμάτων στον πυρολυτικό θάλαμο. Κατά την πυρόλυση αστικών στερεών αποβλήτων αναπτύσσονται θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 100 έως 900 °C και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα επηρεάζονται άμεσα από αυτήν. Το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων αερίων κυμαίνεται μεταξύ 12,5 και 46,0 MJ/m³. Για να είναι δυνατή η εφαρμογή της διεργασίας της πυρόλυσης απαιτείται προεπεξεργασία των απορριμμάτων (απομάκρυνση μετάλλων, γυαλιού, κ.ά.), έτσι ώστε στο θάλαμο πυρόλυσης να οδηγείται μόνο το οργανικό τους κλάσμα [3].

1.3 Μονάδες σε λειτουργία στην ΕΕ

Στην ΕΕ συναντάται μια μονάδα πυρόλυσης ΑΣΑ στο Burgau της Γερμανίας, με έτος έναρξης λειτουργίας της το 1984 και θεωρητική δυναμικότητα της μονάδας 3 t/h (CEWER, 2009). Παρόλα αυτά στην Ιαπωνία υπάρχουν εγκαταστάσεις πυρόλυσης στερεών απορριμμάτων, οι οποίες λειτουργούν αποδοτικά για πολλά χρόνια, γεγονός το οποίο πιθανότατα οφείλεται στις διαφορές των χαρακτηριστικών των απορριμμάτων της, σε σχέση με εκείνα των Ευρωπαϊκών χωρών [4].

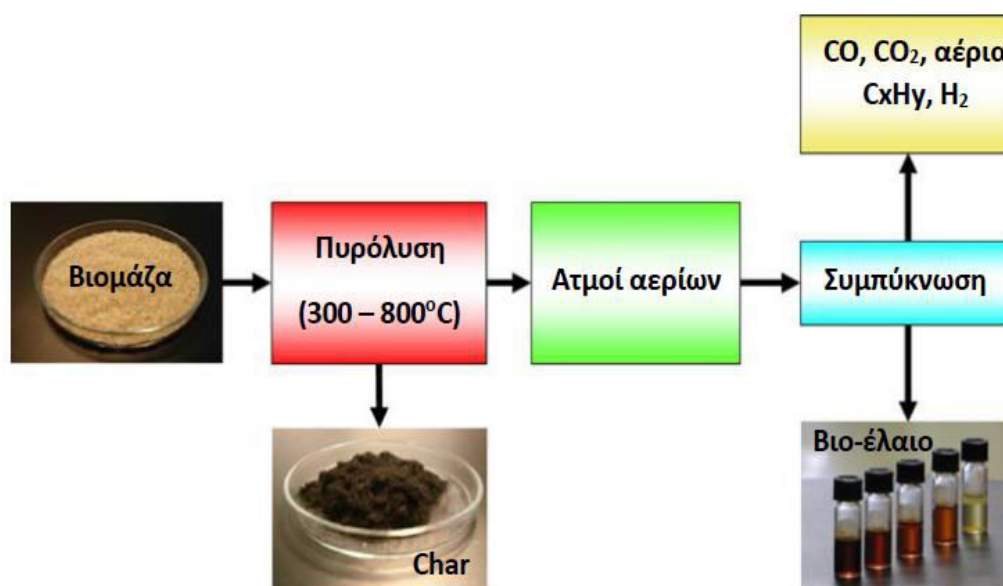
1.4 Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας

Επειδή απουσιάζουν μονάδες πυρόλυσης στην ΕΕ, δεν μπορούμε να βρούμε αξιόπιστα δεδομένα για τη λειτουργία τους. Σαν λύση προτείνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων από δεδομένα πιλοτικών σταθμών πυρόλυσης, τα οποία όμως δεν μπορούν να θεωρηθούν εγγυημένα και ίσως δεν χρήζουν ιδιαίτερης ακρίβειας. Επίσης υπάρχει και έλλειψη στοιχείων ότι η τεχνολογία αυτή είναι οικονομικά βιώσιμη, καθώς δεν είναι εφικτό να συγκριθούν με οικονομικές εκτιμήσεις από διαφορετικές πηγές [5].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

2.1. Γενικά χαρακτηριστικά – προϊόντα & απαιτούμενη ενέργεια

Σαν **πυρόλυση** ορίζουμε την θερμική αποδόμηση (διάσπαση) ενός οργανικού υλικού, από την οποία διαδικασία απουσιάζει οξυγόνο. Τα προϊόντα που παράγονται κατά την πυρόλυση βιομάζας αποτελούνται από τα εξής: ένα στερεό υπόλειμμα που ονομάζεται char, ένα υγρό, το βιο-έλαιο, και μη συμπυκνωμένα αέρια, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1 [6].

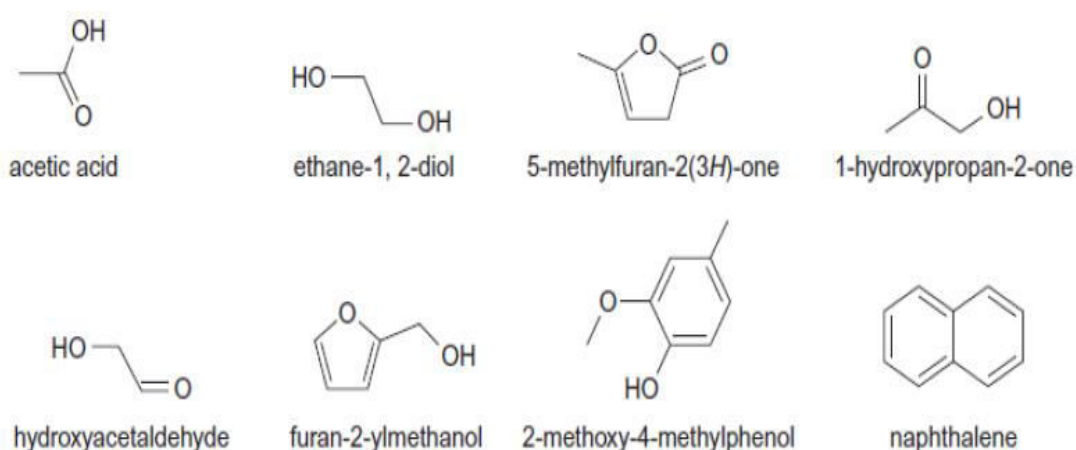


Σχήμα 2.1: Διεργασία της πυρόλυσης και τα προϊόντα που προκύπτουν [6]

Με τη βελτιστοποίηση των συνθηκών της παραπάνω αντίδρασης, μπορούμε να επιτύχουμε μέγιστη παραγωγή βίο-ελαίου. Ένα πλεονέκτημα που προκύπτει από την παραγωγή βίο-ελαίου είναι ότι αυτό έχει την ιδιότητα να αποθηκεύεται και να μεταφέρεται πιο εύκολα από ότι η ίδια η βιομάζα. Επιπλέον, το «char» που σχηματίζεται καθώς και τα αέρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τη θερμότητα η οποία απαιτείται κατά τη διεργασία πυρόλυσης. Επομένως δεν δημιουργούνται απόβλητα και επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας. Μια τέτοια διαδικασία πυρόλυσης που οδηγεί στη μεγιστοποίηση της απόδοσης σε βίο-έλαιο ονομάζεται "flash" ή "ταχεία" πυρόλυση. Παρακάτω αναφέρονται οι βέλτιστες συνθήκες αντίδρασης [6,7]:

- μέτρια θερμοκρασία, η βέλτιστη θερμοκρασία είναι περίπου στους 500° C
- γρήγορη συμπύκνωση των ατμών πυρόλυσης προς υγρό προϊόν (βιο-έλαιο)
- ταχεία θέρμανση των σωματιδίων βιομάζας
- σύντομο χρόνο παραμονής, συνήθως κάτω από 2 s, των ατμών πυρόλυσης
- μια αντιπροσωπευτική κατανομή των προϊόντων ταχείας πυρόλυσης είναι: 75 wt.% βιο-έλαιο, 12 wt.% char, και 13 wt.% αέρια

➤ **Βιο-έλαιο (bio-oil):** Το υγρό προϊόν που προκύπτει από την διεργασία της πυρόλυσης βιομάζας ονομάζεται πυρολυτικό έλαιο ή βιο-έλαιο και αποτελεί ένα αρκετά πολύπλοκο μίγμα διαφόρων οξυγονούχων οργανικών μορίων. Συνήθως περιέχει οξέα, εστέρες, αλκοόλες, κετόνες, αλδεΐδες, φουράνια, σάκχαρα, φαινόλες καθώς και ελάχιστους αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Όλες αυτές οι παραπάνω ενώσεις με εξαίρεση τις φαινολικές, μπορεί να αποδοθούν στους πολυσακχαρίτες, δηλαδή, τη κυτταρίνη και ημικυτταρίνη της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας. Τα φαινολικά προέρχονται από το πολυμερές της λιγνίνης. Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται τα τυπικά συστατικά του βιο-ελαίου τα οποία μπορεί να είναι τόσο κυκλικές, όσο και αλειφατικές ενώσεις μικρής αλυσίδας έχοντας διαφορετικές λειτουργικές ομάδες. Επίσης αξίζει να σημειώσουμε ότι το βιο-έλαιο περιέχει και ένα ποσοστό νερού το οποίο προέρχεται από τις αντιδράσεις αφυδάτωσης και την αρχική υγρασία που περιέχει η λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα [6,7,8,9].



Εικόνα 2.1: Συστατικά του βιοελαίου [8,9]

Η χημική σύσταση του βιο-ελαίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χημική σύσταση της βιομάζας που χρησιμοποιείται ως τροφοδοσία στην πυρόλυση, καθώς επίσης και από τις συνθήκες της αντίδρασης όπως για παράδειγμα τη θερμοκρασία, το χρόνο παραμονής κ.ά.

- **Αέρια (permanent gases):** Αποτελούν τα προϊόντα εκείνα που περνούν μέσω του συστήματος ψύξης-συμπύκνωσης. Στην πραγματικότητα είναι αέρια που δεν συμπυκνώνονται μετά το πέρας της διεργασίας. Αυτά τα οποία έχουν και την μεγαλύτερη συγκέντρωση είναι τα CO₂, CO, CH₄, H₂ και άλλοι υδρογονάνθρακες. Σε μεγαλύτερο wt.% παράγονται το CO & CO₂ [6].
- **Εξανθράκωμα (char ή bio-char):** Το εξανθράκωμα είναι το πλούσιο σε άνθρακα στερεό υπόλειμμα (solid residue) της διεργασίας. Η στοιχειακή σύσταση του “char” όπως φαίνεται και στον παρακάτω Πίνακα 2.1 διαφέρει από εκείνη της βιομάζας, διότι το περιεχόμενο σε άνθρακα είναι υψηλότερο, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι μικρότερη, και το υδρογόνο περιεχόμενο ελαφρώς χαμηλότερο [10].
- **Κωκ καταλύτη (catalyst coke):** Το κωκ συνήθως σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια του καταλύτη κατά τη διάρκεια της καταλυτικής πυρόλυσης. Προέρχεται από την καταλυτική πυρόλυση της βιομάζας και αποτελείται κυρίως από μεγαλομόρια αρωματικών ή άλλων σχετικών οξυγονούχων ενώσεων. Τόσο η εξανθράκωση της βιομάζας, όσο και ο σχηματισμός του κωκ οδηγούν στην απενεργοποίηση του καταλύτη, ωστόσο και τα δύο (char και κωκ) μπορούν να απομακρυνθούν από την επιφάνεια του καταλύτη με την καύση [11].

Υλικό	C wt. %	H wt. %	O wt. % *	N wt. %
Ξύλο οξιάς	45.21	6.27	48.02	0.50
Κυτταρίνη	42.17	6.14	51.28	0.41
Λιγνίνη	60.70	5.73	33.99	0.42
Ημι-κυτταρίνη	39.26	6.21	45.02	0.45
Βιο-έλαιο[20]	71.20	3.90	24.50	0.40

Πίνακας 2.1: Στοιχειακή ανάλυση της βιομάζας και διαφόρων συστατικών της

- **Ενέργεια πυρόλυσης:** Με τον όρο αυτό εννοούμε το ποσό ενέργειας που χρειάζεται προκειμένου να ολοκληρωθεί η διεργασία ανά μονάδα μάζας της βιομάζας. Η απαιτούμενη ενέργεια για τη διεργασία αυτή που στην ουσία καθορίζει το ενεργειακό της ισοζύγιο διαχωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο έχουμε την θέρμανση της βιομάζας στην απαιτούμενη θερμοκρασία και στο δεύτερο έχουμε την ολοκλήρωση των χημικών αντιδράσεων που περιλαμβάνει. Πρέπει να τονίσουμε ότι η θέρμανση της βιομάζας και οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα δεν αποτελούν δύο διαδοχικές διεργασίες, καθώς η έναρξη των αντιδράσεων πραγματοποιείται πριν η στερεή βιομάζα αποκτήσει την επιλεγόμενη θερμοκρασία πυρόλυσης.

Για την επιλογή, σχεδιασμό και βελτιστοποίηση του αντιδραστήρα πυρόλυσης, η ενέργεια πυρόλυσης είναι απαραίτητη, όπως επίσης και για τον καθορισμό των άλλων παραμέτρων της διεργασίας. Κάθε φορά είναι αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε ανάλυση ενεργειακού ισοζυγίου, ειδικά όταν μελετώνται οι δυνατότητες αξιοποίησης και βελτιστοποίησης της βιομάζας προς παραγωγή ενέργειας. Μέχρι σήμερα όμως δεν υπάρχει μια αποδεκτή μεθοδολογία υπολογισμού της, ενώ είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπολογιστεί με πειραματικές μεθόδους, λόγω της πολυπλοκότητας της ίδιας της διεργασίας της πυρόλυσης, αλλά κυρίως της μεγάλης ανομοιογένειας που παρουσιάζουν τα είδη βιομάζας μεταξύ τους [12].

2.2. Τύποι διεργασιών πυρόλυσης

Η διεργασία πυρόλυσης μπορεί να είναι είτε συμβατική ή ταχεία (στιγμιαία) πυρόλυση, αναλόγως και τις συνθήκες λειτουργίας που χρησιμοποιούνται. Η συμβατική πυρόλυση μπορεί επίσης να ονομαστεί βραδεία (αργή) πυρόλυση [13,14].

- **Συμβατική πυρόλυση (conventional pyrolysis):** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται εδώ και πάρα πολλά χρόνια και χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ξυλάνθρακα. Στην αργή πυρόλυση ξύλου, η βιομάζα θερμαίνεται έως 500°C. Ο ατμός παραμένει από 5 λεπτά έως 30 λεπτά. Οι ατμοί δεν διαφεύγουν τόσο γρήγορα όπως στη ταχεία πυρόλυση. Με τον τρόπο αυτό τα συστατικά που βρίσκονται σε φάση ατμών συνεχίζουν να αντιδρούν και αυτό έχει σαν συνέπεια να πραγματοποιούνται δευτερογενείς

χημικές αντιδράσεις οι οποίες δεν είναι επιθυμητές. Στην συμβατική πυρόλυση, η ταχύτητα θέρμανσης είναι συνήθως πιο αργή από αυτή που λαμβάνει μέρος στην ταχεία πυρόλυση. Η πρώτη ύλη μπορεί είτε να διατηρηθεί σε σταθερή θερμοκρασία ή διαφορετικά να θερμαίνεται αργά. Επίσης μια διαφορετική παραλλαγή είναι η εφαρμογή πυρόλυσης κενού σε αργούς ή γρήγορους ρυθμούς θέρμανσης [7].

- **Ταχεία πυρόλυση (fast pyrolysis):** Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια διεργασία που πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες, όμοιες με αυτής της αργής πυρόλυσης, όπου η βιομάζα θερμαίνεται ταχύτατα απουσία οξυγόνου και έχει σαν αποτέλεσμα να παράγονται κυρίως ατμοί, αέρια και άνθρακας. Η παραγωγή υγρού προϋποθέτει πολύ μικρό χρόνο παραμονής στον αντιδραστήρα (κάπου 1 sec.) έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι δευτερογενείς αντιδράσεις παρόλο που τα επιθυμητά προϊόντα μπορούν να ληφθούν σε χρόνους παραμονής μέχρι και 5 sec, αν η θερμοκρασία αντίδρασης διατηρείται κάτω απ' τους 400°C. Όταν επέλθει η ψύξη και η συμπύκνωση, τότε σχηματίζεται ένα σκούρο καφέ ρευστό υγρό το οποίο έχει τη μισή θερμαντική αξία/ικανότητα του συμβατικού ελαίου (πετρελαϊκού) καυσίμου. Η ταχεία πυρόλυση αποτελεί μια αναβαθμισμένη διεργασία η οποία κάτω από ενδεδειγμένο έλεγχο μπορεί να δώσει υψηλότερες αποδόσεις υγρών προϊόντων. Μέσα από έρευνες έχουν εξαχθεί συμπεράσματα που οδηγούν στο γεγονός ότι οι μέγιστες αποδόσεις υγρών προϊόντων επιτυγχάνονται με υψηλές ταχύτητες θέρμανσης, σε θερμοκρασία αντίδρασης κοντά στους 500°C και με μικρό χρόνο παραμονής για να ελαχιστοποιηθούν οι δευτερογενείς αντιδράσεις [7].

Ορισμένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της πυρόλυσης είναι τα παρακάτω:

- υψηλές ταχύτητες μεταφοράς θερμότητας που συνήθως απαιτούν τροφοδοσία βιομάζας που έχει κονιοποιηθεί
- ελεγχόμενη θερμοκρασία αντίδρασης πυρόλυσης γύρω στους 500°C στην αέρια φάση με μικρό χρόνο παραμονής λιγότερο των 2 sec
- γρήγορη ψύξη των ατμών πυρόλυσης που δίνουν το προϊόν του βιο-ελαίου

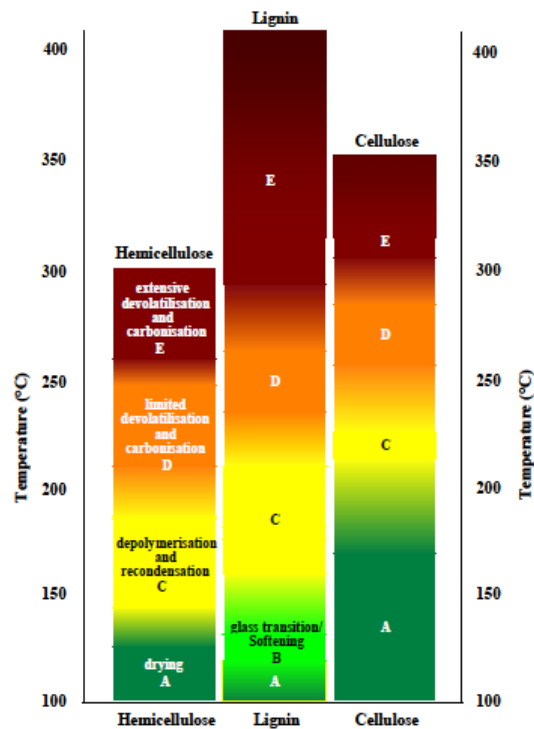
Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι κύριες τεχνολογίες πυρόλυσης και τα κύρια προϊόντα τους. Παρατηρείται ότι αρκετές θερμοκρασίες και ρυθμοί θέρμανσης χρησιμοποιούνται, ανάλογα με το επιθυμητό προϊόν. Ο τύπος της διεργασίας πυρόλυσης βιομάζας χαρακτηρίζεται ουσιαστικά από δύο παραμέτρους: τη θερμοκρασία και το ρυθμό θέρμανσης. Δυστυχώς αυτές οι παράμετροι δεν μπορούν να οριστούν ακριβώς σε αντιδραστήρες και σε εργαστηριακές συσκευές.

Mode	Conditions	Liquid	Solid	Gas
Fast	Reactor temperature 500°C, very high heating rates > 1000°C/sec, short hot vapour residence ~1 s	75%	12% char	13%
Intermediate	Reactor temperature 400-500°C, heating rate range 1 – 1000°C/sec, hot vapour residence ~10-30 s	50%	25% char	25%
Slow – Torrefaction	Reactor temperature ~290°C, heating rate up to 1°C/sec, solids residence time ~30 min	0-5%	77% solid	23%
Slow – Carbonisation	Reactor temperature 400-500°C, heating rate up to 1°C/sec, long solid residence hrs – days	30%	33% char	35%

Πίνακας 2.2: Τύποι πυρόλυσης και τα προϊόντα που παράγονται

2.3. Υψηλής προστιθέμενης αξίας χημικά προϊόντα της πυρόλυσης

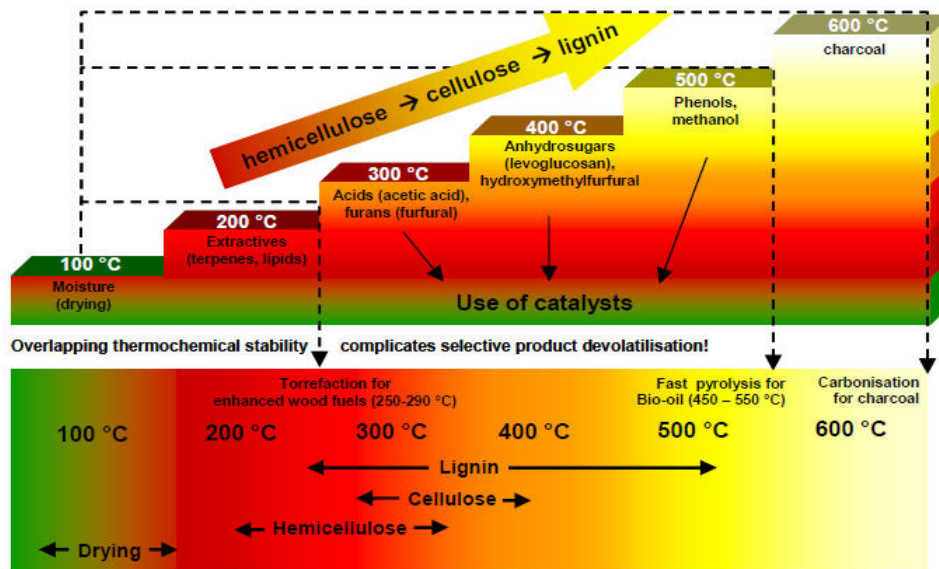
Οι διαφορετικές θερμικές σταθερότητες της ημικυτταρίνης, κυτταρίνης και λιγνίνης προσδίδουν την ευκαιρία μέσω της πυρόλυσης στη θερμική κλασμάτωση της βιομάζας σε προϊόντα που μπορούν να υποκαταστήσουν τα πετροχημικά προϊόντα. Το Σχήμα 2.3 παρουσιάζει μια σχηματική επισκόπηση των διαφορετικών θερμικών χαρακτηριστικών ως προς τη σταθερότητα του καθενός από τα κύρια συστατικά της βιομάζας [15].



Σχήμα 2.3: Θερμική σταθερότητα ημικυτταρίνης, λιγνίνης και κυτταρίνης [16]

Το ποσοστό της θερμικής διάσπασης του προϊόντος καθορίζεται από τη θερμοχημική σταθερότητα των επιμέρους συστατικών της βιομάζας που είναι σχετικά χαμηλότερη για την ημικυτταρίνη (γρήγορη εξαέρωση / αποσύνθεση 200-300°C), και υψηλότερη για την κυτταρίνη (αργή εξαέρωση / αποσύνθεση 300-400°C). Η λιγνίνη παρουσιάζει ενδιάμεση θερμική συμπεριφορά αποικοδόμησης (σταδιακή εξαέρωση / αποσύνθεση 250-500°C).

Η σταδιακή πυρόλυση για την εξαγωγή πολύτιμων χημικών ουσιών από τα τρία διαφορετικά συστατικά της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 2.3.1 και στον Πίνακα 2.3. Εκεί παρουσιάζεται μια πιο λεπτομερής ανασκόπηση ορισμένων σημαντικών χημικών προστιθέμενης αξίας που μπορεί να ληφθούν από κάθε ένα από τα κύρια κλάσματα της βιομάζας μέσω της πυρόλυσης.

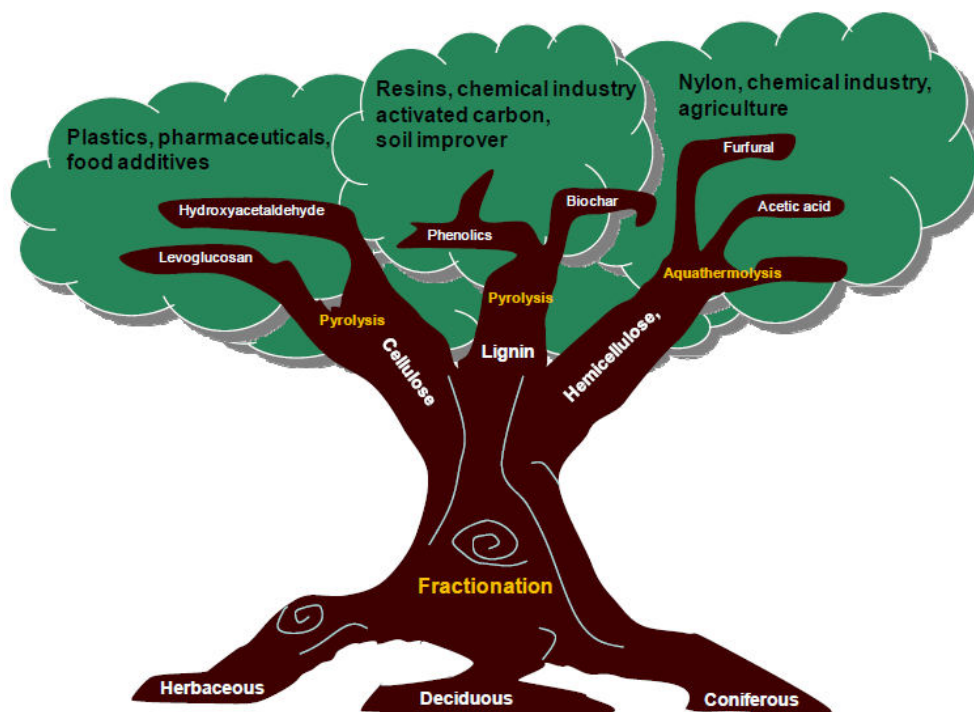


Σχήμα 2.3.1: Σταδιακή εξαέρωση κατά τη θερμική κλασμάτωση της βιομάζας [16]

Συστατικό Βιομάζας	Προϊόντα Πυρόλυσης	Παραδείγματα εφαρμογών στην αγορά
Ημικυτταρίνη	<ul style="list-style-type: none"> • Οξικό οξύ • Φουρφουράλη • Φουράνια, φουρανόνες, μεθανόλη, φορμαλδεΰδη, ακετόνη, λακτόνες. 	Ξύδι, ρητίνες, κόλλες, αρωματικός παράγοντας (τρόφιμα), εστέρες κ.ά.
Κυτταρίνη	<ul style="list-style-type: none"> • Λεβογλουκοζίνη • Υδροξυ-ακεταλδεΰδη • Φουρφουράλη, φουράνια, φορμαλδεΰδη, φορμικό οξύ, λακτόνες 	Γλυκόζη, πολυμερή, αντιβιοτικά τροφίμων
Λιγνίνη	<ul style="list-style-type: none"> • 2-μεθοξυφαινόλες (π.χ. guaiacol), • 2,6-διμεθοξυφαινόλες (π.χ. syringol), • φαινόλες, • μεθανόλη • φουρφουράλη, οξικό οξύ, φορμικό οξύ, λακτόνες 	Πρόσθετες χημικές ουσίες, φαρμακευτικά προϊόντα, πλαστικά, πρόσθετα καυσίμων, αντιψυκτικά, κ.ά.
Βιομάζα	<ul style="list-style-type: none"> • Εκχυλίσματα (π.χ. τερπένια) • Ξυλάνθρακας (κάρβουνο) • Έλαιο πυρόλυσης • Αέρια (CO, CO_2, CH_4, H_2) <p>(εκτός των προϊόντων που περιγράφονται παραπάνω για κάθε επιμέρους συστατικό της βιομάζας)</p>	πρόσθετες χημικές ουσίες, φαρμακευτικά προϊόντα, βελτιωτικό εδάφους, ενεργό άνθρακα, μεταλλουργία, υγρά καύσιμα, πρώτες ύλες για χημικά προϊόντα όπως οργανικά οξέα και φαινολικές ενώσεις

Πίνακας 2.3: Κύριες χημικές ουσίες από τη πυρόλυση της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας

Η πολυπλοκότητα των λιγνοκυτταρινούχων υλικών απαιτεί μία προσέγγιση για το βιο-δυλιστήριο, η οποία είναι προσαρμοσμένη προς τη πρώτη ύλη και είναι δύσκολο να ταιριάζει με τις τρέχουσες τεχνολογίες των πετροχημικών. Στο παρακάτω Σχήμα 2.3.2 απεικονίζεται η κλασμάτωση της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας και παραδείγματα της επακόλουθης θερμοχημικής επεξεργασίας της κυτταρίνης, της λιγνίνης και ημικυτταρίνης προς χρήσιμες χημικές ουσίες.



Σχήμα 2.3.2: Δέντρο απεικόνισης της βιομάζας, των κλασμάτων της και των σχετικών προϊόντων που μπορούν να παραχθούν.

Κατά τις διεργασίες πυρόλυσης και αεριοποίησης παράγεται επίσης πίσσα (tar) μέσα στους αντιδραστήρες. Τα χημικά συστατικά της πίσσας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα. Η σύσταση ενδέχεται να αλλάξει σημαντικά στην περίπτωση που υπάρχει αύξηση της θερμοκρασίας με την ακόλουθη σειρά: μικτές οξυγονούχες ενώσεις, φαινολικούς αιθέρες, αλκυλο-φαινολικές ενώσεις, ετεροκυκλικούς αιθέρες, πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες, και μεγαλύτερους πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες [8].

Μίξη οξυγονούχων ενώσεων 400°C → φαινολικοί αιθέρες 500°C → άλκυλο φαινολικές ενώσεις 600°C → ετεροκυκλικοί αιθέρες 700°C → PAH 800°C → μεγαλύτερα PAH 900°C

Συμβατική ταχεία Πυρόλυση	Υψηλής θερμοκρασίας ταχεία πυρόλυση	Συμβατική αεριοποίηση με ατμό	Υψηλής θερμοκρασίας αεριοποίηση με ατμό
450 – 550 °C	600 – 650 °C	700 – 800 °C	900 – 1000 °C
Οξέα Αλδεΐδες Κετόνες Φουράνια Αλκοόλες Οξυγονούχες Φαινόλες Guiacols syringols	Βενζένια Φαινόλες Κατεχόλες Ναφθαλένια Βιφαινύλια Βενζοφουράνια Βενζαλδεΐδες	Ναφθαλένια Φλουορένια Βενζαλδεΐδες Φαινόλες Ναφθοφουράνια	Ναφθαλένια Φλουρανθένια Πυρένια Βενζανθρακένια Βενζοπυρένια PAHs

Πίνακας 2.3.1: Χημική σύσταση της πίσσας (tar) της βιομάζας [2]

2.4. Αντιδραστήρες πυρόλυσης

Στην περίπτωση που επιθυμούμε να επιτύχουμε βέλτιστες συνθήκες πυρόλυσης όπως περιγράφηκε παραπάνω, απαιτούνται ειδικοί τύποι αντιδραστήρων. Ο πιο σύνηθες και διαδεδομένος τύπος αντιδραστήρα είναι ένας αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης. Για να επιτευχθεί μέτρια θερμοκρασία που είναι απαραίτητη για την πυρόλυση αυτό μπορεί αν γίνει εύκολα με θέρμανση του τοιχώματος του αντιδραστήρα, ή την τοποθέτηση θερμαινόμενων σωλήνων στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, ή θέρμανση του υλικού κλίνης η οποία είναι συνήθως πυριτική άμμος. Για να επιτύχουμε ταχεία θέρμανση της βιομάζας γίνεται τροφοδότηση στον αντιδραστήρα και λόγω της ρευστοποίησης, αναμιγνύεται με το θερμό υλικό κλίνης, το οποίο μπορεί να θερμαίνεται με την καύση του σχηματισθέντος «char» σε ένα ξεχωριστό αντιδραστήρα καύσης. Στην περίπτωση όμως αυτή το μέγεθος των σωματιδίων της βιομάζας θα πρέπει να είναι μικρό, συνήθως μικρότερο από 3 mm. Για να καταφέρουμε να ελέγξουμε τον χρόνο παραμονής των ατμών πυρόλυσης, τότε πρέπει να ελέγξουμε τη ροή του αερίου ρευστοποίησης (συνήθως χρησιμοποιείται αδρανές αέριο He, ή N₂). Επιπλέον, η τέφρα που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης μπορεί να αφαιρεθεί σε ένα αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης με κυκλώνες ή /και φίλτρα. [8].

➤ **Αντιδραστήρας αναβράζουσας – ρευστοστερεάς κλίνης (Bubbling-fluidized bed reactor)**

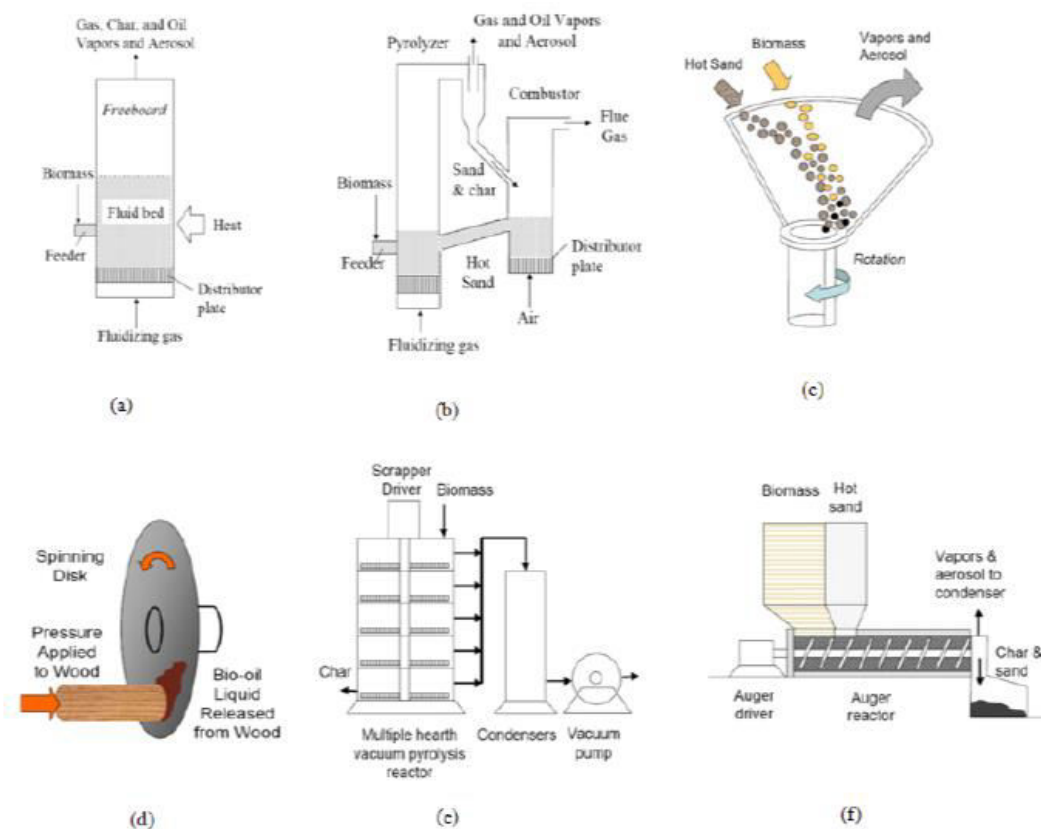
Αποτελεί ένα από τους πιο δημοφιλείς αντιδραστήρες για την διεργασία πυρόλυσης και είναι σχετικά εύκολος ως προς τη σχεδιάσή του. Μπορεί να ελέγξει αποτελεσματικά τη θερμοκρασία, έχει αποτελεσματικό ρυθμό μεταφοράς θερμότητας, και μικρό χρόνο παραμονής [17]. Ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας είναι απλός στην κατασκευή και λειτουργία του και μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί για μεγάλης κλίμακας πυρόλυση. Είναι άξιο αναφοράς ότι οι αποδόσεις του μπορούν να φτάσουν έως και 80 wt.% βιοέλαιο της ξηρής βιομάζας. Επιπλέον μπορεί να επιτευχθεί άμεσα και αποτελεσματικά ο διαχωρισμός του «char» κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης, κάτι που καθιστά τον καταλύτη περισσότερο αποτελεσματικό. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω προκύπτει υψηλής ποιότητας βιο-έλαιο από αυτή τη διάταξη [8].

➤ **Αντιδραστήρας – ανακυκλοφορίας ρευστοστερεάς κλίνης (Circulating-Fluidized Bed)**

Ο συγκεκριμένος τύπος αντιδραστήρα έχει πολλά χαρακτηριστικά παρόμοια με έναν αντιδραστήρα αναβράζουσας-ρευστοστερεάς κλίνης. Το αδρανές υλικό που υπάρχει στο εσωτερικό της κλίνης διαχωρίζεται από τους ατμούς των προϊόντων με τη χρήση αεροκυκλώνων και μαζί με την σχηματιζόμενη τέφρα εισέρχεται στον αναγεννητή, όπου καίγεται η τέφρα ενώ το «θερμό» αδρανές επιστρέφει στον αντιδραστήρα πυρόλυσης όπου στην συνέχεια εξελίσσεται ένας νέος κύκλος πυρόλυσης. Στην περίπτωση όπου ένας καταλύτης χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη κλίνη ρευστοποίησης, το κωκ και η τέφρα τα οποία σχηματίζονται κατά τη διάρκεια πυρόλυσης, υπάρχει το ενδεχόμενο να καούν κατά τη διάρκεια της αναγέννησης. Επιπλέον, το αέριο προϊόν μπορεί να κυκλοφορεί πίσω στην κλίνη σαν φέρων αέριο. Για τον λόγο αυτό, η παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου στα αέρια προϊόντα μπορεί να μειώσουν την περιεκτικότητα των προϊόντων σε οξυγόνο. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε όμως ότι ο αντιδραστήρας-ανακυκλοφορίας ρευστοστερεάς κλίνης δεν είναι τόσο αποτελεσματικός όσο ο αντιδραστήρας -

αναβράζουσας ρευστοστερεάς κλίνης σε θέματα που έχουν να κάνουν τόσο με τον έλεγχο της θερμοκρασίας όσο και με τη μεταφορά θερμότητας [18].

- Εκτός από τις παραπάνω διατάξεις για την πυρόλυση της βιομάζας, συναντάμε και άλλες οι οποίες παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα. Αυτές είναι: ο περιστρεφόμενος κώνος (rotating cone), «ablative pyrolysis», πυρόλυση κενού (vacuum pyrolysis) και «Auger reactor» [26,30].

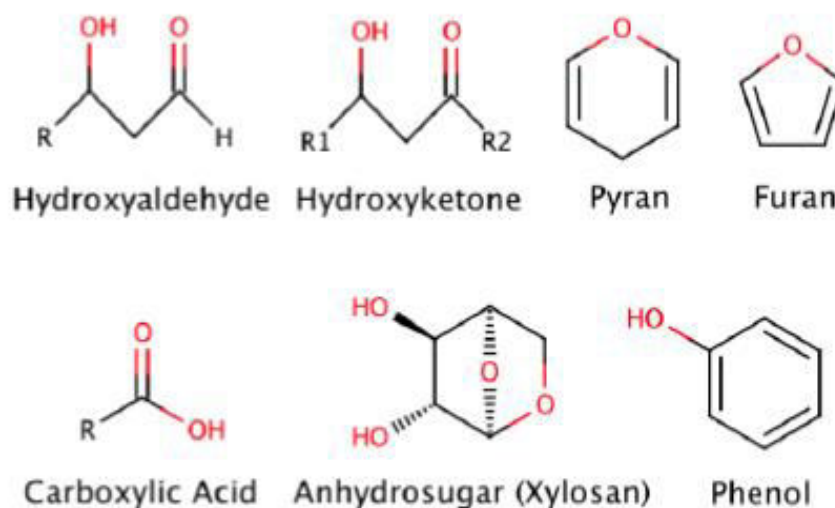


Εικόνα 2.4: Αντιδραστήρες πυρόλυσης βιομάζας (a) Αντιδραστήρας αναβράζουσας – ρευστοστερεάς κλίνης (bubbling fluidized bed), (b) Αντιδραστήρας – ανακυκλοφορίας ρευστοστερεάς κλίνης (Circulating fluidized bed), (c) Περιστρεφόμενου κώνου (Rotating cone), (d) Ablative pyrolysis, (e) Πυρόλυσης κενού (Vacuum pyrolysis), (f) Auger reactor (πηγή: www.ghp-books.com/)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΧΗΜΕΙΑ ΤΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

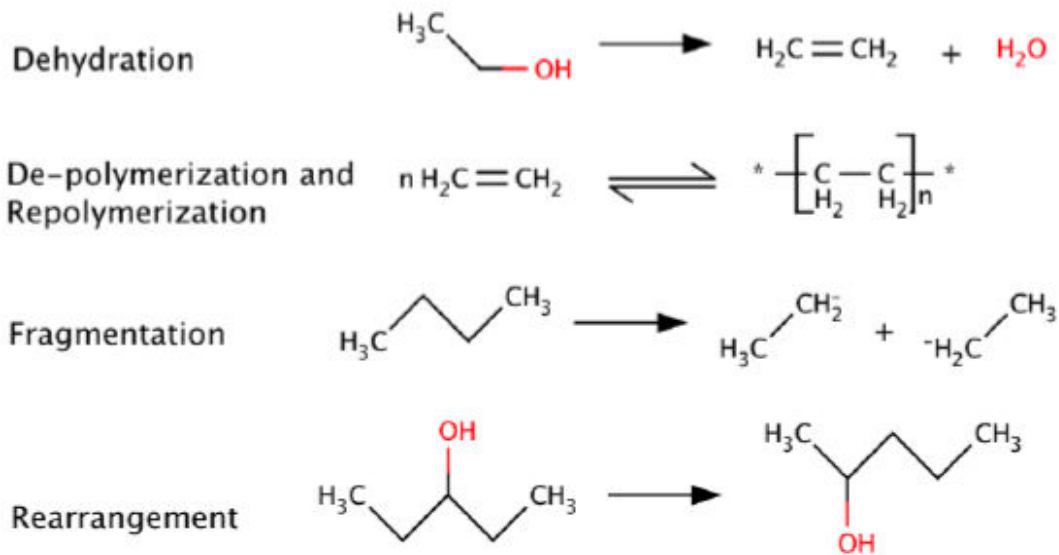
3.1 Μη καταλυτική πυρόλυση

Το βιο-έλαιο ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες της διεργασίας πυρόλυσης και των πρώτων υλών. Οι περισσότερες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην ταχεία πυρόλυση που οδηγεί στη παραγωγή βιοελαίου που περιέχει υδροξυκετόνες,, υδροξυαλδεύδες, καρβοξυλικά οξέα, άνυδρο-σάκχαρα, δακτύλιους φουρανίου, φαινολικές ενώσεις και ολιγομερή λιγνοκυτταρινούχων πολυμερών όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα. Τα προϊόντα αυτά προέρχονται από την αρχική σύσταση της βιομάζας που αποτελείται από κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη, εκχυλίσματα, λιπίδια, πρωτεΐνες, απλά σάκχαρα, υδρογονάνθρακες, τέφρα, άμυλα, νερό, και άλλες ενώσεις [19].



Σχήμα 3.1: Αντιπροσωπευτικές ενώσεις του βιο-ελαίου [19]

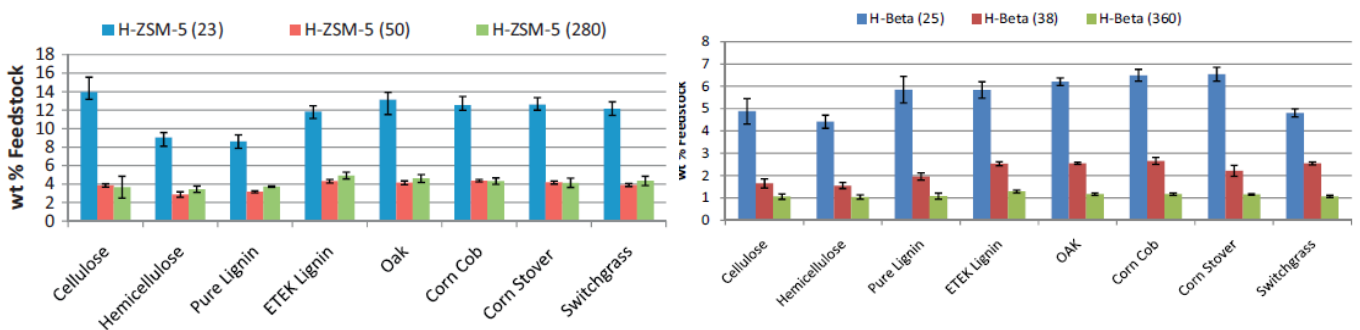
Κατά τη διεργασία της πυρόλυσης, οι αντιδράσεις και οι μηχανισμοί που πραγματοποιούνται είναι αρκετά πολύπλοκες και πολύ δυσνόητες, λόγω του εύρους των θερμοκρασιών και της σύνθεσης της βιομάζας. Γενικά όμως, μπορούν να θεωρηθούν ως ταυτόχρονος συνδυασμός της αφυδάτωσης, αποικοδόμησης, διάσπασης, αποπολυμερισμού, αναδιάταξης και συμπύκνωσης όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα . Οι αντιδράσεις αυτές οδηγούν σε ένα βιο-έλαιο που περιέχει πάνω από 300 ενώσεις [20].



Σχήμα 3.2: Μηχανισμοί αντιδράσεων μη καταλυτικής πυρόλυσης

3.2 Καταλυτική πυρόλυση

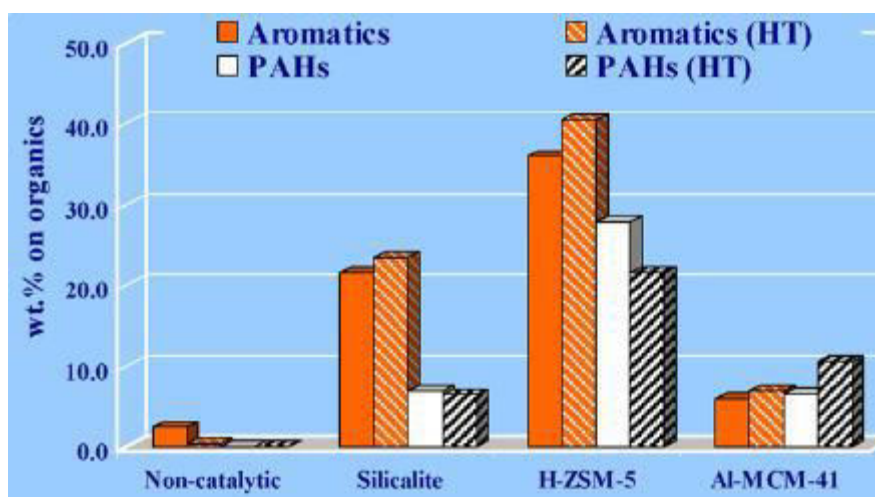
Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές επιστημονικές μελέτες με τη χρήση ζεολιθικών κυρίως καταλυτών στην καταλυτική αναβάθμιση των προϊόντων πυρόλυσης της λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας. Για παράδειγμα, οι Boateng et. al. [21] μελέτησαν την καταλυτική πυρόλυση λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας και των συστατικών της (κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη, μίγμα λιγνίνης/κυτταρίνης, δρυς), χρησιμοποιώντας κυρίως όξινους μικροπορώδεις ζεόλιθους, με τη χρήση του οργάνου/μεθοδολογίας πυρολύτη συνδεδεμένου σε σειρά με GC/MS (Py-GC/MS).



Εικόνα 3.1: Παραγωγή αρωματικών υδρογονανθράκων στην καταλυτική πυρόλυση διαφόρων τροφοδοσιών βιομάζας με τη χρήση όξινων ζεόλιθων ZSM-5 και Beta με διαφορετικό λόγο Si/Al [21]

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται ότι οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες παράγονται σε μεγαλύτερο ποσοστό με τη χρήση H-ZSM-5 με λόγο Si/Al=23 από όλα τα μελετώμενα συστατικά της βιομάζας, λόγω των ισχυρών όξινων θέσεων κατά Brønsted που διαθέτει ο συγκεκριμένος ζεόλιθος. Για το ζεόλιθο τύπου Beta παρατηρήθηκε ότι όσο χαμηλότερος είναι ο λόγος Si/Al τόσο πιο αποτελεσματικός είναι για τη παραγωγή αρωματικών ενώσεων.

Σύμφωνα με μια έρευνα [22] μελετήθηκε η καταλυτική αναβάθμιση των ατμών πυρόλυσης βιομάζας (ξύλο οξιάς) και ειδικότερα την επίδραση της υδροθερμικής προκατεργασίας της βιομάζας στην καταλυτική δραστηριότητα και εκλεκτικότητα των προϊόντων με τη χρήση αντιδραστήρα σταθερής κλίνης. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως καταλυτικά υλικά όπως ο ισχυρά όξινος ζεόλιθος τύπου ZSM-5, ο σιλικαλίτης με πολύ μικρό αριθμό όξινων θέσεων και το ελαφρώς όξινο μεσοπορώδες αργιλοπυριτικό υλικό τύπου Al-MCM-41.

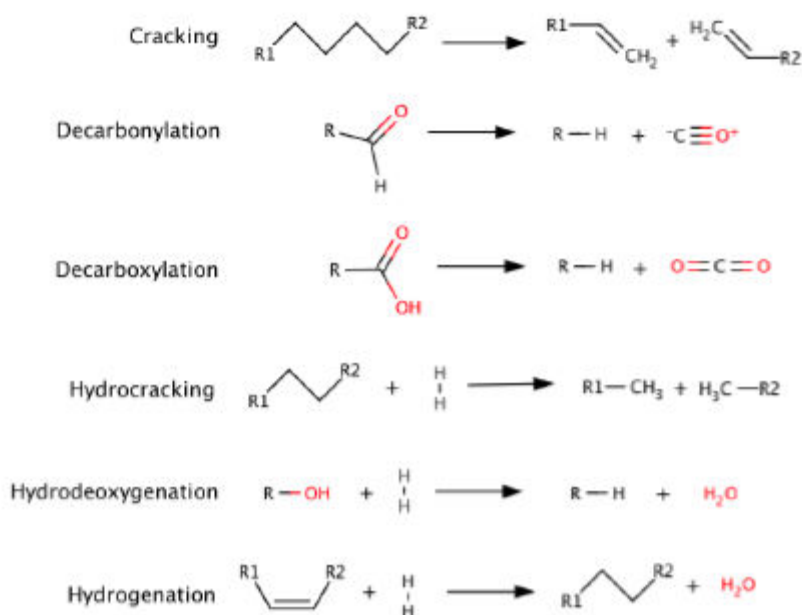


Εικόνα 3.2: Συγκέντρωση αρωματικών (aromatics) και πολυκλικών αρωματικών (PAHs) υδρογονανθράκων στο παραγόμενο βιο-έλαιο κατά την πυρόλυση βιομάζας με τη χρήση ζεόλιθων ZSM-5, silicalite, Al-MCM-41 [22].

Όπως προκύπτει μέσα από τα αποτελέσματα της Εικόνας 3.2, ο αποτελεσματικότερος καταλύτης για την παραγωγή αρωματικών προϊόντων υψηλής εμπορικής αξίας και στις δύο περιπτώσεις (εμπορική βιομάζα & υδροθερμικά προεπεξεργασμένη) είναι ο ισχυρά όξινος ζεόλιθος H-ZSM-5, λόγω των ισχυρών όξινων Brønsted θέσεων που διαθέτει. Οι σιλικαλίτης και Al-MCM-41 φαίνεται ότι παρουσιάζουν αρκετά

μικρότερη παραγωγή αρωματικών ενώσεων και αυτό οφείλεται στην ασθενή ισχύ των όξινων θέσεων που διαθέτουν.

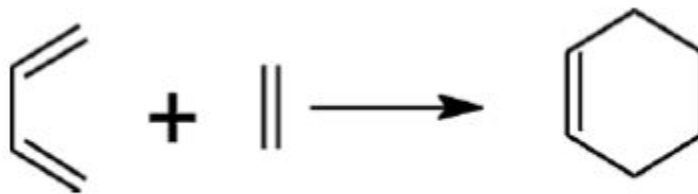
Η προσθήκη των καταλυτών στο σύστημα πυρόλυσης ενισχύει τις αντιδράσεις που περιλαμβάνουν διάσπαση, αποκαρβονυλίωση, αποκαρβοξυλίωση, υδρογονοαποξυγόνωση και υδρογόνωση, όπως συνοψίζεται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 3.3: Μηχανισμοί αντιδράσεων καταλυτικής πυρόλυσης

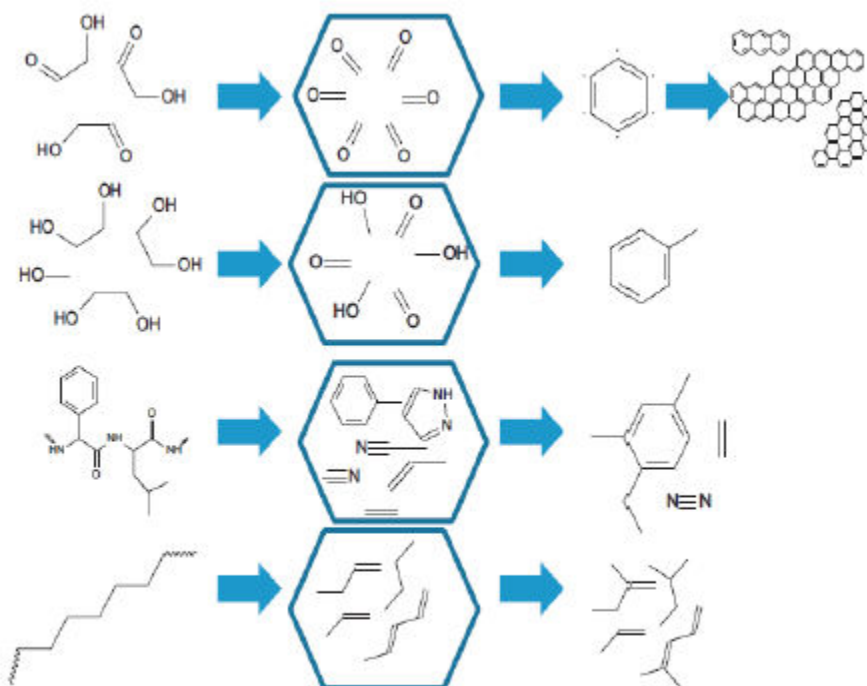
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, μέσα από την καταλυτική αναβάθμιση μπορεί να ενισχυθούν οι ιδιότητες του βιο-ελαίου με απομάκρυνση οξυγονούχων ενώσεων μέσω H_2O και του CO_2 , μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το μοριακό βάρος, και οδηγώντας στο σχηματισμό υδρογονανθρακικών ενώσεων.

Ένας ακόμα σημαντικός μηχανισμός που συμβαίνει κατά την πυρόλυση, σύμφωνα με τους Huber και Coma [23], είναι αυτός της αρωματοποίησης που μπορεί να προχωρήσει μέσω της αντίδρασης Diels-Alder (Σχήμα 3.4). Στην αντίδραση αυτή οι ολεφίνες που λαμβάνονται από την πυρόλυση συνδυάζονται/συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας κυκλικές και αρωματικές ενώσεις.



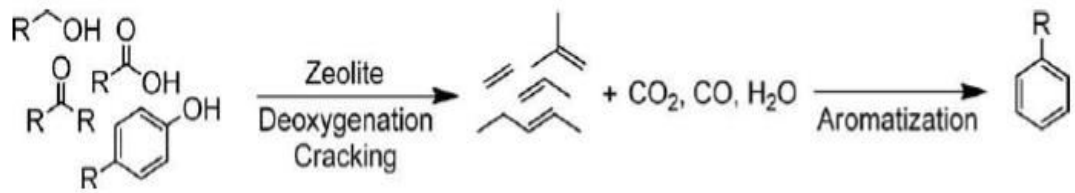
Σχήμα 3.4: Αντίδραση Diels-Alder

Ένα άλλο παράδειγμα αρωματοποίησης και σχηματισμού κυκλικών ενώσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5. Η μετατροπή περιλαμβάνει (τυπικά) την απομάκρυνση του οξυγόνου και αζώτου με σχηματισμό αρωματικών ή αλειφατικών υδρογονανθράκων. Η αντίδραση περιλαμβάνει το σχηματισμό μικρών ενώσεων C1-C2 που είναι σε θέση να εισέλθουν στον πόρο του καταλύτη και να οδηγήσουν στο σχηματισμό μικρών αρωματικών υδρογονανθράκων [24].

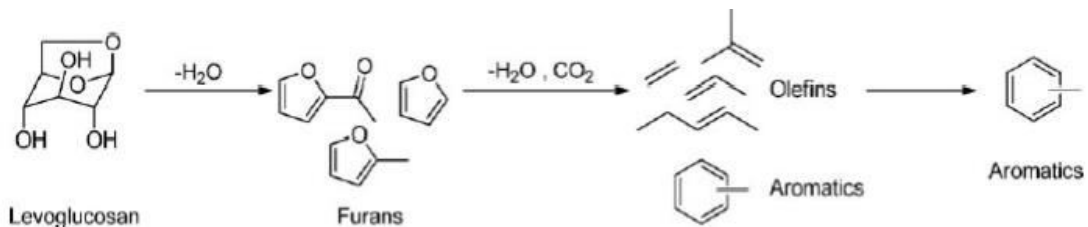


Σχήμα 3.5: Μηχανισμοί σχηματισμού αρωματικών ενώσεων με τη χρήση ZSM-5.

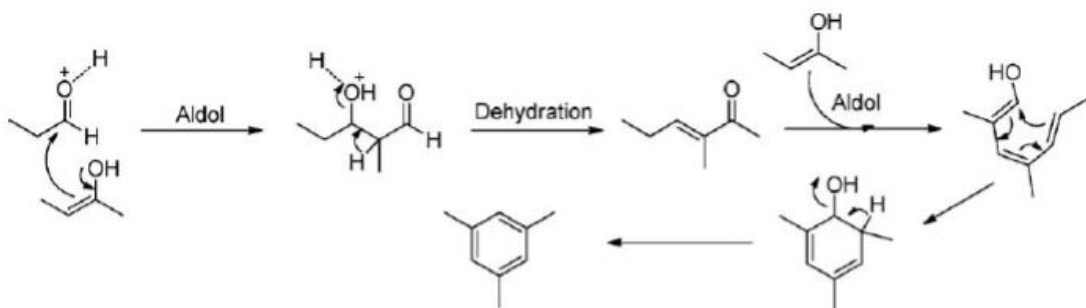
Άλλοι προτεινόμενοι μηχανισμοί από τους Boateng et. al. [21] παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 3.6: Μηχανισμός προς αρωματικούς υδρογονάνθρακες από οξυγονωμένα πυρολυτικά υποστρώματα

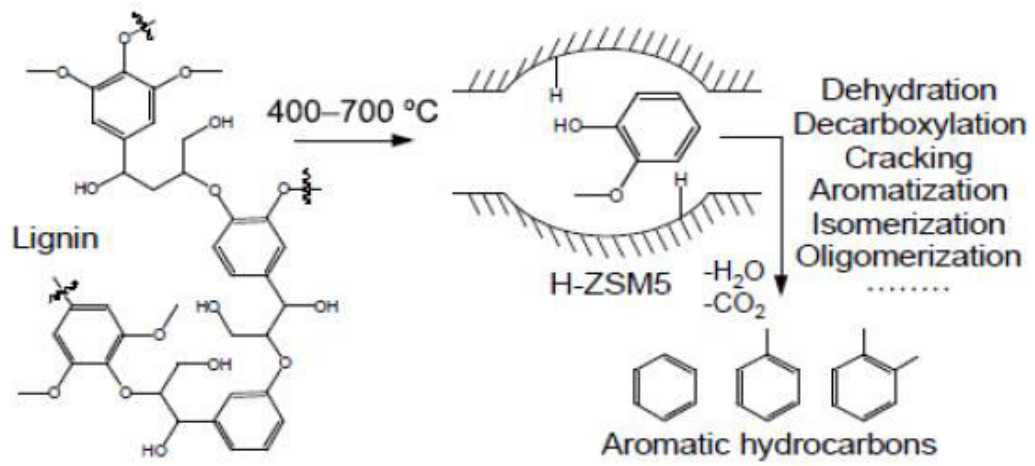


Σχήμα 3.7: Δύο στάδιων αποξυγόνωση λεβογλυκοζάνης προς σχηματισμό φουρανίων και αρωματικών υδρογονανθράκων μέσω περαιτέρω αφυδάτωσης και αποκαρβοξυλίωσης



Σχήμα 3.8: Προτεινόμενη όξινη καταλύσιμη μετατροπή των αλδεϋδών σε αρωματικές ενώσεις

Τέλος σχετικά με έναν πιθανό μηχανισμό της παραγωγής αρωματικών ενώσεων έχοντας ως πρώτη ύλη τη λιγνίνη και χρησιμοποιώντας ως καταλύτη τον H-ZSM-5 παρουσιάζεται συνοπτικά στο παρακάτω Σχήμα [25].



Σχήμα 3.9: Προτεινόμενος μηχανισμός της λιγνίνης στην καταλυτική πυρόλυση [25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης ΑΣΑ

Με τον όρο θερμική επεξεργασία αστικών στερεών αποβλήτων εννοούνται συγκεκριμένες διαδικασίες μετατροπής των απορριμμάτων σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη έκλυση θερμικής ενέργειας. Οι βασικές μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας, κατηγοριοποιημένες βάσει των απαιτήσεων τους σε αέρα είναι: η αποτέφρωση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση.

Όπως αναφέρεται στην ΚΥΑ 114218 (1997) ο σκοπός της θερμικής επεξεργασίας των αποβλήτων είναι τριπλός:

- Ελάττωση του όγκου τους.
- Μετατροπή τους σε υλικά μη επιβλαβή για την υγεία.
- Η κατά το δυνατόν εκμετάλλευση της ευρισκόμενης στα απορρίμματα ενέργειας.

Παράλληλα, έχουν θεσπιστεί ειδικοί όροι και προδιαγραφές για την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τον έλεγχο εγκαταστάσεων θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων (Οδηγία 2000/76/ΕΚ «Για την Αποτέφρωση των Αποβλήτων», ΚΥΑ 22912/1117(2005) «Μέτρα και Όροι για την Πρόληψη και τον Περιορισμό της Ρύπανσης του Περιβάλλοντος από την Αποτέφρωση των Αποβλήτων»), προκειμένου να εξασφαλιστεί η προστασία του περιβάλλοντος από τους αέριους κυρίως ρύπους, που παράγονται κατά τη λειτουργία τους. Σε γενικές γραμμές, οι βασικές αρχές λειτουργίας και οι προδιαγραφές, που πρέπει να πληρούνται, σε όλες τις εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων, είναι κοινές και μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν τις εξής [26]:

- Σταθερές συνθήκες λειτουργίας.
- Ευχέρεια προσαρμογής σε απότομες αλλαγές της σύστασης και της ποσότητας τροφοδοσίας.
- Ευελιξία προσαρμογής στις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις της σύνθεσης και της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου καυσίμου.

- Πλήρης έλεγχος των ρύπων στις εκπομπές.
- Μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας, κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας.

Ο παρακάτω Πίνακας συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων θερμικής επεξεργασίας, όσον αφορά στις συνθήκες λειτουργίας των αντίστοιχων εγκαταστάσεων και τα προκύπτοντα προϊόντα.

	Πυρόλυση	Αεριοποίηση	Αποτέφρωση
Συνθήκες λειτουργίας			
Θερμοκρασίας αντίδρασης (°C)	250 - 700	500-1600	800-1450
Πίεση (bar)	1	1-45	1
Ατμόσφαιρα	Αδρανής / Άζωτο	Παράγοντας αεριοποίησης: O ₂ , H ₂ O	Αέρας
Στοιχειομετρική αναλογία	0	<1	>1
Προϊόντα			
Αέρια φάση	H ₂ , CO, H ₂ O, N ₂ , υδρογονάνθρακες	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂
Στερεά φάση	Τέφρα, κωκ	Τέφρα, σκωρία	Τέφρα, σκωρία
Υγρή φάση	Έλαια πυρόλυσης και νερό		

Πίνακας 4.1 : Τυπικές συνθήκες λειτουργίας και προϊόντα των τριών βασικότερων μεθόδων θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ (European Commission, 2005)

4.1. Τεχνολογίες αποτέφρωσης

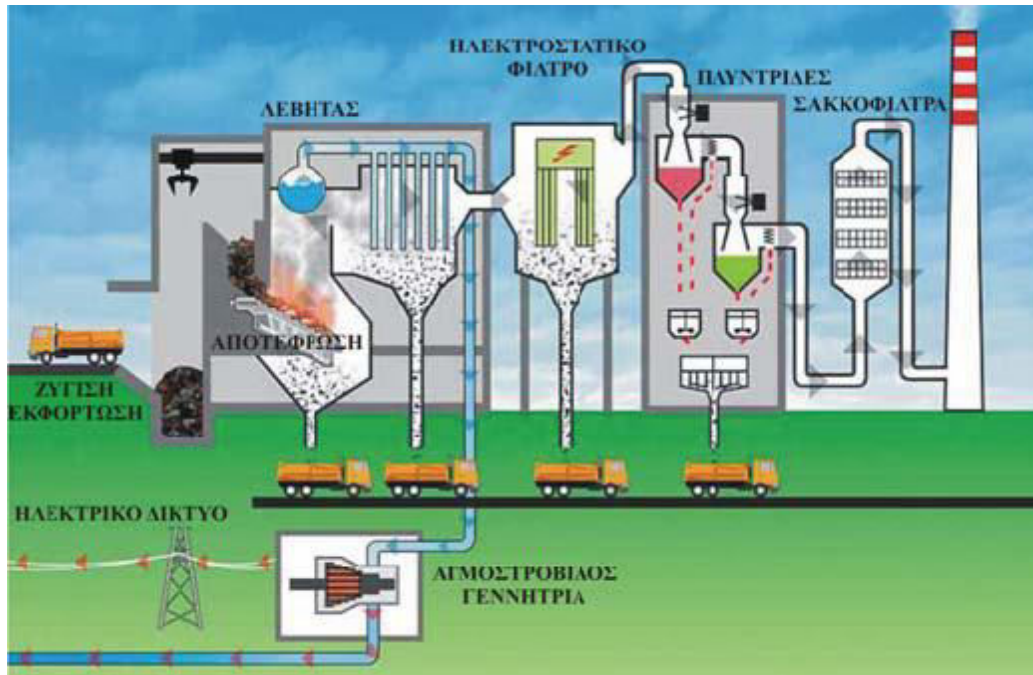
4.1.1. Περιγραφή τεχνολογίας

Ως αποτέφρωση ορίζεται η ταχεία μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμική, με οξείδωση της οργανικής ύλης των αποβλήτων, υπό συνθήκες περίσσειας οξυγόνου. Τα ανόργανα συστατικά των απορριμμάτων παραμένουν στο παραγόμενο στερεό υπόλειμμα. Τα κυριότερα είδη μονάδων αποτέφρωσης, που έχουν αναπτυχθεί, είναι δύο [26]:

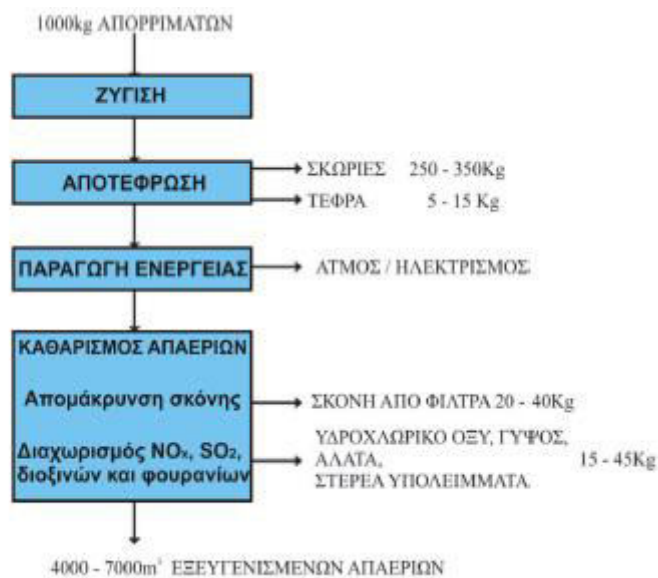
- Μονάδες που απαιτούν ελάχιστη προεπεξεργασία των απορριμμάτων
- Μονάδες όπου χρησιμοποιούνται απορριμματογενή καύσιμα (RDF ή SRF)

Η δυναμικότητα των μονάδων αποτέφρωσης κυμαίνεται μεταξύ 8 – 25 t/h και οι πλέον διαδεδομένοι τύποι είναι οι μονάδες αποτέφρωσης κινούμενων εσχάρων, περιστρεφόμενου κλιβάνου και ρευστοποιημένης κλίνης [27]. Για απόβλητα με κατώτερη θερμογόνο δύναμη της τάξης των 8 MJ/kg (1.910 kcal/kg), η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται σε 520 kWh/t αποβλήτων. Εάν από την παραπάνω ποσότητα αφαιρεθεί η ίδια κατανάλωση του εργοστασίου, που ανέρχεται σε 70 kWh/t, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, που μπορεί να διατεθεί, είναι της τάξης των 450 kWh/t αποβλήτων [28].

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται το υποσύστημα μιας τυπικής μονάδας αποτέφρωσης Α.Σ.Α. με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και ένα ενδεικτικό διάγραμμα ροής μιας τέτοιας μονάδας.



Εικόνα 4.1.1.α: Τυπική μονάδα αποτέφρωσης αστικών στερεών αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [26]



Εικόνα 4.1.1.β : Διάγραμμα ροής μιας τυπικής σύγχρονης εγκατάστασης αποτέφρωσης

4.1.2. Εκπομπές καυσαερίων αποτέφρωσης

Από τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης και ανάλογα με την ποιότητα των ΑΣΑ, παράγονται εκτός από τα τυπικά προϊόντα της αποτέφρωσης (ατμός, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, οξειδία του αζώτου, σωματίδια) και μια σειρά άλλων ενώσεων όπως υδροχλώριο, υδροφθόριο, διοξίνες, φουράνια, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, βαρέα μέταλλα κτλ. Για τον έλεγχο των εκπομπών έχουν θεσπιστεί αυστηρά όρια (Οδηγία 2000/76/ΕΚ και ΚΥΑ 22912/1117/6-6-2005), για την επίτευξη των οποίων απαιτείται η χρήση προηγμένων συστημάτων ελέγχου [29].

Για τον λόγο αυτό, τα απαέρια της παραγωγικής διαδικασίας υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία με συστήματα χημικού καθαρισμού καυσαερίων (ηλεκτροστατικά φίλτρα, πλυντρίδες, σακκόφιλτρα, ενεργό άνθρακα, μη καταλυτική αναγωγή αζωτοξειδίων) ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα σύμφωνα και με την κείμενη νομοθεσία (ΚΥΑ22912/2005).

4.1.3. Ενεργειακή απόδοση εγκαταστάσεων αποτέφρωσης ΑΣΑ

Οι μονάδες ενεργειακής αξιοποίησης σύμμεικτων απορριμμάτων, πέραν της διαχείρισης των αποβλήτων, έχουν ως στόχο την παραγωγή ενέργειας και μέσω αυτού την αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων (λιγνίτη, πετρέλαιο κ). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, με σκοπό τη χρησιμοποίηση των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών σε τέτοιου είδους μονάδες, θέσπισε πρόσφατα, στην κοινοτική οδηγία 2008/98, τύπο ενεργειακής απόδοσης μονάδων αποτέφρωσης ΑΣΑ. Σύμφωνα με τον τύπο, ο οποίος πρέπει να τονιστεί ότι δεν αποτελεί τον βαθμό απόδοσης της μονάδας, οι μονάδες θερμικής αξιοποίησης αποβλήτων οφείλουν να υπερτερούν των ορίων που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση, ώστε η διαδικασία που εκτελούν να θεωρείται ανάκτηση ενέργειας. Τα όρια που έχουν τεθεί είναι 0,60 για τις ήδη κατασκευασμένες μονάδες μέχρι την 31/12/2008 και 0,65 για τις κατασκευασμένες μονάδες μετά την 1/1/2009 [30].

Οι μονάδες θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρισμό, ατμό (για διανομή μέσω δικτύων τηλεθέρμανσης) ή και τα δύο μαζί

(συμπαραγωγή θερμική και ηλεκτρικής ενέργειας). Οι επιλογές αυτές είναι ικανές να επιτύχουν τα όρια που θέτει η ΕΕ.

4.1.4. Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας

Το τελικό κόστος μιας μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Τη δυναμικότητα.
- Το βαθμό απόδοσης της μονάδας.
- Τη σύσταση και την αναγκαία επεξεργασία των παραγόμενων αποβλήτων.
- Τις γενικότερες οικονομικές παραμέτρους (κόστος γης, εργατικό κόστος, κόστος πρώτων υλών, κτλ).
- Το κόστος πώλησης της παραγόμενης ενέργειας (ηλεκτρικής και θερμικής).
- Τη δυνατότητα ανάκτησης και πώλησης υλικών.
- Τους περιορισμούς και στόχους, που θέτει η εκάστοτε ισχύουσα νομοθεσία.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα, το λειτουργικό κόστος της αποτέφρωσης ΑΣΑ, σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, κυμαίνεται μεταξύ 21 και 326€/t [31], [32], ενώ οι συνθηθέστερες τιμές κυμαίνονται μεταξύ 70 –100 €/t. Το μεγάλο αυτό εύρος του κόστους εξαρτάται κυρίως από τον όγκο των απορριμμάτων που οδηγούνται προς αποτέφρωση και από τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά των μονάδων αποτέφρωσης, ωστόσο η κατώτερη τιμή των 21 €/t κρίνεται ιδιαίτερα χαμηλή.

Όσον αφορά στην Ελλάδα, στην περίπτωση κατασκευής μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ, το τέλος πύλης εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται σε 40 €/t [33].

Για σύγκριση, αναφέρεται ότι στις διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, το κόστος για την ταφή των απορριμμάτων κυμαίνεται από 9 έως 164 €/t και για την κομποστοποίηση, από 16 έως 189 €/t (με συνήθεις τιμές περί τα 50 €/t) [31]. Στην Ελλάδα το συνολικό κόστος της υγειονομικής ταφής εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 40 – 50 €/t.

4.2. Αξιοποίηση απορριμματογενών καυσίμων

Σε μονάδες Μηχανικής Βιολογικής Επεξεργασίας (ΜΒΕ, Mechanical Biological Treatment - ΜΒΤ) δύναται να παραχθεί ένα διαχωρισμένο, σχετικά ομογενοποιημένο

κλάσμα υψηλής θερμογόνου δύναμης, το οποίο αποτελείται από χαρτί, πλαστικά και άλλα καύσιμα υλικά, προς χρήση ως απορριμματογενές καύσιμο. Το καύσιμο αυτό ονομάζεται συχνότερα RDF. Άλλοι παρεμφερείς όροι που χρησιμοποιούνται είναι REF (Recovered Fuel), PPF (Paper and Plastic Fraction) και PEF (Processed Engineered Fuel), ενώ υπάρχουν και καύσιμα από χρησιμοποιημένα ελαστικά, τα TDF (Tire Derived Fuel) [34].

Τα απορριμματογενή καύσιμα από συσκευασίες PDF (Packaging Derived Fuel) και τα PEF είναι συνήθως ανώτερης ποιότητας από το RDF, καθώς αποτελούνται από στερεό καύσιμο κλάσμα υλικών, που ενώ έχουν διαχωριστεί στην πηγή, δεν οδηγούνται προς ανακύκλωση, όπως είναι οι χάρτινες συσκευασίες ροφημάτων και δοχεία PE/PET με προσμίξεις PVC. Πρόσφατα έχει αρχίσει επίσης να χρησιμοποιείται ο όρος SRF (Solid Recovered Fuel) [26].



Εικόνα 4.2 : RDF [35]

4.2.1. Περιγραφή τεχνολογίας

Δυο είναι οι τεχνολογίες παραγωγής απορριμματογενών καυσίμων από ΑΣΑ: η μηχανική και η βιολογική επεξεργασία των απορριμμάτων. Συνήθως τα συστήματα που χρησιμοποιούνται κατά τη μηχανική επεξεργασία των ΑΣΑ περιλαμβάνουν μείωση του μεγέθους, κοσκίνισμα, διαχωρισμό με αέρα και μαγνητικό διαχωρισμό.

Η διάταξη των διεργασιών βασίζεται στην ποιότητα και στη φύση των εισερχόμενων αποβλήτων, καθώς και στη διαθεσιμότητα, χωροθέτηση και προδιαγραφές της αγοράς των ανακτώμενων υλικών. Άλλες διεργασίες που μπορεί να συμπεριλαμβάνονται σε αυτές τις εγκαταστάσεις είναι ο χειρωνακτικός διαχωρισμός, ο διαχωρισμός με

επαγωγικά ρεύματα (ανάκτηση μη σιδηρούχων υλικών) και η αύξηση της πυκνότητας (παραγωγή pellets) [36], [37]. Ως αποτέλεσμα, μετά τη μηχανική επεξεργασία ανακτώνται υλικά προς ανακύκλωση, όπως επίσης καθίσταται δυνατή και η παραγωγή RDF, το οποίο αποτελείται κυρίως από πλαστικά χαρτί και ξύλα

Εκτός της μηχανικής επεξεργασίας, απορριμματογενές καύσιμο μπορεί να προκύψει και μετά τη βιολογική ξήρανση του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος απορριμμάτων. Αφού διαχωριστούν και στην περίπτωση αυτή τα αδρανή υλικά και τα μέταλλα, το εναπομένον κλάσμα, εκτός από χαρτί και πλαστικό, περιέχει επίσης μεγάλο ποσοστό ζυμώσιμων, τα οποία ξηραίνονται και σταθεροποιούνται. Κατά συνέπεια προκύπτει καύσιμο υψηλής θερμογόνου δύναμης κατάλληλο προς αποτέφρωση.

Ο όρος RDF χρησιμοποιείται συχνότερα για απορριμματογενές καύσιμο που παράγεται κατά τη φάση της μηχανικής επεξεργασίας και αποτελείται κυρίως από πλαστικά, χαρτί και ξύλα. Το SRF είναι απορριμματογενές καύσιμο που πληροί τις προϋποθέσεις του προτύπου CEN/TC 343 και ως όρος χρησιμοποιείται συχνότερα για το καύσιμο που παράγεται μετά το πέρας της βιολογικής ξήρανσης.

4.2.2. Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης

Τα απορριμματογενή καύσιμα έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αξιοποιηθούν σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις, οι οποίες για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Οι κυριότερες από τις εγκαταστάσεις αυτές είναι οι εξής:

- Τσιμεντοβιομηχανίες
- Εργοστάσια παραγωγής ενέργειας
- Χαρτοποιίες
- Κεραμοποιίες
- Χαλυβουργεία
- Ασβεστοκάμινοι

Η χρήση απορριμματογενών καυσίμων παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση ανεπεξέργαστων ΑΣΑ, τα οποία δεν δύνανται να συναποτεφρωθούν σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Από αυτά, τα κυριότερα είναι:

- η υψηλή θερμογόνος δύναμη, η οποία παραμένει σχετικά σταθερή,
- η ομοιογένεια της φυσικής – χημικής σύνθεσης,
- η ευκολία στην αποθήκευση, διαχείριση και μεταφορά,
- ο μειωμένος απαιτούμενος αέρας κατά τη διάρκεια της αποτέφρωσης.

Ωστόσο, βασικότερο μειονέκτημα των απορριμματογενών καυσίμων είναι το υψηλό κόστος παραγωγής. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή εμπειρία, η μέση θερμογόνος δύναμη απορριμματογενών καυσίμων που προέρχεται από ΑΣΑ που υφίστανται διαλογή στην πηγή είναι 20-23 MJ/kg. Η τιμή αυτή είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή του RDF των σύμμεικτων ΑΣΑ (13-15 MJ/kg), αλλά και από αυτήν των μη επεξεργασμένων ΑΣΑ (8-11 MJ/kg). Παρόλα αυτά αύξηση της θερμογόνου δύναμης μπορεί να επιτευχθεί με τη προσθήκη χρησιμοποιημένων ελαστικών στην παραγωγή του RDF.

Στην περίπτωση οικονομικά αναπτυσσόμενων χωρών, στις οποίες τα ΑΣΑ περιέχουν υλικά με υψηλή υγρασία, το παραγόμενο RDF αναμένεται χαμηλής ποιότητας, εκτός και αν χρησιμοποιηθούν ιδιαίτερα πολύπλοκες μέθοδοι επεξεργασίας [37].

Παράλληλα, η περιεχόμενη υγρασία στο RDF που προέρχεται από αδρανή ή βιομηχανικά στερεά απόβλητα (11-17%) είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή των ΑΣΑ(25-34%). Αντίστοιχα, το περιεχόμενο τέφρας στο RDF που παράγεται από βιομηχανικά στερεά απόβλητα (7-10%) είναι μικρότερο από αυτό του RDF που παράγεται από άλλα ρεύματα αποβλήτων (10-16%).

Η ποιοτική σύσταση των απορριμματογενών καυσίμων και η θερμογόνος δύναμη είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ποιότητα και την ποσότητα των αερίων εκπομπών που παράγονται κατά την αποτέφρωσή του. Σημαντικές ποιοτικές παράμετροι είναι η υγρασία, η περιεχόμενη τέφρα, το χλώριο και το θείο. Τα χαρακτηριστικά αυτά επηρεάζουν άμεσα την απόφαση για τη χρήση τους στη βιομηχανία και στα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, καθώς μπορεί να προκύψουν [38]:

- Τεχνολογικά προβλήματα όπως διαβρώσεις, και υψηλό κόστος συντήρησης.
- Απρόβλεπτη κακή ποιότητα του καυσίμου (μεγάλη περιεκτικότητα σε χλώριο, περιεκτικότητα σε τέφρα, χαμηλό σημείο τήξης, κλπ.).

- Αντιδράσεις από τους κατοίκους των γύρω περιοχών.

Αυξημένο ποσοστό υγρασίας μπορεί να προκαλέσει αύξηση εκπομπών, μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας και κατά συνέπεια μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Αντίστοιχα, υψηλό ποσοστό τέφρας στο απορριμματογενές καύσιμο προκαλεί μείωση της ποσότητας τροφοδοσίας που διέρχεται από τη ζώνη προθέρμανσης, με αποτέλεσμα την ελάττωση ανάκτησης θερμότητας και την αυξημένη θερμοκρασία εκπομπών [39].

Όσον αφορά στην Ελλάδα, προδιαγραφές που καθορίζουν την ποιότητα του RDF αναφέρονται στην ΚΥΑ 114218 (1997). Σύμφωνα με τις προδιαγραφές αυτές:

- Η κατώτερη θερμογόνο δύναμη να είναι τουλάχιστον 4.000 kcal/kg (16,7MJ/kg).
- Η υγρασία μικρότερη από 20%.
- Η περιεκτικότητα σε χαρτί και πλαστικό να είναι μεγαλύτερη από 95% επί του ξηρού βάρους.

4.2.3. Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας

Το κόστος της παραγωγής απορριμματογενών καυσίμων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με έναν από τους βασικότερους, την απαιτούμενη ποιότητα του τελικού προϊόντος, η οποία καθορίζει τις επιμέρους διατάξεις που θα εγκατασταθούν στις μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων. Ενδεικτικά, στο Γραμματικό και στην Κερατέα η κατασκευή εργοστασίων βιολογικής ξήρανσης δυναμικότητας 127.500t/έτος, εκτιμάται ότι το κόστος παραγωγής SRF ανέρχεται σε 80,65 €/t με 142,90 €/t [29]. Για σχεδιαζόμενη εγκατάσταση επεξεργασίας και διάθεσης απορριμμάτων στη Θεσσαλονίκη, η οποία περιλαμβάνει και μονάδα παραγωγής και ενεργειακής αξιοποίησης απορριμματογενών καυσίμων, το συνολικό κόστος επένδυσης με ΦΠΑ ανέρχεται σε 280.158.505 € [40]. Η εν λόγω εγκατάσταση περιλαμβάνει μονάδα μηχανικής βιολογικής επεξεργασίας, μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης και χώρο υγειονομικής ταφής υπολειμμάτων και σχεδιάστηκε για εισερχόμενες ποσότητες ΑΣΑ μεταξύ 250.000 – 350.000 t/έτος.

Για μια μονάδα RDF με ρυθμό παραγωγής 25 t RDF/h το κόστος κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη κόστος αγοράς εξοπλισμού, κόστος εγκατάστασής του, κόστος κατασκευής κτιριακών εγκαταστάσεων, αγορά γης και μισθούς ισούται με (Caruto and Pelagagge, 2002):

$$K_k = 2,99A$$

Όπου A: κόστος αγοράς εξοπλισμού

Και το λειτουργικό κόστος (Caruto and Pelagagge, 2002):

$$K_e = 0,352.K_k + 1,05.A + 1,2.E + Z + H + \Theta + I$$

Όπου K_k: Κόστος εγκατάστασης

Δ: Κόστος κατανάλωσης ενέργειας

E: Κόστος εργασίας

Z: Τέλος πύλης (σε περίπτωση που ο παραγωγός θα πρέπει να πληρώσει τρίτους για τη χρήση του RDF)

H: Μεταφορικό κόστος

Θ: Κόστος διάθεσης υπολειμμάτων

I: Κόστος αγοράς μεταχειρισμένων ελαστικών

Σε γενικές γραμμές σύμφωνα με τη διεθνή εμπειρία, η παραγωγή του RDF θεωρείται οικονομικά βιώσιμη, αν δεν παρέχονται κρατικές επιχορηγήσεις για τη λειτουργία της (Caruto and Pelagagge, 2006, Vehlow, 2008) ή αν δεν καλύπτει το κόστος αυτό ο χρήστης των υπηρεσιών (ΟΤΑ, πολίτες και παραγωγοί).

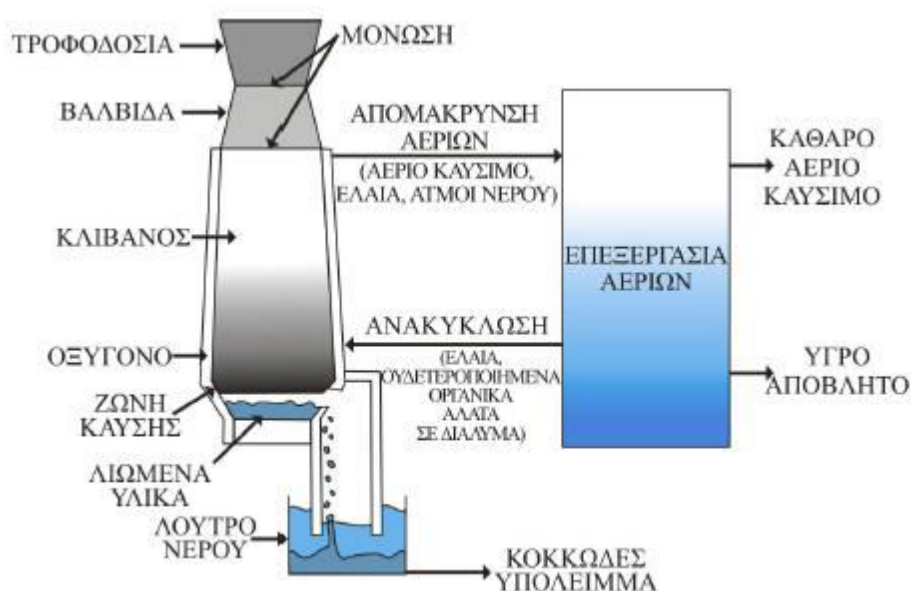
Είναι όμως σαφές ότι αποτελεί μία τεχνολογική εφαρμογή με πολλές εφαρμογές και σημαντική εξέλιξη και προβλέπεται από το ελληνικό και κοινοτικό θεσμικό πλαίσιο. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία περιέχει λιγότερα στοιχεία και αποτελέσματα των εφαρμογών αποτέφρωσης SRF και RDF.

4.3. Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση αποτελεί μια επίσης σχετικά νέα και μη ευρέως διαδεδομένη, στην Ευρώπη, μέθοδο θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ. Αν και εφαρμόζεται με επιτυχία στη χημική βιομηχανία για αρκετές δεκαετίες, η αεριοποίηση των ΑΣΑ παρουσιάζει σε δυσκολίες λόγω του χαμηλού θερμικού περιεχομένου τους και των μεταβολών της σύνθεσής τους. Για το λόγο αυτό οι προσπάθειες επικεντρώνονται τα τελευταία χρόνια στην αεριοποίηση απορριμματογενών καυσίμων, που έχουν μεγαλύτερο θερμικό περιεχόμενο και σταθερότερες ιδιότητες.

4.3.1. Περιγραφή τεχνολογίας

Η αεριοποίηση περιλαμβάνει την μετατροπή του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων σε ένα μίγμα καυσίμων αερίων, μέσω μερικής οξείδωσής του σε υψηλές θερμοκρασίες (400 έως 1500 °C) [1]. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας της αεριοποίησης.



Εικόνα 4.3 : Διάγραμμα ροής της διεργασίας της αεριοποίησης [26]

Η αεριοποίηση αποτελεί θεωρητικά, το επόμενο στάδιο της πυρόλυσης, κατά το οποίο το υπολειμματικό κωκ της πυρόλυσης οξειδώνεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 800 °C, παρουσία περιορισμένων (μη στοιχειομετρικών) ποσοτήτων οξυγόνου. Η ομοιότητα της αεριοποίησης με την πυρόλυση είναι ότι τα απορρίμματα

μετατρέπονται σε αέρια, στερεά και υγρά καύσιμα, ωστόσο η κύρια διαφορά τους μπορεί να συνοψιστεί ως εξής [41]:

- Η πυρόλυση χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή θερμότητας για να ενεργοποιηθούν οι ενδόθερμες αντιδράσεις θερμικής διάσπασης των απορριμμάτων, σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου.
- Η αεριοποίηση είναι αυτοσυντηρούμενη (χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας μετά το στάδιο της ανάφλεξης) και χρησιμοποιεί πρόσθετο καύσιμο αέριο, όπως για παράδειγμα ατμό, διοξείδιο του άνθρακα, αέρα ή οξυγόνο, για την επιπλέον μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων σε αέρια προϊόντα. Η ενέργεια που απαιτείται για την αντίδραση αεριοποίησης παράγεται με καύση μέρους του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αεριοποίησης.

4.3.2. Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης

Τα παραγόμενα ααέρια εξαρτώνται από το είδος του μέσου αεριοποίησης. Στην περίπτωση που υπάρχει τροφοδοσία με αέρα, λόγω της παρουσίας του ατμοσφαιρικού αζώτου, η θερμογόνος δύναμη του αέριου προϊόντος είναι χαμηλή και κυμαίνεται στα 0,35 MJ/m³. Η τυπική του σύσταση είναι: 10% CO₂, 20% CO, 15% H₂, 2% CH₄ και 53% N₂. Στην περίπτωση που η τροφοδοσία αποτελείται από καθαρό οξυγόνο, το ενεργειακό περιεχόμενο του αέριου προϊόντος αυξάνεται στα 0,7 MJ/m³. Στην περίπτωση αυτή η τυπική του σύσταση του είναι: 14% CO₂, 50% CO, 30% H₂, 4% CH₄, 1% C_xH_y και 1% N₂ [26].

4.3.3. Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας

Όπως και στην περίπτωση των μονάδων πυρόλυσης, έτσι και στις μονάδες αεριοποίησης, δεν υπάρχουν διαθέσιμα επαρκή οικονομικά στοιχεία που αφορούν στο κόστος κατασκευής και λειτουργίας τους. Επιπροσθέτως ούτε τα θεωρητικά δεδομένα που δίδονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες είναι εύκολο να επαληθευτούν [42].

4.4. Αναερόβια ζύμωση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια διεργασία που λαμβάνει χώρα αυθόρμητα σε αναερόβια περιβάλλοντα, όπως οι ορυζώνες, τα έλη και οι χώροι διάθεσης

αποβλήτων. Μπορεί ωστόσο να λάβει χώρα και κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε ειδικές εγκαταστάσεις, με στόχο τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου μεθανίου, καθώς και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών προβλημάτων και οχλήσεων (π.χ. διαφυγή μεθανίου, οσμές).

4.4.1. Περιγραφή τεχνολογίας

Το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, πολτοποιείται με νερό και παραμένει έτσι, υφιστάμενο υδρόλυση. Με την υδρόλυση τα οργανικά μακρομόρια διασπώνται σε μικρότερα, που μπορούν ευκολότερα να βιοαποικοδομηθούν. Το στάδιο της υδρόλυσης δεν είναι πάντοτε απαραίτητο και εξαρτάται από το είδος του καιγόμενου κλάσματος. Μετά την υδρόλυση, το οργανικό κλάσμα περνάει σε ειδικά σχεδιασμένους βιοαντιδραστήρες, όπου υφίσταται βακτηριακή αποικοδόμηση απουσία αέρα (αναερόβια ζύμωση). Τα αέρια προϊόντα της ζύμωσης είναι CH₄ 45 – 55%, CO₂ 40 – 50% και H₂S. Το CH₄ χρησιμοποιείται μετά από αφύγρανση και αποθείωση απευθείας σε ζεύγος MEK-ηλεκτρογεννήτριας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε περίπτωση που το οργανικό κλάσμα προέρχεται από διαλογή στην πηγή και όχι μετά από μηχανικό διαχωρισμό σύμμεικτων ΑΣΑ, τότε το υδαρές υπόλειμμα μετά από χώνευση μπορεί να αποτελέσει λίπασμα καλής ποιότητας. Το νερό είτε ανακυκλώνεται στο στάδιο της υδρόλυσης, είτε διατίθεται για πότισμα καλλιεργειών. Η συμπαραγόμενη θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται στους βιοαντιδραστήρες για την διατήρηση της θερμοκρασίας σε κατάλληλο επίπεδο βέλτιστης απόδοσης της ζύμωσης.

Ανάλογα με την ποιότητα και ποσότητα των ΑΣΑ και τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της αναερόβιας ζύμωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμόζονται τα παρακάτω στάδια.

- Διαλογή. Διαχωρισμός του οργανικού κλάσματος, είτε με διαλογή στην πηγή, είτε μηχανικά.
- Μείωση μεγέθους. Η μείωση μεγέθους παρέχει μέγιστη επιφάνεια δράσης για τα βακτήρια, και γίνεται με ποικιλία τρόπων (κοπή, άλεση, τεμαχισμός κοχλία, τύμπανο κλπ).

- Αναερόβια ζύμωση. Το οργανικό κλάσμα εισέρχεται στον βιοαντιδραστήρα, όπου υφίσταται βακτηριακή αποικοδόμηση για παραγωγή βιοαερίου.
- Μετεπεξεργασία. Το υδαρές υπόλειμμα παραμένει σε χώνευση για 2-4 εβδομάδες.

Το κύριο τμήμα της τεχνολογίας είναι η αναερόβια ζύμωση. Ορισμένες παραλλαγές που έχουν εφαρμογή αναφέρονται περιληπτικά στην συνέχεια.

Ξηρή διακοπτόμενη (Dry batch)

Τα ΑΣΑ φορτώνονται κατά παρτίδες σε ειδικούς θαλάμους που κλείνουν αεροστεγώς, αφού εμβολιασθούν με βακτηριακό υπόλειμμα από την προηγούμενη παρτίδα. Παραμένουν 20-30 μέρες για πλήρη ζύμωση και παραγωγή του βιοαερίου. Αντί ανάδευσης των ΑΣΑ, ανακυκλώνεται το νερό με άντληση και ψεκασμό. Είναι γνωστή με τις εμπορικές ονομασίες BEKON, και BOCELL. Έχει τα τυπικά μειονεκτήματα αστάθειας και χειρισμού των διακοπτόμενων διεργασιών.

Ξηρή συνεχής (Dry continuous)

Η παραλλαγή αυτή είναι γνωστή με τις εμπορικές ονομασίες DRANCO, VALORGA, KOMPOGAS. Λειτουργεί με περιεκτικότητες στερεών 20-40% και επιτυγχάνεται κατεργασία μεγάλων ποσοτήτων ΑΣΑ με ελάχιστη ποσότητα νερού. Η αναερόβια ζύμωση γίνεται στη θερμοφιλική περιοχή (50-55°C).

Υγρή συνεχής (Wet continuous)

Η παραλλαγή αυτή γνωστή με την ονομασία REFCOM, λειτουργεί με περιεκτικότητες στερεών κάτω του 10%, απαιτώντας μεγάλες ποσότητες νερού. Είναι κατάλληλη για συνδυασμό με λύματα, ζωική κοπριά, και βιομηχανικά απόβλητα. Το υγρό υπόλειμμα μετά τη ζύμωση ανακυκλώνεται για εξοικονόμηση νερού. Η παραλλαγή αυτή δεν επιλέγεται όταν πρόκειται μόνο για ΑΣΑ.

Υγρή πολλαπλών σταδίων (Wet multistage)

Στην παραλλαγή αυτή τα ΑΣΑ μετατρέπονται σε παχύρρευστο υδατικό διάλυμα (slurry) και υφίστανται ζύμωση σε πρώτο στάδιο με παραγωγή πτητικών οργανικών

οξέων. Σε δεύτερο στάδιο το διάλυμα με τα πτητικά οξέα μετατρέπεται σε αέριο με ζύμωση σε αναερόβιο αντιδραστήρα υψηλού φορτίου. Βασικό μειονέκτημα της παραλλαγής αυτής γνωστής με τις ονομασίες BTA και PAQUES, είναι η περίπλοκη λειτουργία της.

Ξηρή ημι-διακοπτόμενη (semi batch)

Είναι παραλλαγή της ξηρής διακοπτόμενης ζύμωσης, και περιλαμβάνει πολλούς διαδοχικούς θαλάμους ζύμωσης, με το βακτηριακό υγρό να διέρχεται από τον ένα θάλαμο στον άλλο με άντληση και ψεκάσμο. Δημιουργείται έτσι συνεχής ροή αερίου που επιτρέπει την συνεχή λειτουργία του ζεύγους MEK-ηλεκτρογεννήτριας. Η ζύμωση στον κάθε θάλαμο διαρκεί 20-30 μέρες και τα ΑΣΑ τροφοδοτούνται με περιεκτικότητα 30-50%. Το μειονέκτημα της παραλλαγής είναι η μη συνεχής τροφοδοσία των ΑΣΑ.

Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα της αναερόβιας ζύμωσης:

- Παραγωγή βιοαερίου που αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.
- Σε περίπτωση διαλογής στην πηγή του οργανικού κλάσματος μπορεί να γίνει παραγωγή εδαφοβελτιωτικού.
- Δραστική μείωση των παθογενών βακτηριδίων.
- Σχετικά μικρή απαίτηση της μονάδας σε έκταση.
- Δεν παράγονται αέρια του θερμοκηπίου και οι ρύποι είναι πρακτικά μηδενικοί από τη λειτουργία των μονάδων.
- Δεν δημιουργούνται προβλήματα οσμών.
- Οι μονάδες δε δημιουργούν οπτική ρύπανση και υποβάθμιση των παρακείμενων περιοχών.
- Το πάγιο κόστος των μονάδων, σε σχέση με την διάρκεια ζωής τους, είναι χαμηλό.

Μειονεκτήματα:

- Είναι αργή διεργασία.

- Το αποτεφρώσιμο κλάσμα των ΑΣΑ που δεν αποικοδομείται πρέπει να αφαιρεθεί και να ακολουθήσει άλλη επεξεργασία.
- Η ποσότητα της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την αναερόβια ζύμωση είναι 2 – 2,5 φορές μικρότερη από ότι από μονάδες αποτέφρωσης.

4.4.2. Προϊόντα και δυνατότητες διάθεσης

Κατά την αναερόβια χώνευση γίνεται ελεγχόμενη βιολογική αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου, με αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου (ένα μίγμα CH₄ και CO₂) και ιλύος. Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, όπως επίσης υπάρχει η δυνατότητα να καθαριστεί, να αναβαθμιστεί και να μετατραπεί σε αέριο καύσιμο, ανάλογο του φυσικού αερίου. Σε περίπτωση διαλογής στην πηγή του οργανικού κλάσματος, η ιλύς μετά από χώνευση μπορεί να διατεθεί απευθείας στο έδαφος ή να υποστεί περαιτέρω αερόβια επεξεργασία για τη σταθεροποίησή της και να μετατραπεί σε εδαφοβελτιωτικό. Σε περίπτωση όμως που το οργανικό κλάσμα προέρχεται από μηχανική διαλογή, τότε λόγω προσμίξεων, η παραγόμενη ιλύς, θα αποτελεί απόβλητο και δε δύναται να μετατραπεί σε εδαφοβελτιωτικό ικανοποιητικής ποιότητας. Κατά συνέπεια θα τεθεί ένα επιπλέον ζήτημα της εξεύρεσης λύσης για την τελική διάθεση της παραγόμενης ιλύος.

4.4.3. Στοιχεία κόστους κατασκευής και λειτουργίας

Ενδεικτικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας επιλεγμένων μονάδων αναερόβιας ζύμωσης ΑΣΑ, όπως και η παραγωγή βιοαερίου και ενέργειας για επιλεγμένες μονάδες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μονάδα (έτος κατασκευής)	Δυναμικότητα (t/έτος)	Κόστος επένδυσης (10 ⁶ €)	Λειτουργικό κόστος (€/t)	Τέλη εισόδου (€/t)
Vaasa (1994)	40.000	6,2	39,1	39,1
Amiens (1988)	72.000	1,2	49,0	37,7
Ashford (1999)	40.000	11,8		44-52
Vagron (2000)	230.000 σύμμεικτα 92.000 οργανικά	19,1		

Πίνακας 4.4.3.a : Κόστος κατασκευής και λειτουργίας επιλεγμένων μονάδων αναερόβιας χώνευσης σύμμεικτων ή υπολειμματικών ΑΣΑ

Μονάδα (έτος κατασκευής)	Δυναμικότητα (t/έτος)	Παραγωγή βιοαερίου (10 ⁶ m ³ /έτος)	Πώληση ενέργειας
Vaasa (1994)	40.000	1,95	2.000 MWh/y ηλεκτρική 5.700 MWh/y θερμότητα
Amiens (1988)	72.000	7,9	40.530 MWh/y θερμότητα
Vagron (2000)	230.000 σύμμεικτα 92.000 οργανικά	8,8	7.100 MWh/y ηλεκτρική 14.000 MWh/y θερμότητα

Πίνακας 4.4.4.b: Παραγωγή βιοαερίου και ενέργειας για επιλεγμένες μονάδες αναερόβιας χώνευσης σύμμεικτων ή υπολειμματικών ΑΣΑ

4.5. Ανάλυση SWOT

Με βάση τα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάζεται παρακάτω μια ανάλυση SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) όσον αφορά την αποτέφρωση των ΑΣΑ, την αξιοποίηση απορριματογενών καυσίμων, την πυρόλυση, την αεριοποίηση και την αναερόβια ζύμωση.

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Δυνατότητα λειτουργίας με ελάχιστη προεπεξεργασία των ΑΣΑ. ➤ Μονάδες υψηλής δυναμικότητας. ➤ Καλά εγκατεστημένη αγορά. ➤ Τεχνολογιών αποτέφρωσης στερεών αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο. ➤ Ελαστικότητα στην εποχική διακύμανση της ποσότητας προς επεξεργασία. ➤ Επίτευξη μεγάλης μείωσης του όγκου των απορριμμάτων. ➤ Με την χρήση συστημάτων συμπαραγωγής η απόβλητη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τοπικές χρήσεις. ➤ Δυνατότητα ανάκτησης μετάλλων από την παραγόμενη τέφρα. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Υψηλό κόστος κατασκευής. ➤ Υψηλό κόστος απορρύπανσης των απαερίων. ➤ Απαιτήση ύπαρξης Χώρου Υγειονομικής Ταφής Επικινδύνων για την παραγόμενη ιπτάμενη τέφρα. ➤ Για την επίτευξη βέλτιστης οικονομίας κλίμακας απαιτούνται μονάδες μεγάλης δυναμικότητας και συμβόλαια παροχής αποβλήτων μεγάλης διάρκειας Χαμηλή ποιότητα ανακτημένων μετάλλων από την τέφρα.
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Επίτευξη οικονομίας κλίμακας. ➤ Επίτευξη στόχων εκτροπής ΑΣΑ από την τελική διάθεση. ➤ Η εισαγωγή πιλοτικού μεγέθους και χαμηλών εκπομπών μονάδων μπορεί να ανατρέψει την αρνητική δημόσια εικόνα της αποτέφρωσης στερεών αποβλήτων. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Κίνδυνος αστοχίας των συστημάτων επεξεργασίας απαερίων. ➤ Κίνδυνος αύξησης του κόστους λόγω τελών πύλης του ΧΥΤ Επικινδύνων. ➤ Μπορεί να θεωρηθεί ως αντικίνητρο για την ενδυνάμωση συστημάτων διαλογής στην πηγή. ➤ Οι προδιαγραφές ασφάλειας και εκπομπών μπορεί να αυξήσουν σημαντικά το κόστος. ➤ Οι τοπικές αντιδράσεις μπορούν να προκαλέσουν καθυστερήσεις στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μονάδων αποτέφρωσης στερεών αποβλήτων. ➤ Η ανάγκη για ύπαρξη σημαντικού καταναλωτή θερμότητας πλησίον της μονάδας συμπαραγωγής περιορίζει σημαντικά τις επιλογές χωροθέτησης.

Εικόνα 4.5.a: Ανάλυση SWOT για την αποτέφρωση (mass fired) των ΑΣΑ

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Επεξεργασία κλάσματος υψηλής θερμογόνου δύναμης – αύξηση του βαθμού αποδόσεως του συστήματος. ➤ Χρήση ήδη υπαρχουσών βιομηχανιών (πχ τσιμεντοβιομηχανίες) για την ενεργειακή αξιοποίηση. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ανάγκη για προτυποποίηση των απορριμματογενών καυσίμων και προστιθέμενο κόστος επεξεργασίας. ➤ Επιβάλλεται συνεχής έλεγχος των απαερίων. ➤ Αυξημένο κόστος στην περίπτωση κατασκευής μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης. ➤ Απαίτηση ύπαρξης Χώρου Υγειονομικής Ταφής Επικινδύνων για την παραγόμενη ιπτάμενη τέφρα αν δεν είναι εφικτή η συναποτέφρωση ➤ Αδυναμία διάθεσης του οργανικού κλάσματος χωρίς κόστος
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Η χρήση σε βιομηχανικές διεργασίες προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με την αποτέφρωση στερεών αποβλήτων καθώς αφήνει ευκαιρίες για ανάπτυξη προγραμμάτων ανακύκλωσης. ➤ Η αξιοποίηση βιομηχανικών καταναλωτών απορριμματογενών καυσίμων δεν απαιτεί μονάδες υψηλής έντασης κεφαλαίου αποκλειστικής αποτέφρωσής τους και μπορεί να μεταβάλει τον όγκο τους προς αποτέφρωση ανάλογα με τη ζήτηση. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Εξάρτηση από τον παραλήπτη του απορριμματογενούς καυσίμου ➤ Κίνδυνος αύξησης του κόστους από το τίμημα διαχείρισης και μεταφοράς του καυσίμου ➤ Εξαιρετικά ρευστή αγορά απορριμματογενών καυσίμων – άμεση σύνδεση με την τιμή του πετρελαίου. ➤ Πιθανή εξασθένηση του ενδιαφέροντος του κοινού για την ανακύκλωση και διαλογή στην πηγή.

Εικόνα 4.5.b: Ανάλυση SWOT για την αξιοποίηση απορριμματογενών καυσίμων

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μείωση του όγκου των ΑΣΑ προς τελική διάθεση. ➤ Περισσότερο ευέλικτη τεχνολογία σε μεταβολές όγκου ροής εισερχόμενων ΑΣΑ. ➤ Λιγότερες εκπομπές αέριων ρύπων σε σχέση με την αποτέφρωση. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Νέα τεχνολογία, μη δοκιμασμένη επαρκώς σε εμπορικές εφαρμογές. ➤ Ανάγκη για προεπεξεργασία των ΑΣΑ = αύξηση του κόστους. ➤ Το υπόλειμμα της πυρόλυσης δεν έχει εμπορικές εφαρμογές και πιθανώς απαιτεί εξειδικευμένο χειρισμό για την τελική διάθεση.
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μπορεί να αποτελέσει μέρος ενός συνολικού συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ. ➤ Οι τυπικές μονάδες πυρόλυσης είναι σχετικά μικρότερες σε μέγεθος και με χαμηλότερες εκπομπές από τις μονάδες αποτέφρωσης. ➤ Πιο εύκολα αποδεκτή τεχνολογία από τη δημόσια γνώμη – λιγότερες πιθανότητες να παρουσιαστούν εμπόδια στην υλοποίηση. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Η βιωσιμότητα της μονάδας εξαρτάται αποκλειστικά στην πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. ➤ Με λανθασμένη ενημέρωση του κοινού μπορεί να θεωρηθεί παρόμοια τεχνολογία με την αποτέφρωση με αποτέλεσμα αντίστοιχες αντιδράσεις. ➤ Η επιλογή της πυρόλυσης μπορεί να μειώσει τις προσπάθειες ενδυνάμωσης προγραμμάτων ανακύκλωσης και ελαχιστοποίησης στην πηγή.

Εικόνα 4.5.c: Ανάλυση SWOT για την πυρόλυση

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Τεχνολογία χαμηλών εκπομπών αέριων ρύπων. ➤ Δεν παρουσιάζονται τα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας που υπάρχουν στην πυρόλυση. ➤ Χαμηλή στάθμη θορύβου και οσμών. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Νέα τεχνολογία, μη δοκιμασμένη επαρκώς σε εμπορικές εφαρμογές. ➤ Ανάγκη για προεπεξεργασία των ΑΣΑ = αύξηση του κόστους. ➤ Το υπόλειμμα της αεριοποίησης δεν έχει εμπορικές εφαρμογές και πιθανώς απαιτεί εξειδικευμένο χειρισμό για την τελική διάθεση. ➤ Το παραγόμενο αέριο συχνά έχει χαμηλή θερμογόνο δύναμη.
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μπορεί να αποτελέσει μέρος ενός συνολικού συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ. ➤ Οι τυπικές μονάδες αεριοποίησης είναι σχετικά μικρότερες σε μέγεθος και με χαμηλότερες εκπομπές από τις μονάδες αποτέφρωσης. ➤ Πιο εύκολα αποδεκτή τεχνολογία από τη δημόσια γνώμη – λιγότερες πιθανότητες να παρουσιαστούν εμπόδια στην υλοποίηση. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Η βιωσιμότητα της μονάδας εξαρτάται αποκλειστικά στην πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. ➤ Με λανθασμένη ενημέρωση του κοινού μπορεί να θεωρηθεί παρόμοια τεχνολογία με την αποτέφρωση με αποτέλεσμα αντίστοιχες αντιδράσεις. ➤ Η επιλογή της αεριοποίησης μπορεί να μειώσει τις προσπάθειες ενδυνάμωσης προγραμμάτων ανακύκλωσης και ελαχιστοποίησης στην πηγή.

Εικόνα 4.5.d: Ανάλυση SWOT για την αεριοποίηση

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Δοκιμασμένη τεχνολογία. ➤ Τόσο το βιοαέριο όσο και το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό είναι πιθανές πηγές εσόδων. ➤ Συμβάλει θετικά στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. ➤ Πολύ μεγάλο ποσοστό των υπολειμμάτων μπορεί να αξιοποιηθεί/επαναχρησιμοποιηθεί. ➤ Οι μονάδες σχεδιάζονται με τρόπο που μπορεί εύκολα να αυξηθεί η δυναμικότητα. ➤ Το παραγόμενο βιοαέριο μπορεί μετά από καθαρισμό/αναβάθμιση να διοχετευθεί στο δίκτυο φυσικό αερίου. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μη βιώσιμη τεχνολογία με αποκλειστικό έσοδο την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάγκη για εμπορική εκμετάλλευση και του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού. ➤ Δεν επιτυγχάνεται μείωση του όγκου των ΑΣΑ προς επεξεργασία. ➤ Η ποιότητα του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού βασίζεται στην «ποιότητα» των εισερχόμενων ΑΣΑ. ➤ Ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αναερόβιας ζύμωσης πιθανή παραγωγή ρεύματος υγρών λυμάτων προς επεξεργασία. ➤ Το παραγόμενο βιοαέριο χρειάζεται επεξεργασία πριν τη χρήση για παραγωγή ενέργειας.
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Μεγάλο εύρος πιθανών τεχνολογιών που μπορούν να καλύψουν διαφορετικές ανάγκες. ➤ Δυνατότητα συνεπεξεργασίας αγροτικών-κτηνοτροφικών αποβλήτων με ταυτόχρονη αύξηση της απόδοσης σε βιοαέριο. ➤ Τεχνολογία χαμηλού ρίσκου. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Η αγορά εδαφοβελτιωτικών εξελίσσεται ιδιαίτερα ανταγωνιστικά με αποτέλεσμα την ανάγκη για παραγωγή υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικού. ➤ Οι πολλές διαφορετικές επιλογές τεχνολογίας καθιστούν δύσκολη την εκτίμηση του οικονομικού ρίσκου.

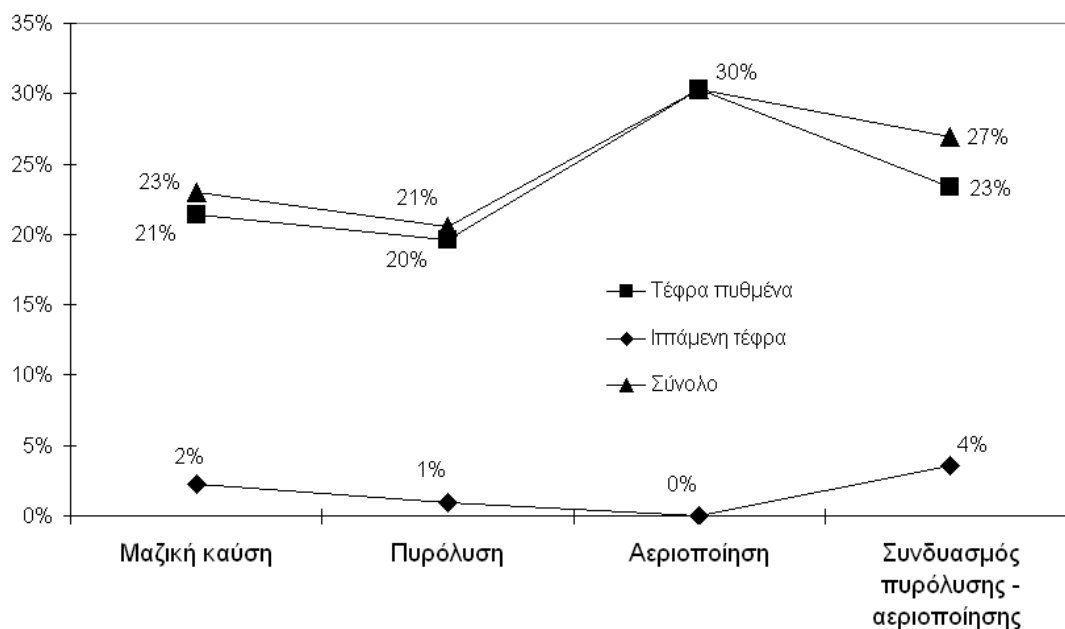
Εικόνα 4.5.e: Ανάλυση SWOT για την αναερόβια ζύμωση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Ανάλυση-επιλογή κριτηρίων για επιλογή βέλτιστης τεχνολογίας

Από τη βιβλιογραφική διερεύνηση των τεχνολογιών θερμικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων υπήρξε μια πλειάδα κριτηρίων για την αξιολόγηση των μεθόδων θερμικής επεξεργασίας των ΑΣΑ, όπως το εύρος δυναμικότητας των τεχνολογιών, στην κατώτερη θερμογόνο δύναμη των προς επεξεργασία ΑΣΑ, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την ίδια κατανάλωση, την ποσότητα προς τελική διάθεση, το κόστος επεξεργασίας και το κόστος διαχείρισης τεφρών.

5.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Η θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων πραγματοποιείται με συμβατικές(αποτέφρωση στερεών αποβλήτων) και με καινοτόμους μεθόδους (πυρόλυση, αεριοποίηση). Τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τις τεχνολογίες αεριοποίησης και πυρόλυσης για τη θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων είναι συχνά ελλιπή και βασίζονται σε υποθέσεις. Συνεπώς, η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών σε μια κοινή βάση είναι πολύ δύσκολη. Ένας από τους στόχους του Περιφερειακού Σχεδιασμού διαχείρισης των στερεών αποβλήτων στην ΠΚΜ είναι και η μείωση της ποσότητάς τους προς τελική διάθεση, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της οδηγίας της υγειονομικής ταφής. Συνεπώς, η θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων θα παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων της εκτροπής τους από τους ΧΥΤΑ. Από την αποτέφρωση, την πυρόλυση και την αεριοποίηση παράγονται τέφρα πυθμένα και ιπτάμενη τέφρα.



Εικόνα 5.1: Τέφρα (% κ.β.) προς διάθεση μετά τη θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων σε μονάδες μαζικής καύσης και καινοτόμες μονάδες [43]

Με βάση τη βιβλιογραφική επισκόπηση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Οι εμπορικές εφαρμογές των τεχνολογικών της αεριοποίησης και της πυρόλυσης για την επεξεργασία των υπολειμμάτων των δημοτικών στερεών αποβλήτων δεν είναι διαδεδομένες στην Ευρώπη. Ο κίνδυνος της χρήσης των καινοτόμων τεχνολογιών είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της χρήσης των συμβατικών μεθόδων.
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας της αεριοποίησης και της πυρόλυσης δεν είναι η μόνη πρόκληση στον αγώνα για τη βέλτιστη θερμική επεξεργασία. Κατά τη σύγκριση των τεχνολογιών, όλες οι συνιστώσες της επεξεργασίας (προ-επεξεργασία, θερμική μετατροπή, δημιουργία υπολείμματος και αξιοποίηση παραγόμενου καυσίμου αερίου) και όλοι οι παράγοντες θα πρέπει να μελετηθούν ταυτόχρονα.
- Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης των συμβατικών μονάδων της αποτέφρωσης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των καινοτόμων μονάδων στην περίπτωση της ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τη θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων.

- Όσον αφορά στο κόστος επεξεργασίας, η πολυπλοκότητα της κατασκευής των καινοτόμων μονάδων τις καθιστά ‘ακριβότερες’ από τις μονάδες συμβατικής αποτέφρωσης.
- Το εύρος της δυναμικότητας των μονάδων αεριοποίησης και πυρόλυσης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των μονάδων αποτέφρωσης. Συνεπώς, οι καινοτόμες μονάδες δεν μπορούν να λειτουργήσουν ανταγωνιστικά των συμβατικών μονάδων ως προς το κριτήριο της οικονομίας κλίμακας.

Τα κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων η τεχνολογία της αναερόβιας ζύμωσης δε συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Επίσης δε λήφθηκε υπόψη η μεθοδολογία της Μηχανικής Βιολογικής επεξεργασίας και στη συνέχεια της αποτέφρωσης του απορριμματογενούς καυσίμου, εξαιτίας της έλλειψης επαρκών δεδομένων αλλά και γιατί αποτελούν συνδυασμό τεχνολογιών, με καινοτόμα ή αδιευκρίνιστα σημεία σε κάποια στάδια και με άγνωστο παραλήπτη του οργανικού κλάσματος. Επιπλέον η δημόσια συζήτηση για την αξιοποίηση απορριμματογενών καυσίμων στη χώρα μας δεν έχει καταλήξει στην αποδοχή αξιοποίησης των καυσίμων αυτών από τσιμεντοβιομηχανίες ή άλλες μεγάλες μονάδες καύσης, και δεν έχει διευκρινιστεί το κόστος αυτής της διαδικασίας.

Τεχνολογία Κριτήριο	Αποτέφρωση	Πυρόλυση	Αεριοποίηση	Συνδυασμός πυρόλυσης - αεριοποίησης
Τελική διάθεση (% κ.β.)	23	21	30	27
Κόστος επεξεργασίας (€/t)	110	124	112	171
Ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/t)	650	377	394	453
Φαινόμενο θερμοκηπίου	-17	-3	-3	-3

Πίνακας 5.1: Κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας

Οι επιδόσεις των τεχνολογιών για τα ΑΣΑ υπολογίσθηκαν για μια σταθερή ετήσια δυναμικότητα 100.000 t. Το κόστος συλλογής των ΑΣΑ δεν συμπεριελήφθη στο κόστος επεξεργασίας. Η τελική διάθεση αναφέρεται στην τέφρα πυθμένα και στην ιπτάμενη τέφρα (% κβ). Για την ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες

αποτέφρωσης λήφθηκε η μέγιστη τιμή των 650 kWh/t. Για τη συνεισφορά των μονάδων αποτέφρωσης στις εκπομπές του φαινομένου του θερμοκηπίου, χρησιμοποιήθηκαν: α) η μεθοδολογία που προτάθηκε από το Διακυβερνητικό Πάνελ για την Κλιματική Αλλαγή το 2006 IPCC Οδηγίες για τις Εθνικές Απογραφές των Θερμοκηπικών Αερίων και η μελέτη των Επιλογών Διαχείρισης Απορριμμάτων και Αλλαγή Κλίματος [44, 45].

5.2. Ανάλυση ευαισθησίας – προσδιορισμός βέλτιστης λύσης

Η μέθοδος Electre III που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στην οικογένεια Electre των πολυκριτηριακών μεθόδων, οι οποίες συγκρίνουν πιθανές δράσεις (στην παρούσα περίπτωση: οι 4 επιλεγμένες τεχνολογίες) σύμφωνα με την επίδοσή τους σε διάφορα κριτήρια [46, 47].

Η λήψης απόφασης βασίσθηκε στο διακριτό πίνακα 25, του οποίου οι πιθανές εναλλακτικές λύσεις (τεχνολογίες αποτέφρωσης, πυρόλυσης, αεριοποίησης και συνδυασμού τους) καθορίσθηκαν εκ των προτέρων και όχι μετά τη βελτιστοποίηση κάποιων αντικειμενικών συναρτήσεων. Η Electre έχει χρησιμοποιηθεί από ερευνητές σε μεθόδους και εφαρμογές σε επενδύσεις μηχανολογικές και υποδομών, σε περιβαλλοντικές μελέτες, σε περιβαλλοντικά προβλήματα λήψης απόφασης και για την επιλογή του βέλτιστου εναλλακτικού συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ [48, 49].

Όσον αφορά στην ολοκληρωμένη διαχείριση των ΑΣΑ, η Electre χρησιμοποιήθηκε για την τελική επιλογή διαφόρων σεναρίων μεταφόρτωσης, επεξεργασίας και τελικής διάθεσης [50]. Η Electre έχει χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα στρατηγικής και λήψης απόφασης.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου ήταν η εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθόδου λήψης απόφασης Electre III για την εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας, η οποία έδωσε αποτελέσματα κατάταξης έτσι ώστε να μελετηθούν οι διαφορετικές προτιμήσεις των αποφασιζόντων σύμφωνα με τα 4 κριτήρια.

Στην παρούσα μελέτη περίπτωσης, η τεχνολογία της αποτέφρωσης ήρθε πρώτη στο 50% των 10 διαφορετικών περιπτώσεων (σεναρίων) μεταβολής του συντελεστή βαρύτητας των κριτηρίων αξιολόγησης και στις 2 καλύτερες θέσεις (1η και 2η)

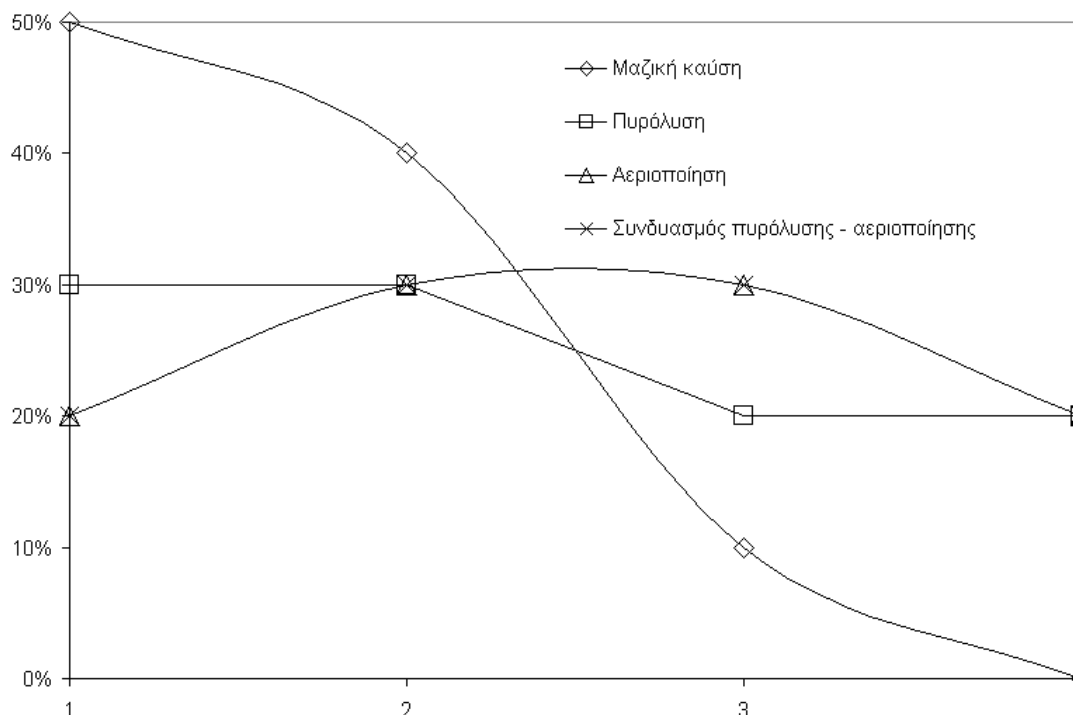
στο 90% των περιπτώσεων (σεναρίων) μεταβολής της βαρύτητας των κριτηρίων (πίνακας 26). Στη 2η θέση, μετά την αποτέφρωση (40%) βρέθηκαν οι υπόλοιπες τεχνολογίες (πυρόλυση, αεριοποίηση, συνδυασμός πυρόλυσης – αεριοποίησης, 30%) όπως φαίνεται και από τους κάτωθι πίνακες καθώς και την Εικόνα.

ΤΔ (%)	ΚΕ (%)	ΑΗΕ (%)	ΦΘ (%)	Σύνολο (%)	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4
100	0	0	0	100	Π	ΜΚ	ΠΑ	3
0	100	0	0	100	ΜΚ	Α	Π	4
0	0	100	0	100	ΜΚ	ΠΑ	Α	2
0	0	0	100	100	Π, Α, ΠΑ	ΜΚ	-	-
50	50	0	0	100	ΜΚ	Π	Α	ΠΑ
0	50	50	0	100	ΜΚ	Α	ΠΑ	Π
0	0	50	50	100	ΠΑ	ΜΚ, Α	Π	-
50	0	0	50	100	Π	ΠΑ	ΜΚ	Α
50	0	50	0	100	ΜΚ	Π, ΠΑ	Α	-
0	50	0	50	100	Α	ΜΚ, Π	ΠΑ	-

Πίνακας 5.2.α: Υπολογισμός κατατάξεων των τεχνολογιών με 50% βήμα μεταβολής του βάρους των 4-κριτηρίων (ΤΔ: Τελική διάθεση, Κόστος επεξεργασίας: ΚΕ, ΑΗΕ: Ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ΦΘ: Φαινόμενο θερμοκηπίου, ΜΚ: Μαζική καύση (αποτέφρωση), Π: Πυρόλυση, Α: Αεριοποίηση, ΠΑ: Συνδυασμός πυρόλυσης – αεριοποίησης).

Τεχνολογία	Θέση (%)	1 ^η	2 ^η	1 ^η και 2 ^η	3 ^η	4 ^η
	Αποτέφρωση		50	40	90	10
Πυρόλυση		30	30	60	20	20
Αεριοποίηση		20	30	50	30	20
Συνδυασμός πυρόλυσης - αεριοποίησης		20	30	50	30	20

Πίνακας 5.2.β: Συχνότητα κατανομής της κατάταξης κάθε τεχνολογίας (θέση 1: καλύτερη, θέση 5: χειρότερη) για τους 10 συνδυασμούς των χρησιμοποιηθέντων βαρών στην ανάλυση ευαισθησίας. Τα σύνολα της 1ης και 2ης θέσης δίνονται στον 3^η στήλη.



Εικόνα 5.2: Συχνότητα κατανομής της κατάταξης κάθε τεχνολογίας (θέση 1: καλύτερη, θέση 5: χειρότερη) για τους 10 συνδυασμούς βαρών που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας

Η αποτέφρωση ιεραρχείται στην 1η θέση στις περιπτώσεις που δοθεί 100% βαρύτητα στα κριτήρια του κόστους επεξεργασίας και της ανάκτησης ενέργειας. Στην ίδια θέση βρίσκεται όταν δοθεί βαρύτητα στις παρακάτω περιπτώσεις: α) 50% στην τελική διάθεση και 50% στο κόστος επεξεργασίας, β) 50% στο κόστος επεξεργασίας και 50% στην ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας και γ) 50% στην τελική διάθεση και 50% στην ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Η πυρόλυση εμφανίζεται στην 1η θέση στις περιπτώσεις που δοθεί βαρύτητα 100% στο κριτήριο της τελικής διάθεσης και από 50% στα κριτήρια της τελικής διάθεσης και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η τεχνολογία αυτή συν-ιεραρχείται μαζί με την αεριοποίηση στην περίπτωση που δοθεί 100% βαρύτητα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Το υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργίας των τεχνολογιών πυρόλυσης και αεριοποίησης είναι υπεύθυνο για την ιεράρχησή τους στην τελευταία θέση της κατάταξης. Στην περίπτωση που δόθηκε βαρύτητα 100% στο κριτήριο του φαινομένου του θερμοκηπίου, οι τεχνολογίες αυτές συν-ιεραρχήθηκαν στην 1η θέση προτίμησης. Στην περίπτωση που δόθηκε βαρύτητα 50% στο κόστος επεξεργασίας και 50% στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, η τεχνολογία της αεριοποίησης ήρθε στην

καλύτερη θέση ενώ στη 2η θέση συν-ιεραρχήθηκαν η αποτέφρωση και η πυρόλυση. Ο συνδυασμός πυρόλυσης – αεριοποίησης ήρθε στην τελευταία θέση στην περίπτωση αυτή.

Η ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα δεδομένα εισόδου του πίνακα 5.1 και κάθε άλλη επιπλέον ανάπτυξη στα χαρακτηριστικά αυτών των τεχνολογιών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη μελλοντική κατάταξη. Παρόλα αυτά, ο ενδιαφερόμενος (ιδιωτικός ή δημόσιος τομέας) αποφασίζοντας μπορεί να εφαρμόσει την προτεινόμενη πολυκριτηριακή ανάλυση για τη λήψη απόφασης και τη μεθοδολογία της ανάλυσης ευαισθησίας για την αποτίμηση και την επιλογή της τεχνολογίας θερμικής επεξεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο Μελέτη περίπτωσης Πυρόλυσης και Αναερόβιας Ζύμωσης στο Νομό Πιερίας

6.1. Παρούσα κατάσταση παραγωγής αποβλήτων στο Νομό Πιερίας

Ο νομός Πιερίας περιλαμβάνει 13 δήμους με πληθυσμό και παραγωγή ΑΣΑ που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Η εξέλιξη στην δεκαετία φαίνεται επίσης στον ίδιο πίνακα και δείχνει για μία αύξηση πληθυσμού της τάξεως του 11,2%, μία αύξηση των ΑΣΑ 10,25%.

ΔΗΜΟΣ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ 1991	ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ 1991	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ 2001	ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ 2001
ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ	48.673	17.500	56.434	20.270
ΑΙΓΙΝΙΟΥ	5.213	1.498	5.264	1.511
ΑΝΑΤ. ΟΛΥΜΠΟΥ	7.854	2.465	9.374	2.629
ΔΙΟΥ	9.875	2.789	11.252	3.286
ΕΛΑΦΙΝΑΣ	5.703	1.457	5.213	1.332
ΚΟΛΙΝΔΡΟΥ	5.245	1.487	5.223	1.477
ΚΟΡΙΝΟΥ	5.757	1.622	6.611	1.839
ΛΙΤΟΧΩΡΟΥ	6.864	2.053	7.011	2.047
ΜΕΘΩΝΗΣ	3.717	1.028	3.946	1.077
ΠΑΡΑΛΙΑΣ	4.465	1.462	6.449	1.829
ΠΕΤΡΑΣ	6.066	1.689	6.246	1.742
ΠΙΕΡΙΩΝ	2.653	735	2.811	779
ΠΥΔΝΑΣ	4.678	1.313	4.012	1.082
ΣΥΝΟΛΟ	116.763	37.098	129.846	40.900

Πίνακας 6.1: Εκτίμηση Ποσοτήτων Αστικών Στερεών Αποβλήτων – ΑΣΑ Ν. Πιερίας

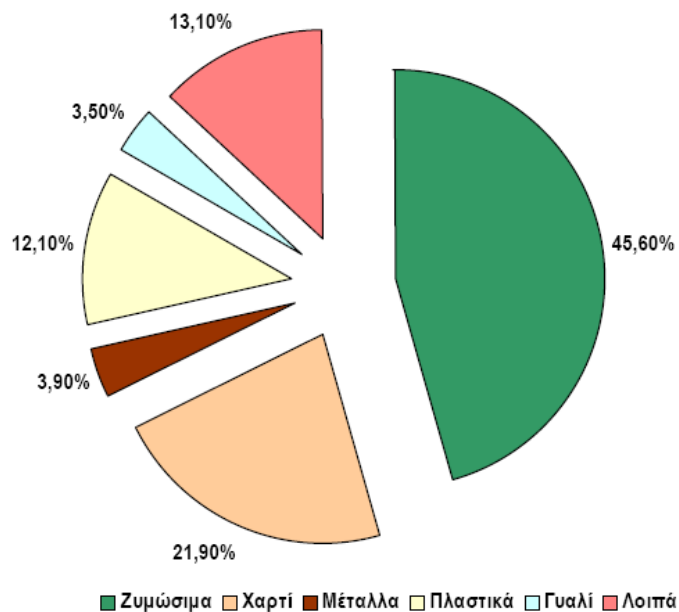
Στην προκειμένη μελέτη προβλέπεται η δημιουργία 2 διαχειριστικών ενοτήτων:

- 1η διαχειριστική ενότητα: οι ΟΤΑ που αποτελούν αυτή την ενότητα είναι οι δήμοι Αιγινίου, Κολινδρού, Πύδνας, Μεθώνης, Ελαφίνας, Κορινού,

Κατερίνης, Πιερίων και Παραλίας. Όλοι οι ΟΤΑ θα εξυπηρετούνται από το ΧΥΤΑ Κατερίνης, η επέκταση του οποίου αποτελεί έργο που χρηματοδοτείται από το Ταμείο Συνοχής II.

- 2η διαχειριστική ενότητα: οι ΟΤΑ που αποτελούν αυτή την ενότητα είναι οι δήμοι Λιτοχώρου, Δίου, Πέτρας και Ανατολικού Ολύμπου.

Επειδή η βιώσιμη δυναμικότητα μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης ΑΣΑ είναι οι 40.000 – 50.000 t/y , η προτεινόμενη μονάδα θα συμπεριλάβει τα ΑΣΑ και των δύο ενοτήτων. Η μέση σύσταση των ΑΣΑ του νομού θεωρείται ίδια με αυτήν της ΠΚΜ και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα [51].



Εικόνα 6.1: Μέση Σύσταση Απορριμμάτων Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας

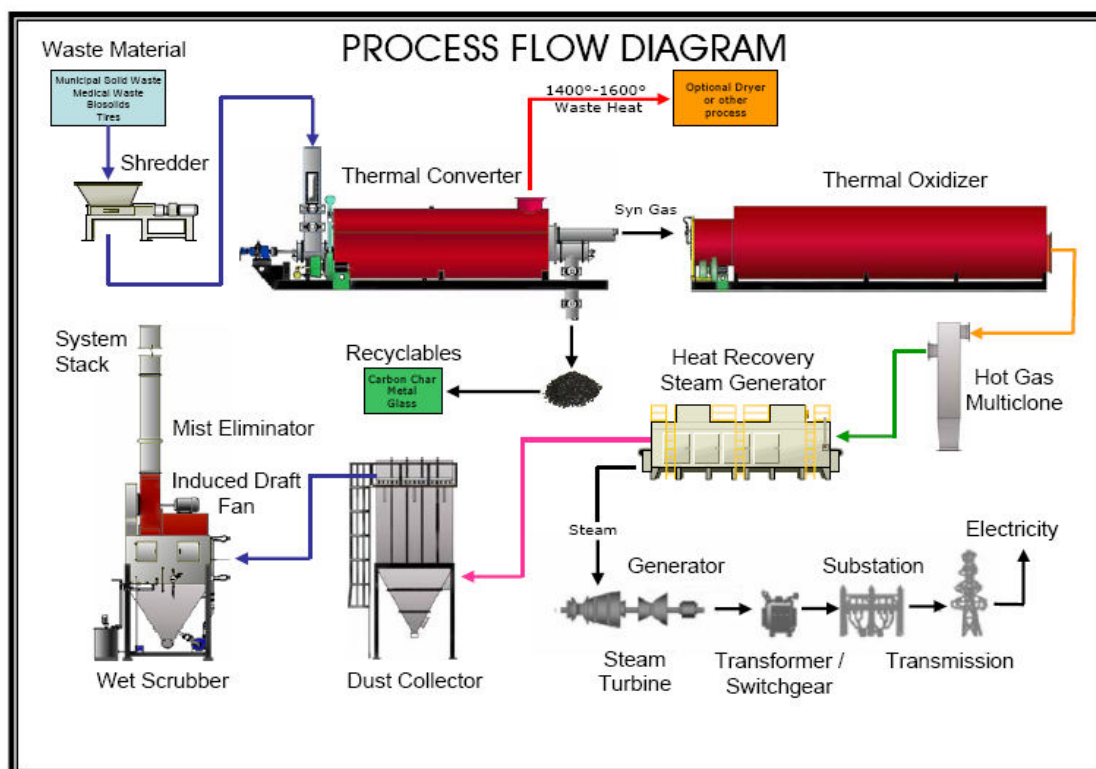
6.2. Προμελέτη εφαρμογής μονάδας πυρόλυσης

6.2.1. Περιγραφή μονάδας

Εξετάσθηκε για την περίπτωση της Πιερίας η εφαρμογή της πυρόλυσης ως μέθοδος ενεργειακής αξιοποίησης ΑΣΑ. Η Μονάδα της Πυρόλυσης (ΜΠ) βασίζεται σε σχετικά πρόσφατη τεχνολογία Αμερικανού προμηθευτή (IES), με πρώτη εμπορικής κλίμακας εφαρμογή στην Καλιφόρνια (μονάδα 8 t/d). Η μονάδα επεξεργάζεται

πλήρως όλο το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, και η ΜΜΔ πριν την πυρόλυση διαχωρίζει τα μέταλλα και το γυαλί. Περιλαμβάνει τα εξής τμήματα, σύμφωνα με το διάγραμμα ροής στην παρακάτω (Εικόνα 6.2.1.α):

1. Μονάδα Μηχανικού Διαχωρισμού μετάλλου και γυαλιού.
2. Τεμαχιστή ΑΣΑ.
3. Θερμικό μετατροπέα ΑΣΑ απουσία O₂ με ταυτόχρονη παραγωγή καυσίμου αερίου (syngas), θερμότητας (ατμός, θερμό νερό), και το μη καιγόμενο κλάσμα των ΑΣΑ (ανακυκλώσιμο στερεό υπόλειμμα).
4. Θερμικό οξειδωτή για την καύση του αερίου της πυρόλυσης.
5. Ατμολέβητα ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής υπέρθερμου ατμού (HRSG).
6. Μονάδα καθαρισμού απαερίων πριν της διάθεση τους στο περιβάλλον.
7. Μονάδα ηλεκτροπαραγωγής με ατμοστρόβιλο-ηλεκτρογεννήτρια, που μπορεί να μετατραπεί σε μονάδα ΣΗΘ, εφόσον αξιοποιηθεί η συμπαραγόμενη θερμότητα.



Εικόνα 6.2.1.α: Διάγραμμα ροής μονάδος πυρόλυσης της IES

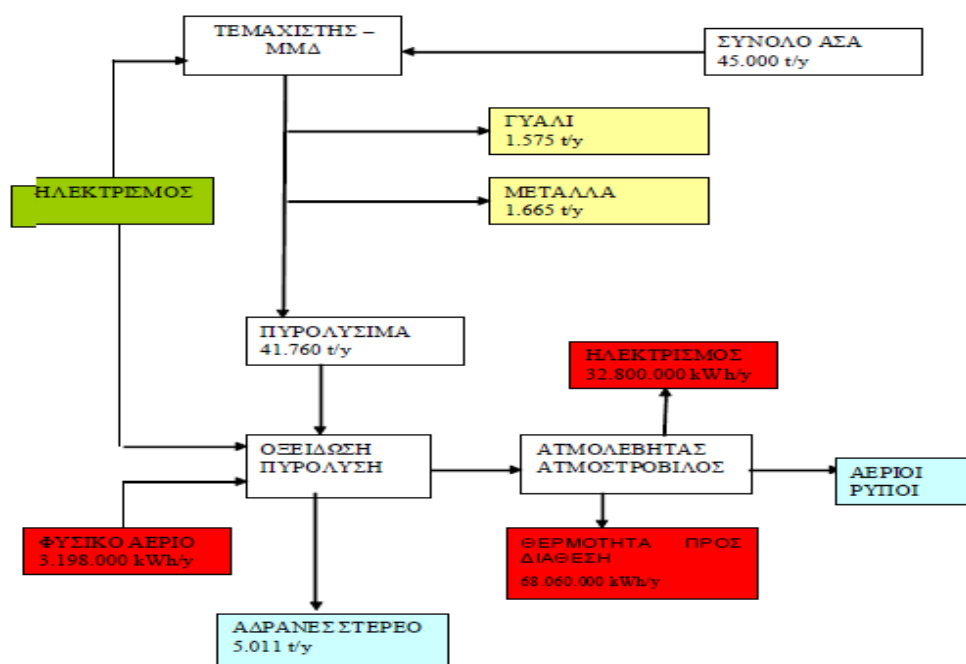
Η σχεδιαστική ποσότητα των ΑΣΑ Περίας ελήφθη και για την περίπτωση της μονάδας πυρόλυσης 45.000 t/y. Επειδή η τεχνολογία είναι σχετικά πρόσφατη δεν

κατέστη δυνατόν να πάρουμε αναλυτικά στοιχεία λειτουργίας. Η IES δίδει πάντως πλήρη στοιχεία και αναλύσεις για τα απαέρια που ελευθερώνονται στο περιβάλλον μετά τον καθαρισμό, που είναι εξαιρετικά χαμηλά, προέρχονται από πιστοποιημένες μετρήσεις και είναι συμβατές με τις αυστηρές προδιαγραφές της πολιτείας της Καλιφόρνια.

Η μονάδα πυρόλυσης έχει τα εξής γενικά χαρακτηριστικά:

- Ονομαστική δυναμικότητα ΑΣΑ 125 t/d (45.000 t/y)
- Ηλεκτρική ισχύς παραγόμενη: 4.000 kWel
- Θερμική ισχύς παραγόμενη: 8.300 kWth
- Απαίτηση καυσίμου φυσικού αερίου (στον θερμικό οξειδωτή): 390 kW
- Αέριοι ρύποι εκπεμπόμενοι: NOx 1,32 kg/t ΑΣΑ
- CO: 0,39 kg/t ΑΣΑ
- SOx: 0,017 kg/t ΑΣΑ
- Διοξίνες-φουράνια: $2,2 \cdot 10^{-11}$ kg/t ΑΣΑ
- Μείωση όγκου ΑΣΑ: μέχρι 92%

Στην παρακάτω εικόνα δίδεται το ισοζύγιο μάζας-ενέργειας της μονάδας πυρόλυσης με όσα στοιχεία ήταν διαθέσιμα.



Εικόνα 6.2.1.b: Ισοζύγιο μάζας-ενέργειας της μονάδας πυρόλυσης των ΑΣΑ Ν. Πιερίας

6.2.2. Οικονομική ανάλυση προτεινόμενης μονάδας

Το συνολικό προϋπολογιστικό κόστος της μονάδας πυρόλυσης για την Πιερία είναι 25.117.000 € συμπεριλαμβανομένης και της Μονάδας Μηχανικού Διαχωρισμού (ΜΜΔ) για μέταλλο και γυαλί. Όλα τα υπόλοιπα απόβλητα (πλαστικό, ξύλο, χαρτί, οργανικά κλπ) εισέρχονται στην μονάδα πυρόλυσης.

Στον παρακάτω πίνακα δίνεται η ανάλυση λειτουργικού κόστους-οφέλους της μονάδας πυρόλυσης χωρίς την ΜΜΔ. Το κόστος αποσυναρμολόγησης και διάθεσης της μονάδας πυρόλυσης μετά την 20ετία εκτιμάται σε 180.000 € συμπεριλαμβανομένων εσόδων – εξόδων.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΣΟΔΑ ΜΟΝΑΔΟΣ	€/y
έσοδα από πώληση ηλεκτρισμού	2.628.592
έσοδα από πώληση θερμότητας	
έσοδα από μη επεξεργασία ΑΣΑ	
έσοδα από επιδότηση ανακύκλωσης (ξύλο-πλαστικό-μέταλλο-χαρτί)	24.525
ΣΥΝΟΛΟ ΕΣΟΔΩΝ	2.653.117

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ ΜΟΝΑΔΟΣ	€/y
κόστος διάθεσης στερεού υπολείμματος	100.224
κόστος καυσίμου ΦΑ	137.375
κόστος συντήρησης & λειτουργίας	130.950
κόστος διοίκησης ΦΟΔΣΑ	0
1 υπομηχανικός - 1 βάρδια και 1 τεχνικό σε 3 βάρδιες	105.000
ΣΥΝΟΛΟ ΕΞΟΔΩΝ	473.549

Πίνακας 6.2.2: Ανάλυση λειτουργικού κόστους – οφέλους της μονάδας πυρόλυσης

ΑΣΑ Ν. Πιερίας

Οι παραδοχές του επιχειρηματικού σχεδίου που εξετάστηκε είναι:

1. τιμή πώλησης ηλεκτρισμού στον ΔΕΣΜΗΕ: 0,08014 €/kWhel
2. τιμή αγοράς ηλεκτρισμού από ΔΕΗ (τιμολόγιο Β1β): 0,040 €/kWhel
3. Κατώτερη θερμογόνος δύναμη CH₄: 10 kWh/Nm³
4. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας πυρόλυσης περιλαμβάνει το συνολικό κόστος.
5. Κόστος διοίκησης ΦΟΔΣΑ δεν λαμβάνεται υπόψη

6. Κόστος μεταφοράς του στερεού αδρανούς υπολείμματος της μονάδας πυρόλυσης (υλικό επικάλυψης) στον ΧΥΤΥ: 20 €/t
7. Θεωρούμε έσοδα μόνο από την **πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας** στο επιχειρηματικό σχέδιο, διότι η διάθεση της θερμότητας απαιτεί επιπλέον πάγιο κόστος δικτύου τηλεθέρμανσης, αφού η θέση της μονάδας πυρόλυσης στην Πιερία θα είναι αυτή του σημερινού ΧΥΤΑ.
8. Θεωρούμε επίσης έσοδα **από την επιδότηση ανακυκλώσιμου γυαλιού και μετάλλου** που εξέρχονται της ΜΜΔ, με τρέχουσες τιμές μονάδος της Ελληνικής Εταιρείας Αξιοποίησης Ανακύκλωσης (μέταλλα 10 €/t, γυαλί 5 €/t).
9. Για το αδρανές στερεό υπόλειμμα λαμβάνεται κόστος εισόδου για διάθεση του στον ΧΥΤΥ: 20 €/t.

Τα στοιχεία που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα δάνεια, τη φορολογία και τις αποσβέσεις είναι:

- Διάρκεια δανείου: 10 έτη
- Επιτόκιο δανεισμού: 6,2 %
- Συντελεστής φορολογίας: 29%
- Απόσβεση εξοπλισμού: 10% ανά έτος

Οι βασικές παράμετροι που υπολογίσαμε για το συγκεκριμένο επιχειρηματικό σχέδιο είναι οι εξής:

- Κέρδη προ φόρων, αποσβέσεων και αποπληρωμής δανείων-EBITDA-
- Αποπληρωμή των δανείων
- Αποσβέσεις
- Φόροι
- Καθαρά κέρδη

Βάση της μελέτης που έγινε κρίθηκε ότι η υλοποίηση του επιχειρηματικού σχεδίου μονάδας πυρόλυσης είναι αποδοτική, με λόγο EBITDA/σύνολο εξυπηρέτησης δανεισμού (DCSR - Debt-Service Coverage Ratio) περίπου 1,50 ήδη από τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του επιχειρηματικού σχεδίου και βαίνει αυξανόμενη με την αποπληρωμή του δανείου.

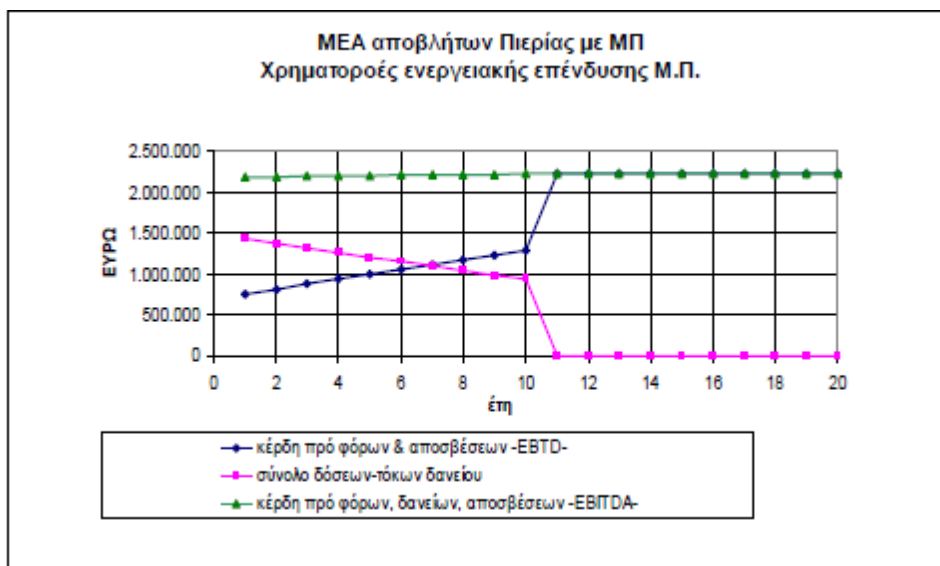
Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι συντελεστές, οι οποίοι προφανώς θα αλλάξουν τα μεγέθη των χρηματοροών χωρίς όμως να επηρεάσουν σημαντικά την εικόνα του επιχειρηματικού σχεδίου.

Το **δάνειο** λαμβάνεται με επιτόκιο 6,2% και αποπληρωμή σε 10 έτη με σταθερή δόση κεφαλαίου και φθίνουσα τόκων.

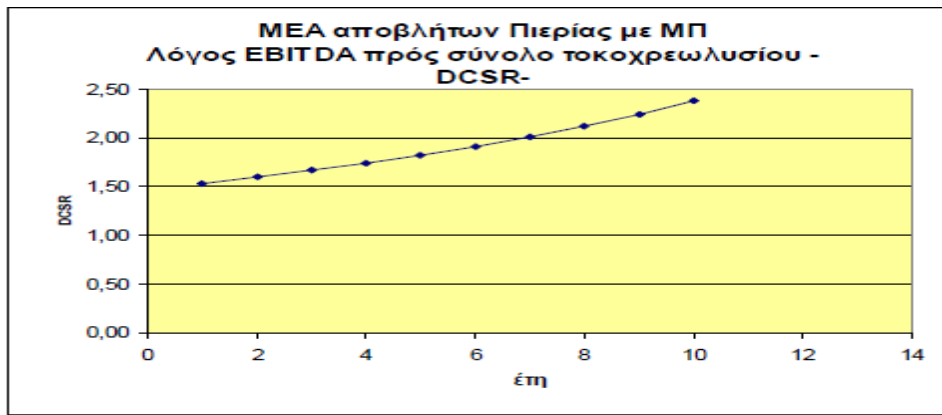
Η **επιδότηση** λαμβάνεται 40% επί του συνολικού κόστους της επένδυσης από τον αναπτυξιακό νόμο 3299/2004 όπως ισχύει σήμερα για την συγκεκριμένη επένδυση (παραγωγή ηλ. ενέργειας από βιομάζα) και περιοχή (Κ. Μακεδονία).

Η **απλή περίοδος αποπληρωμής** της ίδιας συμμετοχής που προκύπτει είναι περίπου 6,6 έτη.

Ο **εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)** των χρηματοροών από και προς τους μετόχους (μέρισμα + διαθέσιμα) ισούται με 3,40%.



Εικόνα 6.2.2.a : Χρηματοροές επιχειρηματικού σχεδίου μονάδας πυρόλυσης στην Πιερία



Εικόνα 6.2.2.b: Λόγος EBITDA προς τοκοχρεολύσιο επιχειρηματικού σχεδίου μονάδας πυρόλυσης στην Πιερία

6.3. Προμελέτη εφαρμογής μονάδας αναερόβιας ζύμωσης

6.3.1 Περιγραφή μονάδας

Η μονάδα περιλαμβάνει δύο τμήματα:

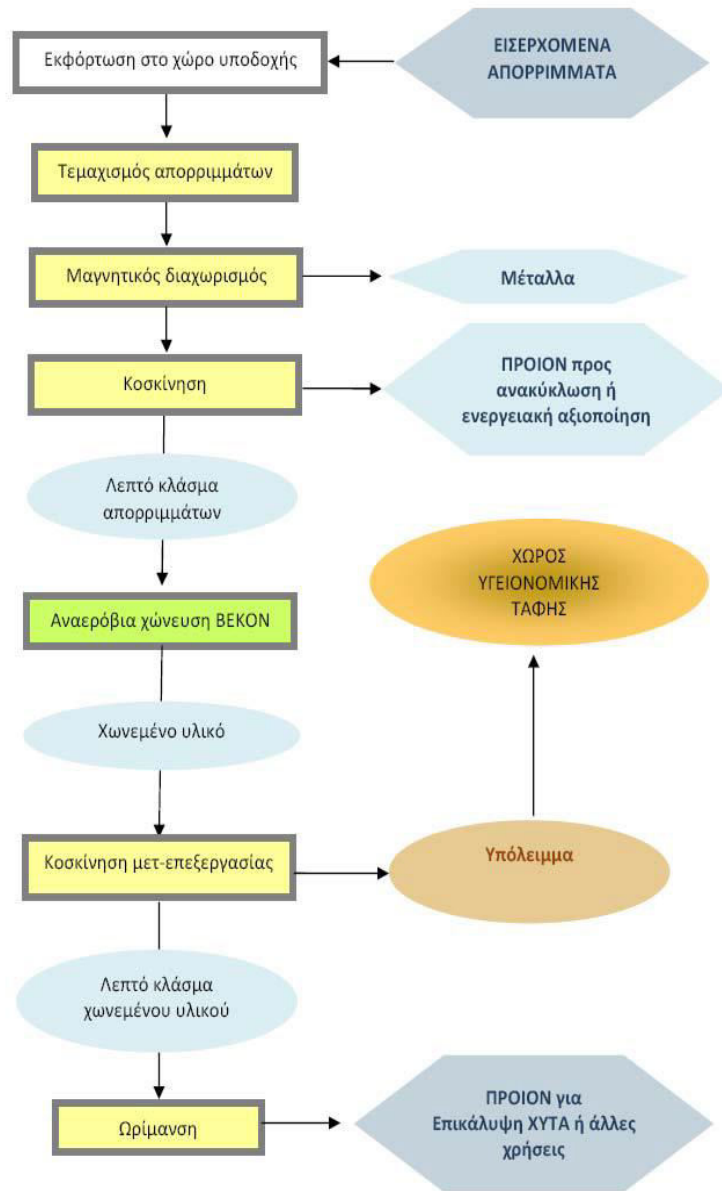
1. Πλήρη Μονάδα Μηχανικού Διαχωρισμού (ΜΜΔ) των ΑΣΑ σε ανακυκλώσιμα (χαρτί, μέταλλα, πλαστικό, γυαλί) και ζυμώσιμα.
2. Πλήρη μονάδα παραλαβής των ζυμώσιμων και εφαρμογής αναερόβιας ζύμωσης, παραγωγής βιοαερίου, καύσης του βιοαερίου σε μονάδα ΣΗΘ (Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού-Θερμότητας) και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που πωλείται στο δίκτυο και θερμικής ενέργειας με μορφή θερμού νερού, που είναι διαθέσιμη για πώληση ή απόρριψη στο περιβάλλον

Η σχεδιαστική ποσότητα των ΑΣΑ Πιερίας ελήφθη περίπου σε **45.000 t/y**. Η ποσότητα αυτή εισέρχεται στην ΜΜΔ (τμήμα 1), και με εφαρμογή της σύστασης της εικόνας 6.1, έχουμε έξοδο 20.520 t/y ζυμώσιμα που διαχωρίζονται και εισέρχονται στο τμήμα 2, για ξηρή αναερόβια ζύμωση (ΞΑΖ). Το τμήμα 2 περιλαμβάνει για την ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου 2 (δύο) μονάδες ΣΗΘ με τα εξής χαρακτηριστικά:

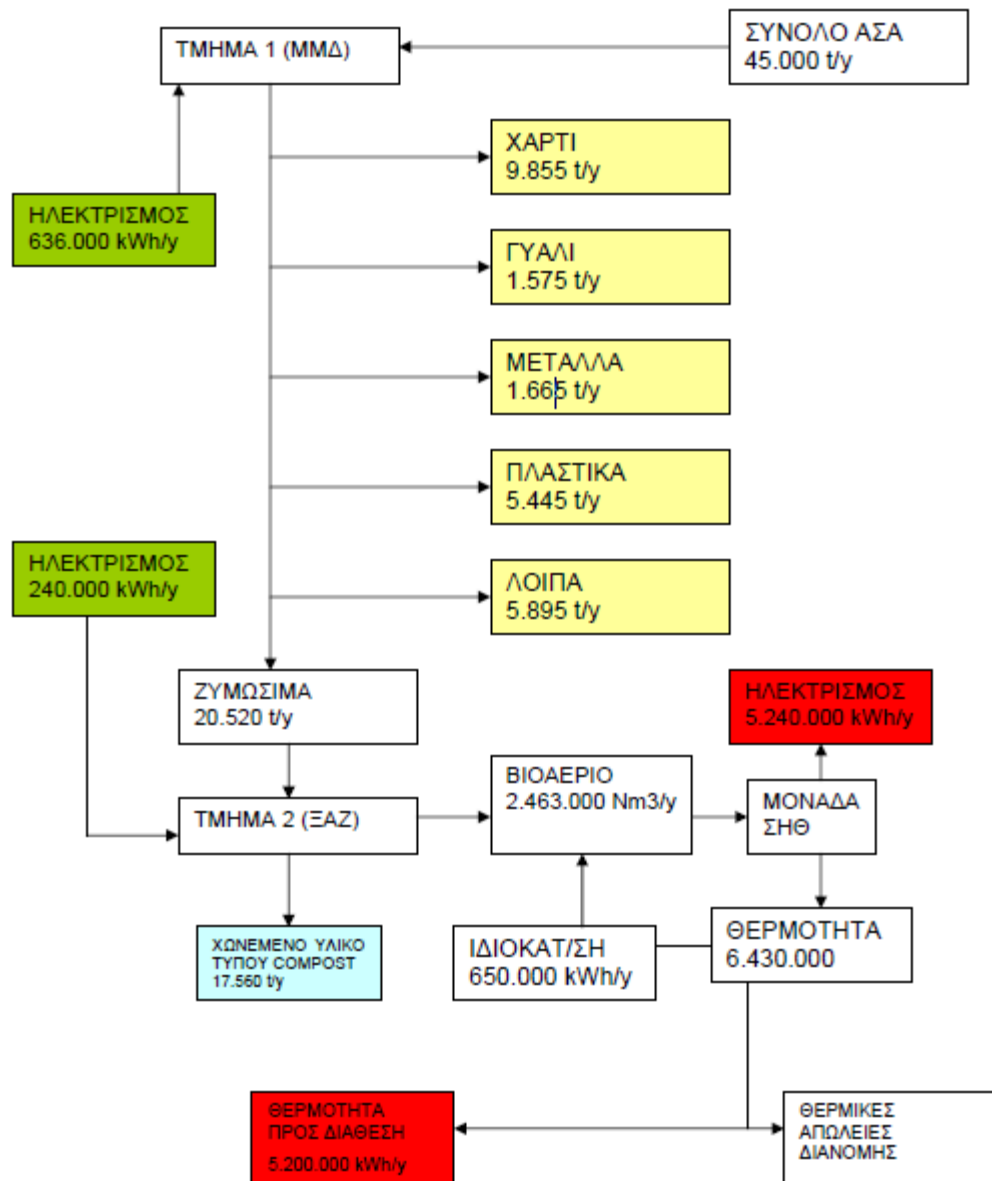
- Παραγόμενη Ηλεκτρική ισχύς ανά μονάδα: 330 kWel
- Συμπαραγόμενη Θερμική ισχύς ανά μονάδα: 405 kWth
- Θερμοκρασία θερμού νερού μεταφοράς (σε πλήρες φορτίο): 70/90 °C

- Κατανάλωση βιοαερίου / μονάδα (σε πλήρες φορτίο): 852 kW
- Περιεκτικότητα αερίων (related to 5% O₂) NO_x 500 mg/Nm³, CO 1,000 mg/Nm³ (ανοχή 5-8 %)
- Μείωση όγκου ΑΣΑ με την προϋπόθεση ανακύκλωσης: μέχρι 60%

Όλο το παραγόμενο βιοαέριο καταναλώνεται στις 2 μονάδες ΣΗΘ, χωρίς απαίτηση συμπληρωματικού καυσίμου. Η συμπαραγόμενη θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον με αερόψυκτους ψύκτες, δεδομένου ότι η χρήση της απαιτεί επιπλέον πάγιο κόστος για κατασκευή κατάλληλου δικτύου τηλεθέρμανσης από την θέση της ΜΕΑ των ΑΣΑ, μέχρι τους δυνητικούς καταναλωτές θερμότητας.



Εικόνα 6.3.1.α: Διάγραμμα ροής εφαρμογής ξηρής αναερόβιας ζύμωσης στην Πιερία



Εικόνα 6.3.1.β: Ισοζύγιο μάζας-ενέργειας μονάδος ξηρής αναερόβιας ζύμωσης στην Πιερία

6.3.2. Οικονομική ανάλυση προτεινόμενης μονάδας

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ανάλυση λειτουργικού κόστους-οφέλους της μονάδας.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΣΟΔΑ ΜΟΝΑΔΟΣ	€/y
έσοδα από πώληση ηλεκτρισμού	420.248
έσοδα από πώληση θερμότητας	0
έσοδα από μη επεξεργασία ΑΣΑ	0
έσοδα από επίδοτηση ανακύκλωσης (ξύλο-πλαστικό-μέταλλο-χαρτί)	826.290
ΣΥΝΟΛΟ ΕΣΟΔΩΝ	1.246.538

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ ΜΟΝΑΔΟΣ	€/y
κόστος διάθεσης στερεού compost	351.200
ηλεκ. Κατανάλωση Τμήμα 1	25.471
ηλεκ. Κατανάλωση Τμήμα 2	9.600
κόστος συντήρησης ΣΗΘ	52.412
1 υπομηχανικός και 2 τεχνικοί σε 1 βάρδια (ΞΑΖ)	80.000
1 τεχνικός σε 1 βάρδια (ΜΜΔ)	25.000
κόστος διοίκησης ΦΟΔΣΑ	0
ΣΥΝΟΛΟ ΕΞΟΔΩΝ	543.683

Πίνακας 6.3.2: Οικονομική ανάλυση λειτουργικού κόστους – οφέλους της ξηρής αναερόβιας ζύμωσης των ΑΣΑ Ν. Πιερίας

Τα δεδομένα διαμόρφωσης του λειτουργικού κόστους είναι:

1. Η ΜΜΔ της ΜΕΑ (τμήμα 1) δυναμικότητας 50-100 t/d, λειτουργεί όλο τον χρόνο πλην Κυριακών –αργιών (300 d/y) σε 2 βάρδιες των 8 ωρών εκάστη, και απαιτεί 1 τεχνικό ανά βάρδια.
2. Η μονάδα ΞΑΖ λειτουργεί όλο το έτος (365 d/y, 24 h/d) και απαιτεί 1 υπομηχανικό με ετήσιο κόστος 30.000 € και 2 τεχνικούς σε 1 βάρδια ο καθένας με ετήσιο κόστος 25.000 € ο καθένας.

Οι παραδοχές του επιχειρηματικού σχεδίου που εξετάστηκε είναι:

1. Τιμή πώλησης ηλεκτρισμού στον ΔΕΣΜΗΕ: 0,08014 €/kWhel, χωρίς ετήσια αναπροσαρμογή.
2. Τιμή αγοράς ηλεκτρισμού από ΔΕΗ (τιμολόγιο Β1β): 0,040 €/kWhel
3. Μέση παραγωγή βιοαερίου στην μονάδα ΞΑΖ: 120 Nm³/t

4. Μέση περιεκτικότητα σε CH₄ του βιοαερίου: 55%

5. Κατώτερη θερμογόνος δύναμη CH₄ : 10 kWh/Nm³

6. Βαθμός απόδοσης ΣΗΘ:

a. el – 38.7 %

b. therm – 47.5 %

c. total – 86.2 %

7. Κόστος συντήρησης μονάδων ΣΗΘ: 0,010 €/kWh_{el} παραγόμενη

8. Κόστος διοίκησης ΦΟΔΣΑ δεν λαμβάνεται υπόψη

9. Κόστος μεταφοράς του στερεού αδρανούς υπολείμματος της ξηρής αναερόβιας ζύμωσης (υλικό επικάλυψης) στον ΧΥΤΥ: 20 €/t

10. Θεωρούμε έσοδα μόνο **από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας** στο επιχειρηματικό σχέδιο, διότι η διάθεση της θερμότητας απαιτεί επιπλέον πάγιο κόστος δικτύου τηλεθέρμανσης, αφού η θέση της μονάδας στην Πιερία θα είναι αυτή του σημερινού ΧΥΤΑ. Θεωρούμε επίσης έσοδα **από την επιδότηση ανακυκλώσιμων υλικών** που εξέρχονται της ΜΜΔ, με τρέχουσες τιμές μονάδος της Ελληνικής Εταιρείας Αξιοποίησης Ανακύκλωσης (πλαστικό 127 €/t, μέταλλα 10 €/t, χαρτί-ξύλο 7 €/t, γυαλί 5 €/t).

11. Για το χωνευμένο στερεό υπόλειμμα λαμβάνεται κόστος εισόδου για διάθεση του στον ΧΥΤΥ: 20 €/t.

Οι βασικές παράμετροι που υπολογίσαμε για το συγκεκριμένο επιχειρηματικό σχέδιο είναι οι εξής:

- Κέρδη προ φόρων, αποσβέσεων και αποπληρωμής δανείων-EBITDA-
- Αποπληρωμή των δανείων
- Αποσβέσεις
- Φόροι
- Καθαρά κέρδη

Το κόστος αποσυναρμολόγησης και διάθεσης της μονάδας ξηρής αναερόβιας ζύμωσης μετά την 20ετία εκτιμάται σε 80.000 € συμπεριλαμβανομένων εσόδων – εξόδων.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι συντελεστές, οι οποίοι προφανώς θα αλλάξουν τα μεγέθη των χρηματορροών χωρίς όμως να επηρεάσουν σημαντικά την εικόνα του επιχειρηματικού σχεδίου.

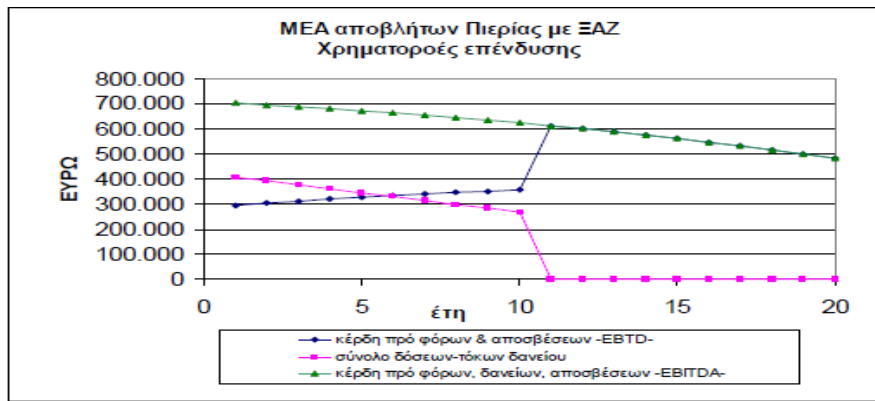
Το **δάνειο** λαμβάνεται με επιτόκιο 6,2% και αποπληρωμή σε 10 έτη με σταθερή δόση κεφαλαίου και φθίνουσα τόκων.

Η **επιδότηση** λαμβάνεται 40% επί του συνολικού κόστους της επένδυσης από τον αναπτυξιακό νόμο 3299/2004 όπως ισχύει σήμερα για την συγκεκριμένη επένδυση (παραγωγή ηλ. ενέργειας από βιομάζα) και περιοχή (Κ. Μακεδονία).

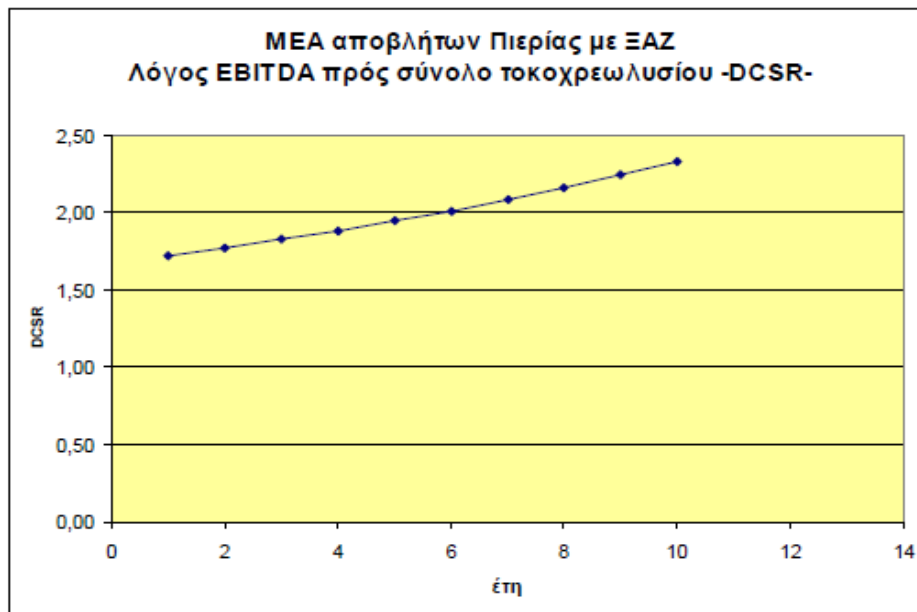
Η **απλή περίοδος αποπληρωμής** της ίδιας συμμετοχής που προκύπτει είναι περίπου 5,8 έτη.

Ο **εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)** των χρηματορροών από και προς τους μετόχους (μέρισμα + διαθέσιμα) ισούται με 4,96%.

Στην Εικόνα 6.3.2.a απεικονίζονται οι χρηματοροές της επένδυσης, σε ορίζοντα 20ετίας. Στην εικόνα 6.3.2.b απεικονίζεται ο λόγος EBITDA προς το σύνολο του τοκοχρεωλυσίου. Από τα στοιχεία του πίνακα φαίνεται ότι η υλοποίηση του επιχειρηματικού σχεδίου μονάδας ξηρής αναερόβιας ζύμωσης είναι αποδοτική, με λόγο EBITDA/σύνολο εξυπηρέτησης δανεισμού (DCSR - Debt-Service Coverage Ratio) περίπου 1,70 ήδη από τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του επιχειρηματικού σχεδίου και βαίνει αυξανόμενη με την αποπληρωμή του δανείου.



Εικόνα 6.3.2.a: Χρηματοροές επιχειρηματικού σχεδίου ξηρής αναερόβιας ζύμωσης στην Πιερία



Εικόνα 6.3.2.b: Λόγος EBITDA προς τοκοχρεολύσιο επιχειρηματικού σχεδίου ξηρής αναερόβιας ζύμωσης στην Πιερία

6.4. Συγκριτική αξιολόγηση μελετών εφαρμογής ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων για το Νομό Πιερίας

Από την σύγκριση εφαρμογής των δύο τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης ΑΣΑ (ξηρή αναερόβια ζύμωση και μονάδα πυρόλυσης) προκύπτουν:

1. Η τελική μείωση όγκου ΑΣΑ είναι μεγαλύτερη στην μονάδα πυρόλυσης (90%).

2. Ο απαιτούμενος χώρος εγκατάστασης του εξοπλισμού μαζί με χώρο στάθμευσης φορτηγών και υπόστεγο προσωρινής εναπόθεσης του στερεού υποπροϊόντος, είναι παρόμοιος (~5.000 m²).

3. Περιβαλλοντικά η μονάδα πυρόλυσης έχει ελάχιστα στερεά υπολείμματα και κυρίως αέρια με πολύ χαμηλές τιμές ρύπων. Η ξηρή αναερόβια ζύμωση έχει κυρίως στερεά υπολείμματα που μπορούν όμως να διατεθούν για επικάλυψη ΧΥΤΥ.

4. Ενεργειακά η μονάδα πυρόλυσης παράγει ηλεκτρισμό 32.800 MWh ενώ η μονάδα ξηρής αναερόβιας ζύμωσης 5.240 MWh, δεδομένου ότι ανακυκλώνει μεγάλο ποσοστό του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ. Σε περίπτωση μη αξιοποίησης των θερμικών όμως η μονάδα πυρόλυσης απορρίπτει πολύ μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας (68.000 MWh) έναντι της μονάδας ξηρής αναερόβιας ζύμωσης (5.200 MWh). Επίσης η μονάδα πυρόλυσης καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια σε φυσικό αέριο (3.200 MWh) και ηλεκτρισμό, έναντι της μονάδας ξηρής αναερόβιας ζύμωσης μόνο σε ηλεκτρισμό (876 MWh).

5. Οικονομικά η μονάδα πυρόλυσης κοστίζει 3,5 φορές περισσότερο (558 €/t/y) έναντι της ΞΑΖ (160 €/t/y), αλλά με τους ίδιους επιχειρηματικούς όρους παρουσιάζει μικρότερο IRR (3,40% η ΜΠ έναντι 4,96% της ΞΑΖ). Αυτό ,σημαίνει μεγαλύτερη ασφάλεια και χαμηλότερο ρίσκο.

6. Η μονάδα πυρόλυσης μπορεί να δεχθεί πάσης φύσεως απορρίμματα, όχι μόνο ΑΣΑ (βιομηχανικά, νοσοκομειακά, ελαστικά κλπ) λόγω των συνθηκών της πυρόλυσης, επομένως λύνει το θέμα «απόβλητα» συνολικά. Ακόμη και στην περίπτωση υψηλής περιεκτικότητας σε νερό υπάρχει η απορριπτόμενη θερμότητα διαθέσιμη για οικονομική προξήρανση πριν την πυρόλυση.

7. Και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στην διακύμανση της επιδότησης, είτε ανακύκλωσης είτε πάγιου εξοπλισμού. Πχ μία μείωση της επιδότησης του αναπτυξιακού νόμου από 40% σε 30% δίνει για την ΞΑΖ, 1,9% και την καθιστά μη βιώσιμη. Επίσης μία μείωση 50% στην επιδότηση ανακύκλωσης του πλαστικού δίνει αρνητικό IRR.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

- Η μονάδα πυρόλυσης ενδείκνυται όχι τόσο για ΑΣΑ όσο για άλλου τύπου οργανικά και επικίνδυνα απόβλητα που απαιτούν παράλληλα θερμική επεξεργασία (νοσοκομειακά, ελαστικά κλπ) και όπου δεν είναι δυνατή ή βιώσιμη η ανακύκλωση. Παράλληλα πρέπει να αξιοποιηθεί και ποσοστό 70-80% της συμπαραγόμενης θερμικής ενέργειας (68.000MWh) για βελτίωση της βιωσιμότητας της.
- Η ξηρή αναερόβια ζύμωση είναι προτιμότερη για τα ΑΣΑ και ειδικά για την περιοχή της Κ. Μακεδονίας. Η αξιοποίηση της συμπαραγόμενης θερμότητας έχει δευτερεύουσα σημασία οικονομικά, λόγω μικρότερης ποσότητας από την μονάδα πυρόλυσης (5.200 MWh) και γιατί απαιτεί επιπλέον πάγιο κόστος και δημιουργία νέας αγοράς.

Συμπεράσματα

Στη μελέτη που προηγήθηκε, παρουσιάστηκαν με λεπτομέρεια όλοι τρόποι ενεργειακής αξιοποίησης των απορριμμάτων με ιδιαίτερη έμφαση στην μέθοδο της πυρόλυσης.

Ωστόσο, δεν θα μπορούσαμε να καταλήξουμε σε ένα συμπέρασμα γενικής εφαρμογής και να χαρακτηρίσουμε κάποια από τις μεθόδους ως περισσότερο αποτελεσματική. Και αυτό συμβαίνει, για τον πολύ απλό λόγο, ότι η επιλογή του τρόπου διαχείρισης των απορριμμάτων διαφέρει σε κάθε περίπτωση. Η σωστή επιλογή εξαρτάται από τις συνθήκες της περιοχής, καθώς και από την σύνθεση και το ενεργειακό περιεχόμενο των παραγόμενων απορριμμάτων, το οποίο μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή

Αναμφισβήτητα, όλες οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν έχουν μειονεκτήματα, και μάλιστα πολλές φορές, σημαντικά. Γι' αυτό, θα πρέπει ο πρωταρχικός στόχος να είναι μείωση των απορριμμάτων, μέσω της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης των υλικών. Η επεξεργασία θα πρέπει να περιορίζεται στα αναπόφευκτα απορρίμματα.

Τέλος, θα αναφέρω το πιο σημαντικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει κανείς μέσα από αυτή την εργασία. Μέσα από τη μελέτη της, λοιπόν, αποδεικνύεται ότι τα απορρίμματα μπορούν, με την κατάλληλη διαχείριση, να αποτελέσουν σημαντική πηγή ενέργειας και έτσι πρέπει να αντιμετωπίζονται. Στη σύγχρονη κοινωνία όπου ο ρυθμός εξάντλησης των φυσικών πόρων αυξάνεται συνεχώς, τα απορρίμματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας μπορούμε πλέον να πάρουμε ενέργεια από κάτι που μέχρι πρότινος θεωρούσαμε άχρηστο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Alibardi L., Cossu R., 2006. Biological hydrogen production from organic waste and biomass. Proceedings Venice 2006, Biomass and Waste to Energy Symposium, Venice, Italy, 29 November-1 December
- [2] Favoino E. (2001), "Optimisation of schemes for source separation of compostable waste considering the locally most suitable technique". Στο: Κ. Λαζαρίδη & Κ. Παυλόπουλος (επιμ.), "Ολοκληρωμένη Διαχείριση Οργανικών Αποβλήτων και Υπολειμμάτων", Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- [3] Bilitewski B. (2006), Pyrolysis, Gasification and Plasma Technologies, Proceedings Venice 2006: Biomass and waste to energy symposium, Italy.
- [4] Alibardi L. and Cossu R. (2006), Energy from wastes and biomasses: opportunities and state of the art, Proceedings Venice 2006: Biomass and waste to energy symposium, Italy.
- [5] Slater B. (2008), Briefing Pyrolysis, gasification and plasma, Friends of the Earth, September.
- [6] Aho, A., Salmi, T. & Murzin, D. Y. in *The Role of Catalysis for the Sustainable Production of Bio-fuels and Bio-chemicals* (eds Kostas S. Triantafyllidis, Angelos A. Lappas, & Michael Stöcker) 137-159 (Elsevier, 2013).
- [7] Bridgwater, A. V., Meier, D. & Radlein, D., An overview of fast pyrolysis of biomass, *Organic Geochemistry*, **30**, 1479-1493, (1999).
- [8] Huber, G. W., Iborra, S. & Corma, A., Synthesis of Transportation Fuels from Biomass: Chemistry, Catalysts, and Engineering, *Chemical Reviews*, **106**, 4044-4098, (2006).
- [9] Mohan, D., Pittman, C. U. & Steele, P. H., Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review, *Energy & Fuels*, **20**, 848-889, (2006).
- [10] Aho, A., Kumar, N., Eränen, K. *et al.*, Catalytic pyrolysis of woody biomass in a fluidized bed reactor: Influence of the zeolite structure, *Fuel*, **87**, 2493-2501, (2008).
- [11] Aho, A., Kumar, N., Lashkul, A. V. *et al.*, Catalytic upgrading of woody biomass derived pyrolysis vapours over iron modified zeolites in a dual-fluidized bed reactor, *Fuel*, **89**, 1992-2000, (2010).

- [12] He, F., Yi, W. & Bai, X., Investigation on caloric requirement of biomass pyrolysis using TG–DSC analyzer, *Energy Conversion and Management*, **47**, 2461-2469, (2006).
- [13] Mohan, D., Pittman, C. U. & Steele, P. H., Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review, *Energy & Fuels*, **20**, 848-889, (2006).
- [14] Goyal, H. B., Seal, D. & Saxena, R. C., Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 504-517, (2008).
- [15] Yang, H., Yan, R., Chen, H. *et al.*, In-Depth Investigation of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components: Hemicellulose, Cellulose and Lignin, *Energy & Fuels*, **20**, 388-393, (2005).
- [16] Koukios, E. in *Advances in Thermochemical Biomass Conversion* (ed A. V. Bridgwater) Ch. 136, 1678-1692 (Springer Netherlands, 1993).
- [17] Lu, Q., Li, W.-Z. & Zhu, X.-F., Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils, *Energy Conversion and Management*, **50**, 1376-1383, (2009).
- [18] Lédé, J., Broust, F., Ndiaye, F.-T. *et al.*, Properties of bio-oils produced by biomass fast pyrolysis in a cyclone reactor, *Fuel*, **86**, 1800-1810, (2007).
- [19] Bulushev, D. A. & Ross, J. R. H., Catalysis for conversion of biomass to fuels via pyrolysis and gasification: A review, *Catalysis Today*, **171**, 1-13, (2011).
- [20] Mortensen, P. M., Grunwaldt, J. D., Jensen, P. A. *et al.*, A review of catalytic upgrading of bio-oil to engine fuels, *Applied Catalysis A: General*, **407**, 1-19, (2011).
- [21] Mihalcik, D. J., Mullen, C. A. & Boateng, A. A., Screening acidic zeolites for catalytic fast pyrolysis of biomass and its components, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **92**, 224-232, (2011).
- [22] Stephanidis, S., Nitsos, C., Kalogiannis, K. *et al.*, Catalytic upgrading of lignocellulosic biomass pyrolysis vapours: Effect of hydrothermal pre-treatment of biomass, *Catalysis Today*, **167**, 37-45, (2011).
- [23] Huber, G. W. & Corma, A., Synergies between Bio- and Oil Refineries for the Production of Fuels from Biomass, *Angewandte Chemie International Edition*, **46**, 7184-7201, (2007).
- [24] Torri, C., Fabbri, D., Garcia-Alba, L. *et al.*, Upgrading of oils derived from hydrothermal treatment of microalgae by catalytic cracking over H-ZSM-5: A comparative Py–GC–MS study, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **101**, 28-34, (2013).

- [25] Ma, Z., Troussard, E. & van Bokhoven, J. A., Controlling the selectivity to chemicals from lignin via catalytic fast pyrolysis, *Applied Catalysis A: General*, **423–424**, 130-136, (2012).
- [26] Λάλας Δ., Γεωργοπούλου Ε., Γιδαράκος Ε., Γκέκας Ρ., Λαζαρίδη Α., Μαυρόπουλος Α., Μοιρασγεντής Σ. και Σελλάς Ν. (2007), Εκτίμηση των γενικευμένων επιπτώσεων και κόστους διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης, Τελική έκθεση, Απρίλιος, Αθήνα.
- [27] Vehlow J. (2006), State of the art of incineration technologies, Proceedings Venice 2006: Biomass and waste to energy symposium.
- [28] McDougall F., White P., Franke M. and Hindle P. (2001), *Integrated Solid Wastes Management: A Life Cycle Inventory*. Blackwell Publishing.
- [29] Θεοχάρη Χ., Αραβώσης Κ., Βαρελίδης Π., Διαβάτης Η., Ζιώγας Χ., Ιατρού Σ., Μπούρκα Α.Α., Οικονομόπουλος Α., Παπαγρηγορίου Σ., Παντελάρας Π. και Φραντζής Ι. (2006), Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων στην Ελλάδα / Η περίπτωση της Αττικής, Ομάδα εργασίας ΤΕΕ, Τελική έκθεση, Αθήνα, Νοέμβριος.
- [30] Καλογήρου Ε. (2009), Το Πρόβλημα Και Η Λύση Της Διαχείρισης Των Απορριμμάτων Της Αττικής, 3ο Διεθνές συνέδριο ΕΕΔΣΑ, 30-31 Οκτωβρίου, Αθήνα.
- [31] Hogg D. (2002), Costs for Municipal Waste Management in the EU, Final Report to Directorate General Environment, European Commission.
- [32] Ψωμάς Σ. (2005), Καύση αποβλήτων, ακριβή- αναποτελεσματική - επικίνδυνη, Έκθεση του Ελληνικού γραφείου της Greenpeace.
- [33] Kalogirou E. (2008), Waste to Energy, WTERT 2008 Bi-Annual Meeting at Columbia University, NY, OCTOBER 16 & 17.
- [34] European Commission (2003), Refuse Derived Fuel, current practice and perspectives, final report.
- [35] Japanese Advanced Environment Equipment (2008), MHI Refuse Derived Fuel Manufacturing Plant, http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_2/html/Doc_398.html
- [36] Diaz L.F. and Savage G.M. (1996), Pretreatment Options for Waste-to-Energy Facilities, Solid Waste Management: Thermal Treatment & Waste-to-Energy Technologies, VIP-53, Proceedings of International Technologies Conference, Washington, DC, USA, April.

- [37] Diaz L.F. and Savage G.M. (2006), Production and quality of Refuse Derived Fuel (RDF), Proceedings Venice 2006, Biomass and Waste to Energy Symposium, Italy.
- [38] Bilitewski B. (2007), Incineration of Refuse Derived Fuel – Development, Problems and Chances, Proceedings First International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE), Skiathos island, Greece, June 24–28.
- [39] Παπαγεωργίου Δ., Θεολόγος Φ., Τέας Χ. και Χανιωτάκης Ε. (2007), Εναλλακτικά καύσιμα στην παραγωγή τσιμέντου, Πρακτικά Ημερίδας ΤΕΕ Εναλλακτικές πρώτες ύλες και καύσιμα στη βιομηχανία του τσιμέντου, Αθήνα, Σεπτέμβριος.
- [40] ΕΠΕΜ ΑΕ, ΠΕΡΜΕΛ ΕΠΕ, Ναούμ Ν., Ψαλτίδου Μαλλιαρού Ν., Φουντούλης Κ., Καρκαζή Α. και Κοντελέ Ε. (2008), Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων ολοκληρωμένης εγκατάστασης επεξεργασίας και διάθεσης απορριμμάτων (ΟΕΕΔΑ) Νοτιοανατολικής ενότητας Ν. Θεσσαλονίκης, Σεπτέμβριος.
- [41] Φάττα Δ. (2007), Επεξεργασία αστικών στερεών αποβλήτων, Σημειώσεις μαθήματος «Εισαγωγή στη Μηχανική Περιβάλλοντος», τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου.
- [42] Slater B. (2008), Briefing Pyrolysis, gasification and plasma, Friends of the Earth, September.
- [43] Fichtner Consulting Engineers Ltd (2004), The Viability of Advanced Thermal Treatment of MSW in the UK.
- [44] Papadopoulos, A., Karagiannidis, A., 2008. Application of the multi-criteria analysis method Electre III for the optimisation of decentralised energy systems. Omega 36, 766–776.
- [45] AEA, 2001. *Waste Management Options and Climate Change*, Final Report to European Commission, DG Environment, Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities.
- [46] Roy B., 1996, *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*, Kluwer, Dordrecht.
- [47] EEA, 2003. Assessment of information related to waste and material flows, a catalogue of methods and tools. Technical Report 96, European Environment Agency, Project Manager, Dimitrios Tsotsos, European Topic Centre on Waste and Material Flows, Copenhagen, Denmark.

- [48] Rogers, M., Bruen, M., 2000. Using Electre III to choose the best route option for the Dublin Port Motorway, proceedings of the ASCE. Journal of Transportation Engineering 126 (4), 313–323.
- [49] Hokkanen, J., Salminen, P., 1997. Choosing a solid waste management system using multi criteria decision analysis. European Journal of Operational Research 98, 19–36.
- [50] Karagiannidis and Moussiopoulos, 1997, Perkoulidis et al., 1999, Perkoulidis et al., 2000, Karagiannidis et al., 2003
- [51] ΠΕΣΔΑ (2006), Περιφερειακό Σχέδιο Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων Περιφέρειας Κ. Μακεδονίας, όπως εγκρίθηκε από την ΠΚΜ στις 22-12-2005 και τροποποιήθηκε στις 29-3-2006.