



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΛΑΙΟΥ ΜΕ ΤΑΧΕΙΑ ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ



Διπλωματική Εργασία : Παππή Ιωάννη

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ.Δ.ΣΑΧΑΡΙΔΗΣ



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 12831/1
Ημερ. Εισ.: 08-09-2014
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2014
ΠΑΠ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ανδρίτσος Νικόλαος, Καθηγητής

Παντελής Δημήτρης, Επίκουρος Καθηγητής

Σαχαρίδης Γεώργιος, Λέκτορας (επιβλέπων καθηγητής)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της τεχνολογίας της πυρόλυσης βιομάζας για παραγωγή υγρού βιοέλαιου προϊόντος και η εγκατάσταση ενός κατάλληλου δικτύου διανομής μέσω της ελαχιστοποίησης του κόστους. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική επισκόπηση της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας (Κεφάλαιο 1). Γίνεται αναφορά στη βιομάζα, ως πρώτη ύλη της πυρόλυσης, στα είδη επεξεργασίας τα οποία υφίσταται καθώς επίσης και στα τεχνικά στάδια της εν λόγω τεχνολογίας. Παράλληλα αναλύονται οι διάφοροι αντιδραστήρες οι οποίοι είναι κατάλληλοι για τη παραγωγή βιοελαίου. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση των βασικών ιδιοτήτων του παραγόμενου βιοελαίου, της χημικής του σύστασης καθώς επίσης και της ικανότητας αποθήκευσης του (Κεφάλαιο 2). Επίσης, παρουσιάζονται οι επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου και οι απαραίτητες προδιαγραφές που οφείλει να έχει προκειμένου να καταστεί ως εναλλακτικό καύσιμο. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τη περιγραφή ενός μαθηματικού μοντέλου μιας γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας βιοκαυσίμων(Κεφάλαιο 3). Αναλύεται τόσο σε ετήσια κλίμακα όσο και για πολλαπλές χρονικές περιόδους. Παράλληλα παρουσιάζεται η μικτή-ακέραια γραμμική μοντελοποίηση με την οποία επιλύουμε το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους διανομής του βιοκαυσίμου στις διάφορες τοποθεσίες ζήτησης. Στη συνέχεια, (Κεφάλαιο 4) παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα και οι μέθοδοι επίλυσης τους για τα διάφορα σενάρια εφαρμογής της εφοδιαστικής αλυσίδας που έχουν σαν στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους. Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5) γίνεται η σύγκριση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του μοντέλου της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας Κο. Γεώργιο Κ.Δ.Σαχαρίδη, λέκτορα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την βοήθεια, τις γνώσεις, την παρότρυνση αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή Κο. Βασάλο Ιάκωβο, καθηγητή του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (1979-2005) και ομότιμο ερευνητή του ΕΚΕΤΑ για τις γνώσεις και τη βοήθεια στη κατανόηση της τεχνολογίας της πυρόλυσης βιομάζας.

Ακόμη, ευχαριστώ όλους τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ πάρα πολύ τους γονείς μου που με μεγάλωσαν με πολύ αγάπη και φρόντισαν πάντοτε να είναι δίπλα μου έτσι ώστε να μπορώ να επιτυγχάνω τους στόχους μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ | 2 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 4 |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 6 |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ | 8 |
| ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ | 10 |
| ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ | 10 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 11 |
| 1 ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ | 13 |
| 1.1 Εισαγωγή | 13 |
| 1.2 Βιομάζα | 13 |
| 1.2.1 Προετοιμασία τροφοδοσίας βιομάζας | 13 |
| 1.3 Διεργασία της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας | 16 |
| 1.3.1 Η χημεία της πυρόλυσης | 17 |
| 1.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων πυρόλυσης βιομάζας | 18 |
| 1.4 Επίλογος..... | 28 |
| 2 ΒΙΟΕΛΑΙΟ..... | 29 |
| 2.1 Εισαγωγή | 29 |
| 2.2 Ορισμός | 29 |
| 2.3 Χημική σύσταση του βιοελαίου | 30 |
| 2.4 Ικανότητα αποθήκευσης του βιοελαίου (σταθερότητα) | 32 |
| 2.5 Χρήσεις βιοελαίου..... | 33 |
| 2.6 Προδιαγραφές βιοελαίου..... | 35 |
| 2.7 Επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία | 37 |
| 2.8 Προτάσεις αναβάθμισης του βιοελαίου..... | 38 |
| 2.9 Επίλογος..... | 39 |
| 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 40 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Εισαγωγή | 40 |
| 3.2 | Σημασία της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας..... | 40 |
| 3.3 | Περιγραφή του Μοντέλου | 41 |
| 3.4 | Μοντελοποίηση Ετήσιου Προβλήματος | 44 |
| 3.4.1 | Περιορισμοί Ετήσιου Μοντέλου | 45 |
| 3.4.2 | Αντικειμενική Συνάρτηση | 47 |
| 3.5 | Μοντελοποίηση Προβλήματος Πολλαπλών Χρονικά Περιόδων..... | 49 |
| 3.5.1 | Περιορισμοί Μοντέλου Πολλαπλών Περιόδων | 50 |
| 3.5.2 | Αντικειμενική Συνάρτηση | 53 |
| 3.6 | Επίλογος | 54 |
| 4 | ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 55 |
| 4.1 | Εισαγωγή | 55 |
| 4.2 | Μέθοδοι Επίλυσης..... | 55 |
| 4.3 | Αριθμητικό Παράδειγμα..... | 56 |
| 4.3.1 | Περιγραφή πρώτου αριθμητικού παραδείγματος..... | 57 |
| 4.3.2 | Περιγραφή δεύτερου αριθμητικού παραδείγματος..... | 57 |
| 4.4 | Αριθμητικά Αποτελέσματα | 57 |
| 4.4.1 | Αποτελέσματα πρώτου αριθμητικού παραδείγματος | 58 |
| 4.4.2 | Αποτελέσματα δεύτερου αριθμητικού παραδείγματος..... | 60 |
| 4.5 | Επίλογος | 63 |
| 5 | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 64 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 64 |
| 5.2 | Σύγκριση και Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων | 64 |
| 5.3 | Επίλογος | 65 |
| 6 | ΕΠΙΛΟΓΟΣ | 66 |
| 7 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 67 |

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1: Σύγκριση πυκνότητας μάζας και ενέργειας βιομάζας και βιοελαίου..... | 12 |
| Εικόνα 2 : Συλλογή βιομάζας σε μπάλες..... | 15 |
| Εικόνα 3 : Σύστημα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης | 20 |
| Εικόνα 4 : Σύστημα ρευστοστερεάς κλίνης..... | 22 |
| Εικόνα 5 : Σύστημα αφαιρετικής πυρόλυσης..... | 23 |
| Εικόνα 6: Σύστημα πυρόλυσης σε κενό | 25 |
| Εικόνα 7: Σύστημα πυρόλυσης περιστρεφόμενου κώνου | 27 |
| Εικόνα 8 : Βιοέλαιο | 30 |
| Εικόνα 9 : Χρήσεις βιοελαίου | 34 |
| Εικόνα 10 : Αλυσίδα εφοδιασμού βιομάζας για παραγωγή και διανομή βιοκαυσίμων | 44 |
| Εικόνα 11 : Εφοδιαστική αλυσίδα βιοκαυσίμων..... | 45 |
| Εικόνα 12 : Μοντέλο πολλαπλών περιόδων παραγωγής και διανομής βιοκαυσίμων..... | 49 |

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|----|
| Πίνακας 1 : Κυριότεροι παράμετροι πυρόλυσης..... | 16 |
| Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά αντιδραστήρων παραγωγής βιοελαίου | 28 |
| Πίνακας 3 : Ιδιότητες βιοελαίου από διάφορες πρώτες ύλες | 32 |
| Πίνακας 4 : Προτεινόμενες προδιαγραφές για διάφορες κατηγορίες βιοελαίου..... | 36 |
| Πίνακας 5 : Ονοματολογία δεικτών, δεδομένων, παραμέτρων και μεταβλητών | 44 |
| Πίνακας 6 : Ροή ποσοτήτων από τις τοποθεσίες βιομάζας στα βιοδιυλιστήρια..... | 58 |
| Πίνακας 7 : Ροή ποσοτήτων από τα βιοδιυλιστήρια προς τους πελάτες..... | 59 |
| Πίνακας 8 : Ροή ποσοτήτων από τις τοποθεσίες βιομάζας στα βιοδιυλιστήρια..... | 61 |
| Πίνακας 9 : Ροή ποσοτήτων από τα βιοδιυλιστήρια προς τους πελάτες..... | 62 |

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| Γράφημα 1 : Σχηματική αναπαράσταση τοποθεσιών βιομάζας-βιοδιυλιστηρίων | 59 |
| Γράφημα 2 : Σχηματική αναπαράσταση βιοδιυλιστηρίων – πελατών | 60 |
| Γράφημα 3 : Σχηματική αναπαράσταση τοποθεσιών βιομάζας-βιοδιυλιστηρίων | 61 |
| Γράφημα 4 : Σχηματική αναπαράσταση βιοδιυλιστηρίων – πελατών | 62 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

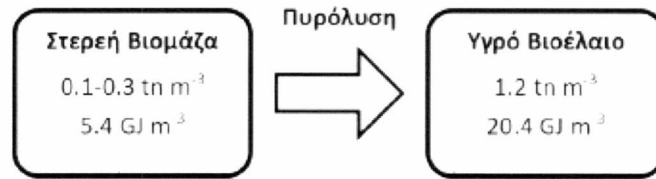
Η ραγδαία αύξηση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο) για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των καυσίμων κίνησης, έκαναν ορατό το κίνδυνο έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων ικανών να καλύψουν τις ανάγκες της ανθρωπότητας τα επόμενα χρόνια. Παράλληλα, άρχισαν να γίνονται εμφανής και οι αρνητικές συνέπειες της χρήσης τους, όπως είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μέσω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (CO₂ και CH₄) καθώς και η ρύπανση που προκαλείται από τις εκπομπές τους στο περιβάλλον (NO_x και SO_x).

Οι παραπάνω κυρίως λόγοι, ώθησαν τον άνθρωπο στην εύρεση-αναζήτηση νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και στο σχεδιασμό τεχνολογιών για την κατάλληλη αξιοποίηση τους. Ορισμένες από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροηλεκτρική και η ενέργεια από βιομάζα. Η ανανεωσιμότητα της ενέργειας από βιομάζα οφείλεται στην ηλιακή ενέργεια που είναι δεσμευμένη στους ιστούς των φυτών μέσω της φωτοσύνθεσης.

Η ενέργεια από βιομάζα παρέχει το 14% της παγκόσμιας ενέργειας που παράγεται από πρωτογενής ύλης, ωστόσο οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση της παραμένουν ως ένα μεγάλο βαθμό αναποτελεσματικές. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η στερεά βιομάζα χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και επομένως δεν μπορεί να προσφέρει μεγάλες αποδόσεις. Ωστόσο, η μετατροπή της βιομάζας από στερεή σε υγρή μορφή μπορεί να προσφέρει προϊόντα υψηλότερων ενεργειακών αποδόσεων. Η διαδικασία αυτή, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω θερμικών ή θερμοχημικών διεργασιών όπως αυτή της καύσης, της αεριοποίησης και της πυρόλυσης. Με τον όρο πυρόλυση βιομάζας εννοούμε τη θέρμανση υλικών φυτικής ή ζωικής προέλευσης σε υψηλή θερμοκρασία απουσία οξυγόνου. Η πυρόλυση με βάση ορισμένους παραμέτρους (τύπος αντιδραστήρα, χρόνος παραμονής, ρυθμός θέρμανσης, θερμοκρασία, κύριο προϊόν) διακρίνεται στη διεργασία της ανθρακοποίησης, της αργής πυρόλυσης και της ταχείας πυρόλυσης. Από τις παραπάνω μεθόδους αυτή που ξεχωρίζει είναι η ταχεία πυρόλυση διότι παράγει μεγάλες ποσότητες βιοελαίου (75% κ.β βιομάζας). Με την αντίδραση της πυρόλυσης η βιομάζα αποσυντίθεται σε στερεά, υγρά και αέρια προϊόντα. Τα τελευταία χρόνια, γίνεται προσπάθεια βελτιστοποίησης της πυρόλυσης, μέσω της διαδικασίας της ταχείας πυρόλυσης για τη μεγιστοποίηση των προϊόντων της υγρής φάσης που περιγράφονται με τον όρο βιοέλαιο. Το βιοέλαιο αποτελεί ένα προϊόν δεύτερης γενιάς βιοκαυσίμων.

Ορισμένα από τα οφέλη για τη μετατροπή της στερεάς βιομάζας σε βιοέλαιο είναι η ευκολία χειρισμού και αποθήκευσης, η υψηλότερη ενεργειακή του πυκνότητα καθώς και το σχετικά

μειωμένο του κόστος μεταφοράς. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται συγκριτικά η διαφορά ανάμεσα στη στερεή βιομάζα και το υγρό βιοέλαιο.



Εικόνα 1: Σύγκριση πυκνότητας μάζας και ενέργειας βιομάζας και βιοελαίου

Μέσα στο παραπάνω πλαίσιο έρευνας και ανάπτυξης για τη παραγωγή του βιοελαίου, αρκετή έρευνα γίνεται και για το προσδιορισμό των δυνατοτήτων του ώστε να μπορέσει να καταστεί εναλλακτικός ενεργειακός φορέας. Η παραγωγή των πρώτων υλών καθώς και τα logistics αποτελούν το 35% ή περισσότερο του συνολικού κόστους παραγωγής των προηγμένων βιοκαυσίμων. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ένα από τα ενδεχόμενα οφέλη της μετατροπής της βιομάζας σε βιοέλαιο, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας μάζας και ενέργειας του υγρού έναντι του στερεού προϊόντος, είναι η δυνατότητα μείωσης του κόστους μεταφοράς του καυσίμου σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Σε γενικές γραμμές, το κόστος της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να αποτελεί έως και 50-75% του κόστους της πρώτης ύλης. Επομένως, γίνεται μεγάλη προσπάθεια προκειμένου οι εφοδιαστικές αλυσίδες του καυσίμου να μπορέσουν να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό τους κόστος. Με ένα κατάλληλο δίκτυο διανομής η αποδοχή του βιοελαίου από την παγκόσμια αγορά ως μια νέα πηγή καυσίμων θα βοηθηθεί σε μεγάλο βαθμό.

Η παραγωγή του βιοελαίου, μέσω της πυρόλυσης βιομάζας, με τη διεργασία της ταχείας πυρόλυσης καθώς και η περιγραφή ενός μαθηματικού μοντέλου που αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας του καυσίμου, αποτελούν αντικείμενα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1 ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεργασία της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας. Αρχικά γίνεται αναφορά στη βιομάζα, πως ορίζεται και ποιες είναι οι κατάλληλες διαδικασίες που γίνονται προκειμένου να είναι κατάλληλη προς επεξεργασία. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα τεχνικά στάδια της τεχνολογίας της ταχείας πυρόλυσης για παραγωγή βιοελαίου. Τέλος, αναλύονται οι διάφοροι αντιδραστήρες οι οποίοι είναι κατάλληλοι για την εν λόγω τεχνολογία.

1.2 Βιομάζα

Με τον όρο βιομάζα εννοούμε το σύνολο της οργανικής ύλης, η οποία προέρχεται από όλους τους έμβιους οργανισμούς, είτε ζωικούς είτε φυτικούς. Από χημικής άποψης, η βιομάζα αποτελείται από ένα στερεό μέρος χημικής σύστασης (C,H,O,N,S,Cl κλπ.), ένα μέρος τέφρας, ενώ περιέχει και ένα μέρος υγρασίας. Η αναλογία των παραπάνω στοιχείων λαμβάνει ένα εύρος τιμών, ανάλογα με το είδος της πρώτης ύλης της βιομάζας, αλλά και ανάλογα με την προέλευση και τη χρονική περίοδο του έτους συλλογής. Μια τυπική σύσταση ωστόσο είναι 48-49% C, 5-6% H και 40-44% O.

1.2.1 Προετοιμασία τροφοδοσίας βιομάζας

Αρχικά, η στερεά πρώτη ύλη της βιομάζας είναι απαραίτητο να προετοιμαστεί κατάλληλα ώστε να επιτευχθούν οι υψηλές αποδόσεις βιοελαίου καθώς και οι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας που απαιτούνται στη ταχεία πυρόλυση. Η βιομάζα αρχικά συγκεντρώνεται και αποθηκεύεται κοντά στο χώρο όπου λαμβάνει χώρα η διεργασία. Η μορφή στην οποία μπορεί να βρίσκεται είναι είτε chips, όταν είναι ξυλώδης, είτε μπάλες στην περίπτωση αγροτικής προέλευσης αχυρώδους βιομάζας είτε με τη μορφή λαδιών (π.χ. τηγανέλαια, ζωικά λίπη). Ο χώρος αποθήκευσης μπορεί να είναι ανοικτός, σε περίπτωση υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή ηλιοφάνειας, προκειμένου να επιτευχθεί ως ένα βαθμό φυσική ξήρανση της πρώτης ύλης. Αντιθέτως, σε περίοδο βροχοπτώσεων δεν ενδείκνυται η αποθήκευση σε εξωτερικό χώρο, καθώς η

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

απορροφώμενη υγρασία προσθέτει επιπλέον ενεργειακές καταναλώσεις στη διεργασία της ξήρανσης.

Στη διεργασία της ταχείας πυρόλυσης είναι απαραίτητη η επίτευξη πολύ υψηλών ρυθμών θέρμανσης και επομένως είναι σημαντικό τα σωματίδια της βιομάζας να έχουν όσο το δυνατό μικρότερες διαστάσεις. Με αυτό τον τρόπο, διευκολύνεται η μεταφορά θερμότητας αφού υπάρχει υψηλός λόγος επιφάνειας ανά μονάδα όγκου του σωματιδίου. Επιπλέον, η αρχική βιομάζα, προκειμένου να εξασφαλιστούν όσο το δυνατό μικρότερες διαστάσεις, αλέθεται σε ειδικούς μύλους και στη συνέχεια κονιορτοποιείται. Ανάλογα με το είδος του αντιδραστήρα που χρησιμοποιείται, υπάρχουν διάφορα μέγιστα μεγέθη σωματιδίων που επιτρέπουν επαρκή ρυθμό συναλλαγής της θερμότητας. Ένας ακόμη λόγος για την απαίτηση μικρών σωματιδίων είναι, ότι, κατά τη διάρκεια της φυσικής μετάβασης της βιομάζας καθώς αυτή υφίσταται πυρόλυση αναπτύσσεται στην επιφάνεια άνθρακας. Οι μονωτικές ιδιότητες που εμφανίζει ο άνθρακας εμποδίζουν τη μεταφορά θερμότητας στο κέντρο του σωματιδίου. Ως εκ τούτου, έρχεται σε αντίθεση με τις απαιτήσεις που χρειάζονται για τη ταχεία πυρόλυση.

Η βιομάζα η οποία έχει συλλεχθεί και πρόκειται να επεξεργαστεί υποβάλλεται σε ξήρανση πριν οδηγηθεί στον αντιδραστήρα. Η αφαίρεση της υγρασίας είναι απαραίτητη, διότι αυτή μπορεί να απορροφήσει πολύ υψηλά ποσά ενέργειας με τη μορφή της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης. Επιπλέον, η ξήρανση αποσκοπεί στη μείωση της περιεκτικότητας του τελικού βιοελαίου σε νερό και συνεπώς στην αύξηση της ενεργειακής του πυκνότητας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ως μέρος των θερμοχημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης είναι και ο σχηματισμός του νερού. Ακόμα και στη περίπτωση που η ξηρή βιομάζα υποβληθεί στις θερμικές απαιτήσεις της ταχείας πυρόλυσης, το προκύπτον βιοέλαιο θα περιέχει ακόμα 12-15% κ.β. νερό. Ο σχηματισμός αυτός, πιστεύεται ότι είναι αποτέλεσμα της αφυδάτωσης των υδρογονανθράκων, ενδεχομένως και των ελεύθερων χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο υψηλής θερμοκρασίας (500°C) περιβάλλον πυρόλυσης με το υδρογόνο και το οξυγόνο. Επομένως, το νερό της αρχικής βιομάζας απλά προστίθενται στη ποσότητα βάσης του τελικού προϊόντος – βιοελαίου. Γενικά, η ξήρανση μπορεί να επιτευχθεί είτε με φυσικό είτε με τεχνητό τρόπο. Δηλαδή, έκθεση της βιομάζας στον ήλιο για κατάλληλο χρονικό διάστημα ή με τη χρήση ρευμάτων θερμότητας (πχ μέσω ατμού) που παράγονται από την αξιοποίηση των παραπροϊόντων της διεργασίας (μόνιμα αέρια). Στόχος είναι η βιομάζα που εισέρχεται στον αντιδραστήρα να έχει περιεκτικότητα 5 έως 10% κατά βάρος σε υγρασία. Είναι λογικό η ξήρανση να απαιτεί τη κατανάλωση ενός ουσιώδους ποσού θερμότητας, το οποίο επιβαρύνει τελικά το ενεργειακό ισοζύγιο της διεργασίας.

Οι περισσότερες μορφές βιομάζας αποτελούνται από λιγνίτη, κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και εκχυλίσματα. Ως εκ τούτου, οι θερμικές διασπάσεις των θραυσμάτων καθενός από αυτά θα είναι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

χημικά διαφορετικές. Επομένως, κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης η βιομάζα επηρεάζεται διαφορετικά.

Ο κύριος παράγοντας του κόστους παραγωγής βιοελαίων είναι το κόστος της πρώτης ύλης. Επομένως, είναι σημαντικό αυτά τα έξοδα προετοιμασίας της τροφοδοσίας να κρατηθούν σε χαμηλά επίπεδα. Οι ερευνητές πίστευαν ότι κατά τις πρώτες ημέρες της ανάπτυξης της ταχείας πυρόλυσης τα μεγέθη των σωματιδίων θα έπρεπε να είναι μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα, προκειμένου να διευκολυνθούν οι υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας που απαιτούνται. Ωστόσο, όπως έχει αποδειχθεί σε πιο πρόσφατη πρακτική εμπειρία, αυτό δεν είναι η γενική παρατήρηση, αφού και μεγέθη περίπου 2mm εξακολουθούν να είναι απαραίτητα.



Εικόνα 2 : Συλλογή βιομάζας σε μπάλες

1.3 Διεργασία της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας

Με τον όρο πυρόλυση βιομάζας εννοούμε τη θέρμανση υλικών φυτικής ή ζωικής προέλευσης σε υψηλή θερμοκρασία απουσία οξυγόνου. Τα προϊόντα που παράγονται εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το ρυθμό θέρμανσης και το χρόνο θέρμανσης. Οι κυριότερες παράμετροι της πυρόλυσης αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα :

| Διεργασία | Αντιδραστήρας | Χρόνος Παραμονής | Ρυθμός θέρμανσης | Θερμοκρασία, °C | Κύριο προϊόν |
|-----------------|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------------|
| Ανθρακοποίηση | Σταθερά κλίνη | Ημέρες | Πολύ αργός | 400 | Κώκ |
| Αργή πυρόλυση | Ρευστοστερεά κλίνη | 5-30 min | Χαμηλός | 600 | Βιοέλαιο, Αέριο, Κώκ |
| Ταχεία πυρόλυση | Κινούμενη ρευστοστερεά κλίνη | 0.5-5 sec | Πολύ υψηλός | 400-650 | Βιοέλαιο, Αέριο, Κώκ |

Πίνακας 1 : Κυριότεροι παράμετροι πυρόλυσης

Από τις παραπάνω μεθόδους αυτή που ξεχωρίζει είναι η ταχεία πυρόλυση, διότι παράγει μεγάλες ποσότητες βιοελαίου (75% κ.β. της βιομάζας), το οποίο θα μπορούσε να υποκαταστήσει το πετρέλαιο. Οι ιδιότητες όμως του βιοελαίου διαφέρουν σημαντικά από το συμβατικό πετρέλαιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι περιέχει μεγάλη ποσότητα οξυγόνου (42 έως 50 % κ.β.) και η θερμογόνο του δύναμη είναι μόλις 28 MJ/Kg σε αντίθεση με 42 MJ/Kg του πετρελαίου. Επιπλέον, το βιοέλαιο παρουσιάζει αστάθεια στη θέρμανση και λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας φαινολών, αλδεϋδών και κετονών εμφανίζει διαβρωτικές ιδιότητες.

Για τους παραπάνω λόγους η έρευνα στη παραγωγή βιοκαυσίμων με πυρόλυση βιομάζας επικεντρώνεται σήμερα στους παρακάτω τομείς :

- α) Μεγιστοποίηση της παραγωγής του βιοελαίου με επιλογή της κατάλληλης βιομάζας, τον κατάλληλο σχεδιασμό του αντιδραστήρα πυρόλυσης και την επιλογή συνθηκών λειτουργίας αυτού (θερμοκρασία, χρόνος παραμονής),
- β) Επιλογή του κατάλληλου στερεού για τη ταχεία θέρμανση της βιομάζας με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της περιεκτικότητας οξυγόνου στο βιοέλαιο,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

γ) Αναζήτηση μεθόδων εξευγενισμού του βιοελαίου π.χ. απομάκρυνση οξυγόνου με υδρογόνωση παρουσία καταλυτών σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση,

δ) Διαχωρισμό πολύτιμων οργανικών χημικών ενώσεων (π.χ. φαινόλες, οξικό οξύ) από το βιοέλαιο.

1.3.1 Η χημεία της πυρόλυσης

Με την πυρόλυση βιομάζας έχουμε την παραγωγή τριών πρωταρχικών προϊόντων. Τα προϊόντα αυτά είναι το εξανθράκωμα, τα μόνιμα αέρια και οι ατμοί, όπου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος συμβάλλουν στη δημιουργία ενός σκούρου καφέ ιξώδες υγρού. Γενικά, η πυρόλυση βιομάζας σαν διεργασία βρίσκεται σε εφαρμογή υπό κάποια μορφή για δεκαετίες. Πιο συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια άρχισε να κατανοείται η συσχέτιση ανάμεσα στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και στην απόδοση της διανομής των προϊόντων. Οι αποδόσεις του υγρού, εξανθρακώματος και των αερίων του βιοελαίου είναι 75%, 12% και 13% αντίστοιχα. Είναι γενικά αναγνωρισμένο ότι τα δύο κύρια στάδια επεξεργασίας που απαιτούνται για να προκύψουν συνθήκες για ταχεία πυρόλυση είναι :

- Πολύ υψηλή ροή θερμότητας προς τη βιομάζα με ένα αντίστοιχο υψηλό ρυθμό θέρμανσης του σωματιδίου της βιομάζας,
- Μεταφορά θερμότητας προς τη βιομάζα με άμεση απόσβεση, σε μία πολύ μικρή χρονική περίοδο, ακολουθώντας το σχηματισμό των προϊόντων.

Ως αποτέλεσμα, αυτή η θερμότητα που μεταφέρεται στα συστατικά του μακρο-πολυμερούς που απαρτίζουν τη βιομάζα οδηγεί στη διάσπαση αυτών σε μικρότερα τμήματα. Όμως η παρουσία του οξυγόνου σε αυτά τα τμήματα, κυρίως πάνω απ τους 400° C συμβάλλει στην αστάθεια τους και στο να συνεχίσουν να υφίστανται χημικές μεταβολές. Κάτι που δεν ισχύει σε περίπτωση που συμβεί η θερμική τους απόσβεση. Ως εκ τούτου, ο χρόνος παραμονής τους στη θερμική ζώνη αντίδρασης απαιτείται να είναι πολύ μικρός, το ιδανικότερο μόνο μερικές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου. Γενικότερα, αυτές οι αντιδράσεις θερμικής διάσπασης είναι πολύ σύνθετες και δεν έχουν χαρακτηριστεί πλήρως. Ωστόσο, πιστεύεται ότι στα αμέσως σχηματιζόμενα προϊόντα υπάρχουν πολλές ελεύθερες ενώσεις ριζικού τύπου. Γνωρίζουμε όμως, ότι εάν δεν αποσβεστούν γρήγορα αυτές οι ενώσεις μπορούν να διασπαστούν περαιτέρω σε μικρότερα μοριακού βάρους τμήματα και/ή να πολυμεριστούν σε μεγαλύτερα τμήματα. Και τα δύο πάντως είναι μέρος των τμημάτων που απαρτίζουν το επιθυμητό υγρό προϊόν. Ο συνδυασμός αυτών των απαιτήσεων επεξεργασίας, του σύντομου χρονικού διαστήματος παραμονής και της

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

άμεσης ψύξης των ατμών, μπορούν να θεωρηθούν από την άποψη της «σοβαρότητας της διάσπασης» (συνδυασμένη επίδραση της θερμοκρασίας και του χρόνου) ότι ορίζουν γενικά τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους λειτουργίας. Μολονότι τη σημαντικότερη επίδραση στους ατμούς πυρόλυσης έχει η «σοβαρότητα της διάσπασης», ωστόσο υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη φύση και την απόδοση των προϊόντων πυρόλυσης. Για παράδειγμα, κάτι που επηρεάζει το ρυθμό πολυμερισμού είναι η ποσότητα του αδρανούς αερίου που υπάρχει στο περιβάλλον της αντίδρασης, αφού καθορίζει τη μερική πίεση των θραυσμάτων που προκύπτουν. Επίσης, είναι ευρέως γνωστό ότι το ανόργανο υλικό που υπάρχει στη βιομάζα επιδεικνύει καταλυτικά αποτελέσματα τόσο ως προς τη πυρόλυση όσο και προς το πολυμερισμό.

1.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντιδραστήρων πυρόλυσης βιομάζας

Τα τελευταία 25 χρόνια της τεχνολογίας της ταχείας πυρόλυσης, είχαμε την υλοποίηση μιας σειράς αντιδραστήρων διαφορετικών σχεδιαστικά, ικανών όμως πάντα να πληρούν τις απαιτήσεις μεταφοράς θερμότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης, στη διάρκεια αυτών των χρόνων έγινε προσπάθεια και για την αντιμετώπιση ζητημάτων κόστους. Όπως, της μείωσης του μεγέθους των σωματιδίων ή της ποσότητας υγρασίας που περιέχεται στην πρώτη ύλη (βιομάζα). Οι κυριότεροι τύποι αντιδραστήρων αναφέρονται παρακάτω.

- **Αναβράζουσα ρευστοποιημένη κλίνη**

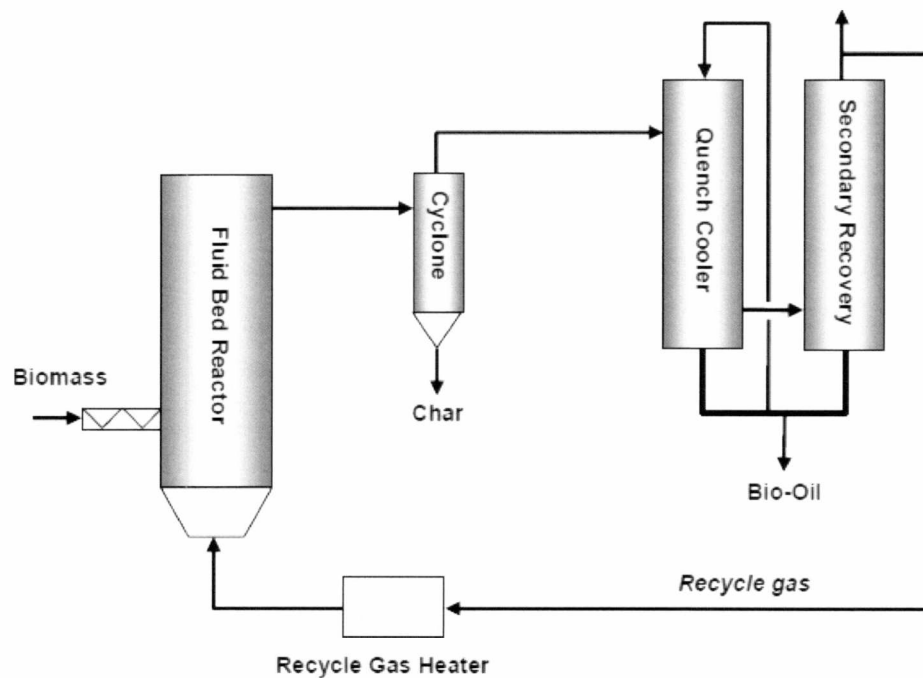
Οι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων έχουν χρησιμοποιηθεί για πάνω από 50 χρόνια τόσο στις χημικές διεργασίες όσο και στην επεξεργασία πετρελαίου. Επομένως, η τεχνολογία αυτού του τύπου έχει μια μεγάλη ιστορία λειτουργίας. Σε γενικές γραμμές, ο σχεδιασμός αυτού του είδους αντιδραστήρων επικεντρώνεται σε δύο ιδιότητες που είναι απαραίτητες στη ταχεία πυρόλυση: τη παροχή υψηλών ποσοστών μεταφοράς θερμότητας σε συνδυασμό με ομοιόμορφες θερμοκρασίες κλίνης. Επιλέγοντας το κατάλληλο μέγεθος για τη ρευστοποιημένη κλίνη του αντιδραστήρα μπορεί να καθοριστεί ο ρυθμός ροής του αερίου. Με αυτό τον τρόπο ο χρόνος παραμονής του αερίου-ατμού στο ελεύθερο τμήμα πάνω από την κλίνη μπορεί να ρυθμιστεί γενικά σε μία επιθυμητή τιμή μεταξύ 0,5-0,20 sec. Ωστόσο, η εμπειρία έχει δείξει ότι μία θερμοκρασία λειτουργίας στη κλίνη μεταξύ 500-550° C για περίπου 0.5 sec χρόνο παραμονής συνήθως θα οδηγήσει σε υψηλότερες αποδόσεις υγρού. Εντούτοις, συστήματα μεγαλύτερου τύπου μπορούν να λειτουργούν σε κάπως χαμηλότερη θερμοκρασία και για μεγαλύτερο χρόνο παραμονής. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι οι θερμοκρασίες ανάλογα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

με το τύπο της βιομάζας που βρίσκεται υπό επεξεργασία μπορεί να ποικίλουν. Το βιοέλαιο που παράγεται αποτελεί το 70-75% της ξηρής βιομάζας που εισέρχεται στον αντιδραστήρα.

Λόγω της μακράς ιστορίας της υπηρεσίας του και του απλού λειτουργικού του συστήματος, αυτός ο τύπος αντιδραστήρα θεωρείται πολύ αξιόπιστος και χωρίς ουσιαστικά προβλήματα. Είναι ένα σύστημα ικανό να επιτύχει της προϋποθέσεις της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας. Ωστόσο, όσον αφορά το σχεδιασμό αντιδραστήρων μεγαλύτερης κλίμακας υπάρχουν μερικοί πρακτικοί περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ένας από αυτούς αφορά την απόδοση του αντιδραστήρα αφού εξαρτάται απ την αποτελεσματικότητα της ποσότητας παροχής της θερμότητας. Επίσης ορισμένες κλίβες φυσαλίδων λειτουργούν έχοντας ως βάση την αδιαβατική λειτουργία. Επομένως, όλη η διεργασία μεταφοράς θερμότητας προέρχεται από ένα προθερμασμένο ρευστοποιημένο αέριο, το οποίο σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι ένα ανακυκλώσιμο αέριο πυρόλυσης. Η λειτουργία αυτού του τύπου μπορεί να απλοποιεί το σχεδιασμό του αντιδραστήρα αλλά συνήθως οδηγεί σε μικρότερες αποδόσεις. Προκειμένου όμως να έχουμε καλύτερη απόδοση, η άμμος του αντιδραστήρα πρέπει να θερμαίνεται έμμεσα με τη χρήση σωλήνων καύσης.

Η αναβράζουσα κλίνη είναι αυτοκαθαριζόμενη, αυτό σημαίνει ότι το υποπροϊόν άνθρακα που παράγεται μεταφέρεται έξω από τον αντιδραστήρα με τα αέρια και τους ατμούς του προϊόντος. Ωστόσο, στη πράξη αυτό γίνεται πιο δύσκολο αφού απαιτεί προσεκτική επιλογή του μεγέθους της πρώτης ύλης. Γενικά η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων που περιέχονται πρέπει να είναι σχετικά στενή. Εάν τα σωματίδια της βιομάζας είναι πολύ μεγάλα τότε τα σωματίδια άνθρακα (μετά την πυρόλυση) που απομένουν μπορεί να έχουν πάρα πολύ μάζα. Συνεπώς, δεν μπορούν να διαφύγουν αποτελεσματικά έξω απ τον αντιδραστήρα μαζί με τους παραγόμενους ατμούς και το αέριο. Σε γενικές γραμμές, θα πρέπει να προλαμβάνεται η συσσώρευση άνθρακα στη κλίνη. Εάν αυτό δεν γίνει η τροφοδοσία θα πρέπει να διαλεχτεί προσεκτικά ώστε να επιλέγονται σωματίδια κατανομής στενού μεγέθους. Συνεπώς, το ήδη υπάρχον κόστος προετοιμασίας της τροφοδοσίας βιομάζας θα αυξηθεί σημαντικά. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος τυπικής κλίνης φυσαλίδων.



Εικόνα 3 : Σύστημα αναβράζουσας ρευστοποιημένης κλίνης

Κάποιες σχεδιαστικές θεωρήσεις σχετικά με τα συστήματα ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδων :

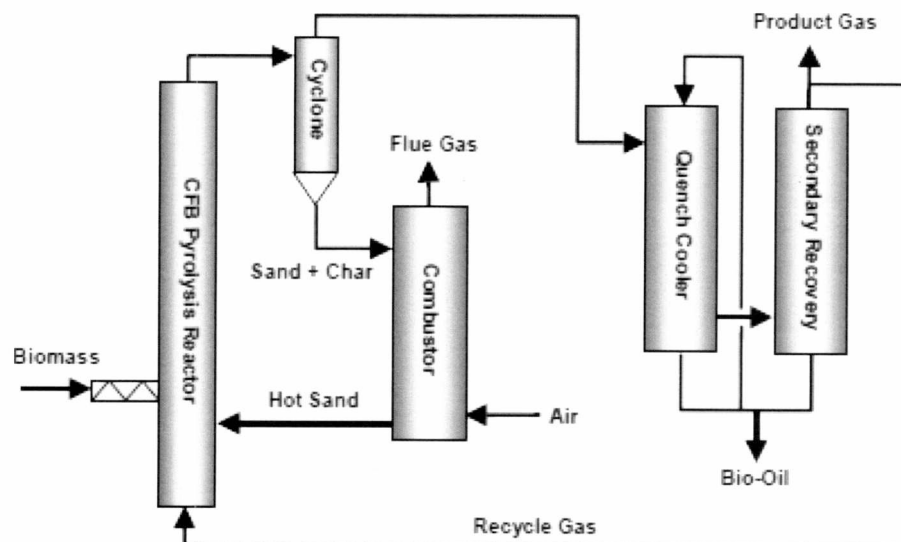
- Η θερμότητα πρέπει να μπορεί να εφαρμοστεί στη ρευστοποιημένη κλίνη με μια σειρά από διαφορετικούς τρόπους που να προσφέρουν ευελιξία για μια δεδομένη διαδικασία,
- Ο χρόνος παραμονής των ατμών ελέγχεται απ τον ρυθμό ροής του μεταφερόμενου αέριου,
- Τα σωματίδια βιομάζας της τροφοδοσίας πρέπει να είναι σε μέγεθος μικρότερα από 2-3 mm,
- Τα σωματίδια άνθρακα επειδή μπορούν να καταλύσουν τις αντιδράσεις του ατμού πυρόλυσης πρέπει να αφαιρούνται από τη κλίνη γρήγορα,
- Τα σωματίδια της βιομάζας εάν δεν είναι σωστού μεγέθους τότε θα έχουμε τη συσσώρευση σωματιδίων άνθρακα στη κορυφή της κλίνης, επομένως θα πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες διαδικασίες για την αφαίρεση τους,
- Η μεταφορά θερμότητας σε κλίνες μεγάλης κλίμακας δεν έχει αποδειχθεί ακόμα.

- **Κινούμενη ρευστοστερεά κλίνη**

Τα υψηλά ποσοστά μεταφοράς θερμότητας καθώς και ο μικρός χρόνος παραμονής των ατμών που έχει καθιστούν το σχεδιασμό αυτού του αντιδραστήρα κατάλληλο να πετύχει τις συνθήκες της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας. Εξαιτίας όμως του γεγονότος ότι πρέπει να κινηθούν μεγάλες ποσότητες άμμου (ή άλλων μέσων ρευστοποίησης) τριγύρω και σε διαφορετικά τμήματα ο μηχανισμός αυτός είναι κάπως περισσότερο περίπλοκος. Για πολλά χρόνια αυτό το είδος στερεών μεταφοράς έχει ασκηθεί σε διυλιστήρια καταλυτικών μονάδων πυρόλυσης έτσι ώστε να αναδειχθεί σε πολλές εμπορικές εφαρμογές. Έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί αρκετά συστήματα αυτού του τύπου ωστόσο η πιο σημαντική διαφορά τους βρίσκεται στη μέθοδο παροχής της θερμότητας. Οι παλαιότερου τύπου μονάδες βασιζόντουσαν σε έναν μόνο έμμεσα θερμαινόμενο αντιδραστήρα, κυκλώνα και στη διαμόρφωση δεξαμενής σταθερής πίεσης, όπου τα σωματίδια άνθρακα συλλέγονται ως υποπροϊόντα. Νεότερα σχέδια έχουν ενσωματώσει ένα σύστημα διπλού αντιδραστήρα, όπως αυτό που διαχειρίζεται η ENEL στην Ιταλία. Σε αυτό το σχεδιασμό, ο πρώτος αντιδραστήρας βρίσκεται σε λειτουργία πυρόλυσης ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιείται για να κάψει τον άνθρακα παρουσία της άμμου και στη συνέχεια να μεταφέρει τη καυτή άμμο στο δοχείο πυρόλυσης. Ένας τέτοιος σχεδιασμός συστήματος έχει τα πλεονεκτήματα του, αλλά είναι αρκετά δύσκολος λόγω της μεταφοράς στερεών και του ελέγχου της θερμοκρασίας (υπερθέρμανση της άμμου στον καυστήρα) που πρέπει να γίνεται στο σύστημα. Επίσης, ο ρυθμός ροής της άμμου είναι 10-20 φορές μεγαλύτερος απ την ταχύτητα τροφοδοσίας της βιομάζας και υπάρχει ένα υψηλό ενεργειακό κόστος για τη μετακίνηση αυτής της άμμου γύρω από το βρόγχο. Για το σύστημα της κινούμενης ρευστοστερεάς κλίνης το μέγεθος των σωματιδίων της βιομάζας στη τροφοδοσία πρέπει να είναι ακόμα μικρότερα απ αυτά που χρησιμοποιούνται στην αναβράζουσα κλίνη. Σε αυτό το τύπο αντιδραστήρα το σωματίδιο θα έχει μόνο 0.5-1.0 sec χρόνο παραμονής στην υψηλή ζώνη μεταφοράς θερμότητας της πυρόλυσης, πριν εισαχθεί στο τμήμα καύσης του άνθρακα. Σε αντίθεση με την αναβράζουσα κλίνη όπου ο μέσος χρόνος παραμονής των σωματιδίων είναι 2-3 sec. Για αρκετά μεγάλα σωματίδια αυτός ο χρόνος δεν θα ήταν αρκετός για να μεταφερθεί η θερμότητα στο εσωτερικό τους. Αυτό ισχύει σε μεγάλο βαθμό, αφού ένα στρώμα άνθρακα αναπτύσσεται στην εξωτερική επιφάνεια του σωματιδίου, το οποίο δρα ως μονωτικό στρώμα εμποδίζοντας περαιτέρω διείσδυση της θερμότητας. Επιπλέον, η κίνηση της άμμου και των σωματιδίων μέσω του συστήματος προκαλεί τριβή αυτού του στρώματος άνθρακα. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται κυρίως στις γωνίες και στις καμπύλες όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ τους είναι πιο ισχυρή. Τα μεγαλύτερα σωματίδια που παραμένουν ατελώς πυρολυμένα θα καταλήξουν στο καυστήρα άνθρακα όπου απλώς θα καούν. Κατά συνέπεια αφού τα ατελή σωματίδια πυρόλυσης θα πάνε για καύση εάν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα σωματίδια βιομάζας στη τροφοδοσία, η απόδοση του ελαίου θα μειωθεί. Σε γενικές γραμμές το επιθυμητό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

εύρος μεγέθους είναι σωματίδια του 1-2 mm. Παρακάτω φαίνεται η σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος τυπικής κινούμενης ρευστοστερεάς κλίνης.



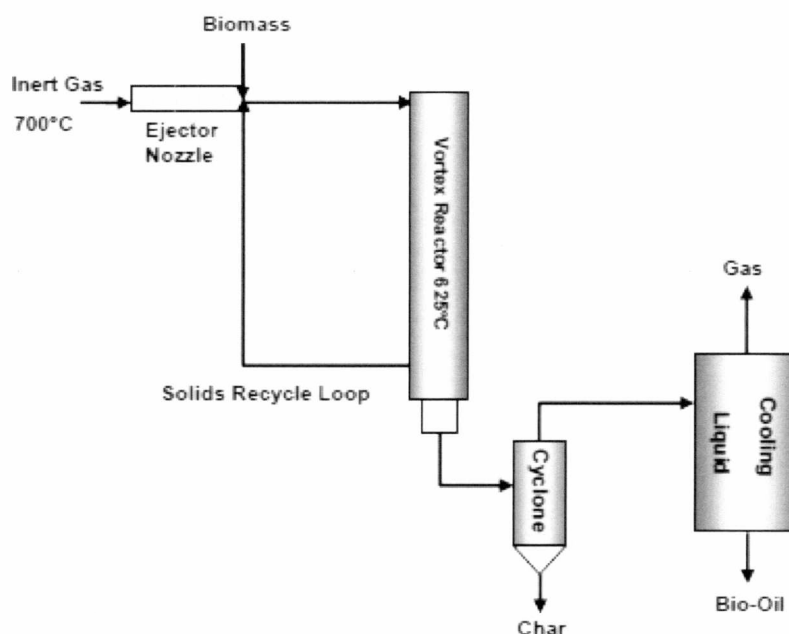
Εικόνα 4 : Σύστημα ρευστοστερεάς κλίνης

- **Αφαιρετική Πυρόλυση**

Ο αντιδραστήρας δίνης αναπτύχθηκε στο SERI (τόρα NREL) από το 1980 μέχρι το 1996 προκειμένου να εκμεταλλευτεί τα φαινόμενα κατάλυσης. Με βάση τη προσέγγιση αυτή το σωματίδιο της βιομάζας τήκεται – ατμοποιείται από το ένα επίπεδο ή πλευρά του λόγω διαστάσεων του. Ο σχεδιασμός αυτός έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί σωματίδια μεγέθους μέχρι 20 mm εν αντιθέσει με τα 2 mm μεγέθους σωματίδια που απαιτούνται στο σύστημα της ρευστοστερεάς κλίνης. Επιπλέον, τα σωματίδια της βιομάζας μέσω ενός αδρανούς αερίου (ατμού ή αζώτου) επιταχύνονται σε πολύ υψηλές ταχύτητες και στη συνέχεια εισάγονται εφαπτομενικά στο στρόβιλο (σωληνοειδούς) αντιδραστήρα. Υπό αυτές τις συνθήκες το σωματίδιο αναγκάζεται να ολισθαίνει σε υψηλές ταχύτητες σε όλη την εσωτερική επιφάνεια του αντιδραστήρα. Λόγω των υψηλών αυτών ταχυτήτων η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσεται εφαρμόζει μία κανονική δύναμη στο σωματίδιο ενάντια στο τοίχωμα του αντιδραστήρα. Επιπλέον η θερμοκρασία τοιχώματος του αντιδραστήρα διατηρείται στους 625°C. Σε αυτή τη θερμοκρασία το σωματίδιο τήκεται αποτελεσματικά. Επίσης, μέσω των αερίων οι ατμοί που παράγονται στην επιφάνεια γρήγορα απομακρύνονται από τον αντιδραστήρα οδηγώντας σε χρόνους παραμονής του ατμού 50-100 millisec. Επομένως, αυτός ο σχεδιασμός συστήματος είναι επίσης σε θέση να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της ταχείας πυρόλυσης επιδεικνύοντας αποδόσεις 65% υγρών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Παρακάτω φαίνεται η σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος τυπικού αντιδραστήρα δίνης.



Εικόνα 5 : Σύστημα αφαιρετικής πυρόλυσης

Στη πράξη κοντά στην έξοδο του αντιδραστήρα ήταν απαραίτητο να ενσωματωθεί ένας βρόγχος ανακύκλωσης στερεών. Με αυτό τον τρόπο θα μπορεί να επιτευχθεί πλήρης πυρόλυση της βιομάζας αφού τα μεγαλύτερα ημιτελή σωματίδια πυρόλυσης θα μπορούν να κατευθύνονται εκ νέου πίσω στην είσοδο. Προκειμένου τα σωματίδια να μπορούν να διαφύγουν από τον αντιδραστήρα έπρεπε να ήταν αρκετά μικρά ώστε να παρασυρθούν πάλι με τον ατμό και τα αέρια καθώς αυτά εξέρχονται. Ενώ ο βρόγχος ανακύκλωσης στερεών είναι σε θέση να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά το ζήτημα της τέλει πυρόλυσης των σωματιδίων, παρ' όλα αυτά, οδήγησε στη παραγωγή μιας μικρής ποσότητας ατμών που ανακυκλώνονται στη ζώνη υψηλής θερμοκρασίας του αντιδραστήρα. Αυτή η ποσότητα-τιμή ατμών έχει μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στη θερμοκρασία του αντιδραστήρα πυρόλυσης και πιθανότατα συμβάλλει στη διάσπαση του προϊόντος σε αέρια. Συνεπώς, οδηγεί σε ελαφρώς χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με αυτές των ρευστοποιημένων κλινών.

Ορισμένες θεωρήσεις σχετικά με το σχεδιασμό αντιδραστήρα δίνης είναι οι εξής :

- Οι υψηλές ταχύτητες εισόδου των σωματιδίων στον αντιδραστήρα προκαλούν διάβρωση κατά τη μετάβαση τους από γραμμική σε γωνιακή ορμή,
- Στο βρόγχο ανακύκλωσης εμφανίζεται υπερβολική φθορά. Και τα δύο προβλήματα οξύνονται σε περιπτώσεις που εισάγονται μαζί με τη βιομάζα και αδρανή υλικά (πέτρες κλπ),

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

- Υπάρχουν αβεβαιότητες σχετικά με την επεκτασιμότητα του σχεδιασμού που σχετίζεται με τη διατήρηση σε υψηλές ταχύτητες των σωματιδίων σε όλο το μήκος του αντιδραστήρα. Οι υψηλές ταχύτητες είναι αναγκαίες για τη φυγοκεντρική δύναμη προκειμένου να διατηρηθεί η πίεση των σωματιδίων ενάντια στο τοίχωμα του αντιδραστήρα. Η υψηλή ταχύτητα ολίσθησης και η σταθερή πίεση του σωματιδίου απέναντι στους 600° C του τοιχώματος του αντιδραστήρα είναι αναγκαία για την επίτευξη των υψηλών απαιτήσεων μεταφοράς θερμότητας στη ταχεία πυρόλυση.

Εξαιτίας αυτών των θεμάτων ο σχεδιασμός συστήματος αντιδραστήρα δίνης σταμάτησε το 1997.

- **Πυρόλυση σε κενό**

Η Pyrovac στο Κεμπέκ του Καναδά προκειμένου να μετατρέπεται η βιομάζα σε υγρό έχει αναπτύξει μια διαδικασία που χαρακτηρίζεται από τη πυρόλυση σε κενό. Ενώ πρόκειται για μία αργή διαδικασία πυρόλυσης (χαμηλότερο ποσοστό μεταφοράς θερμότητας) δημιουργεί ένα υγρό προϊόν χημικά παρόμοιο. Αυτό συμβαίνει διότι ο μικρότερος χρόνος παραμονής των ατμών μειώνει την ανάπτυξη δευτερογενών αντιδράσεων. Ωστόσο οι αργοί ρυθμοί θέρμανσης οδηγούν σε χαμηλότερες αποδόσεις βιοελαίου από 30-45% κ.β. σε σύγκριση με τις 70% κ.β. που έχουν αναφερθεί στην τεχνολογία της ρευστοποιημένης κλίνης. Η διαδικασία της πυρόλυσης σε κενό από μόνη της είναι πολύ περίπλοκη μηχανικά, περιλαμβάνοντας έναν κινούμενο μεταλλικό ιμάντα που μεταφέρει τη βιομάζα μέσα στο θάλαμο κενού υψηλής θερμοκρασίας. Επίσης, υπάρχουν και μηχανικοί αναδευτήρες όπου ανακατεύουν περιοδικά τη βιομάζα που βρίσκεται πάνω στον ιμάντα. Όλη αυτή η μηχανική μεταφορά γίνεται στους 500° C. Γι αυτό και αυτά τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού αναμένεται να έχουν υψηλό κόστος επένδυσης και συντήρησης. Η λειτουργία στο κενό προκειμένου να διατηρείται καλή στεγανοποίηση ανά πάσα στιγμή απαιτεί ιδιαίτερη τροφοδοσία στερεάς βιομάζας και κατάλληλες συσκευές εκφόρτωσης. Εκτός του ότι η απόδοση της θέρμανσης είναι χαμηλή και σε αυτό το συγκεκριμένο σχεδιασμό έχουμε άσκοπα περίπλοκες χρήσεις ενός καυστήρα και ενός επαγωγικού θερμαντήρα που έχει για φορέα μεταφοράς θερμότητας τηγμένα άλατα. Ακόμα και με αυτά τα μειονεκτήματα, η τεχνολογία της πυρόλυσης σε κενό έχει αρκετά πλεονεκτήματα :

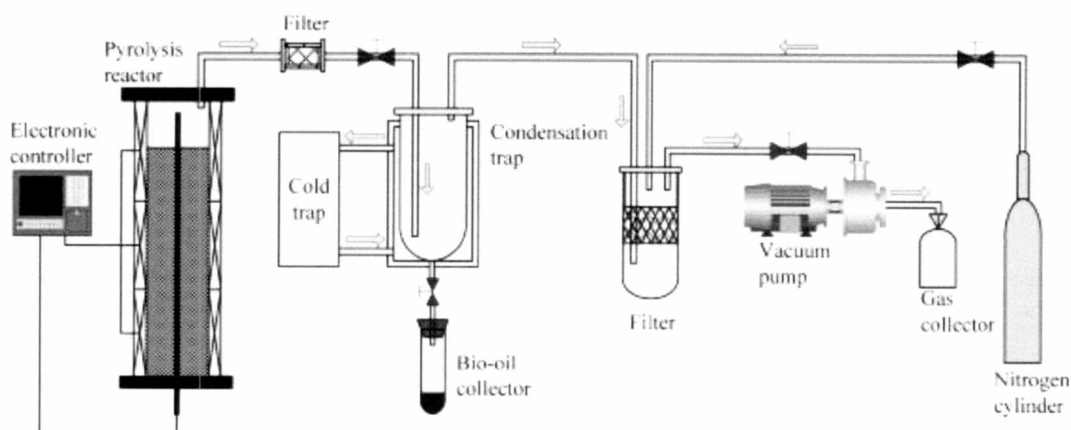
- Παράγει καθαρό έλαιο (καθόλου ή πολύ λίγο άνθρακα) χωρίς τη χρήση θερμής διήθησης ατμών (αυτή η τεχνική θα αναλυθεί παρακάτω στο 2.5 κεφάλαιο),
- Η συμπύκνωση του τελικού υγρού προϊόντος είναι ευκολότερη σε σχέση με τη τεχνολογία της ρευστοποιημένης κλίνης ή της εισερχόμενης ροής (υψηλότερη συγκέντρωση ατμών, λίγο ή καθόλου σχηματισμό αερολυμάτων),

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

- Μπορεί να επεξεργαστεί μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια από αυτά της διαδικασίας της ρευστοποιημένης κλίνης, μέχρι και 2-5 cm,
- Η λιγνίνη που προέρχεται απ το κλάσμα του ελαίου μπορεί να είναι μικρότερου μοριακού βάρους απ τις διαδικασίες της ταχείας πυρόλυσης, η οποία μπορεί να έχει πλεονεκτήματα εάν το συστατικό αυτό εξάγεται για χημικά φαινολικού τύπου,
- Μέσω του κενού εξαλείφεται η απαίτηση να σαρωθούν οι ατμοί μέσα από ένα αέριο έξω από το δοχείο αντίδρασης. Η έλλειψη ενός αερίου-φορέα φαίνεται να είναι ένας βασικός παράγοντας στην ελαχιστοποίηση σχηματισμού αερολυμάτων,
- Είναι εύκολο να επιτευχθεί μικρός χρόνος παραμονής των πτητικών χωρίς να εξαρτάται από το χρόνο παραμονής των σωματιδίων της βιομάζας.

Παρ όλα αυτά, η τεχνολογία της πυρόλυσης σε κενό έχει επίσης αρκετά μειονεκτήματα στην παραγωγή υγρών. Ειδικότερα, στις εφαρμογές καυσίμων εξαιτίας των υψηλών αποδόσεων που απαιτούνται :

- Είναι μία αργή διαδικασία πυρόλυσης που δεν είναι ικανή να προσφέρει αποδόσεις ελαίου τόσο υψηλές όσο των διαδικασιών γρήγορου ρυθμού θέρμανσης (η πυρόλυση κενού έχει να επιδείξει αποδόσεις 47% οργανικά και 17% νερό για έλατο, 35% οργανικά και 20% νερό για φλοιό),
- Παράγει περισσότερο νερό από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία ταχείας πυρόλυσης,
- Ως πτητικό υλικό παράγει υγρά απόβλητα που δεν συλλέγονται στους καθαριστήρες αλλά απορροφούνται απ την αντλία υγρού δακτυλίου συμπιεστή. Αυτά θα πρέπει να ανακυκλωθούν πίσω στις πλυντρίδες.



Εικόνα 6: Σύστημα πυρόλυσης σε κενό

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η έλλειψη αγορών για το βιοέλαιο που παράγεται απ αυτού του είδους τις μονάδες έκαναν τη συνεχή τους λειτουργία αρκετά δαπανηρή και οι εργασίες διακόπηκαν το 2002.

- **Αντιδραστήρας πυρόλυσης περιστρεφόμενου κώνου**

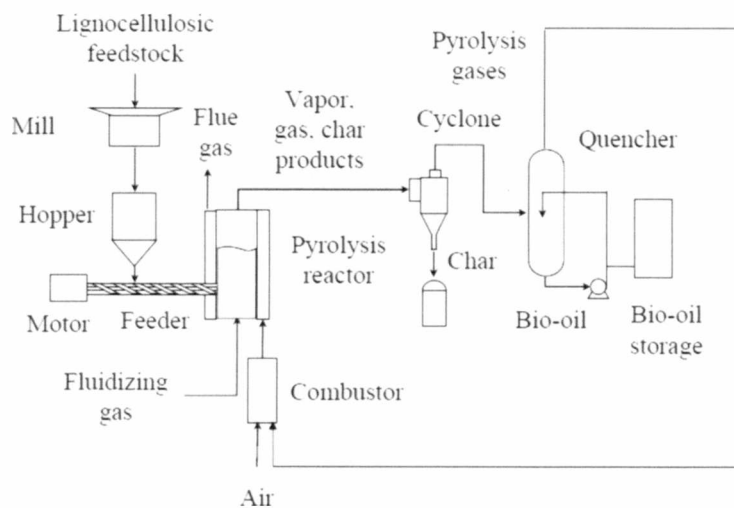
Ο αντιδραστήρας πυρόλυσης περιστρεφόμενου κώνου είναι υπό ανάπτυξη στο πανεπιστήμιο του Twente στην Ολλανδία από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η τεχνολογία αυτή είναι ανάλογη με το σύστημα της μεταφερόμενης κλίνης (κινούμενη ρευστοστερεά κλίνη). Σε αυτή προκειμένου να επηρεάσει τις αντιδράσεις της θερμικής πυρόλυσης ανακατεύει τη καυτή άμμο με την τροφοδοσία της βιομάζας. Η κύρια διαφορά είναι ότι η φυγόκεντρική δύναμη που προέρχεται από ένα περιστροφικό κώνο σε αντίθεση με ένα αέριο-φορέα χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς. Επιπλέον, η τροφοδοσία της βιομάζας και της άμμου γίνεται στη βάση του κώνου ενώ η περιστροφή προκαλεί τη φυγόκεντρο δύναμη προκειμένου να κινηθούν προς τα επάνω στο χείλος του κώνου τα στερεά. Καθώς τα στερεά χύνονται απ το πάνω χείλος του κώνου, οι ατμοί πυρόλυσης κατευθύνονται προς ένα συμπυκνωτή. Εν συνεχεία, ο άνθρακας και η άμμος στέλνονται σε ένα καυστήρα, όπου η άμμος επαναθερμαίνεται πριν την εισαγωγή της στη βάση του κώνου με τη νέα βιομάζα τροφοδοσίας. Αυτός ο σχεδιασμός έχει να επιδείξει αποδόσεις 70% σε σταθερή βάση. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι :

- Δεν απαιτεί ένα αέριο-φορέα για τη πυρόλυση (αλλά το κάνει για τη μεταφορά άμμου), όπου κάνει την ανάκτηση του βιο ελαίου προϊόντος ευκολότερη,
- Η δυναμική μεταφορά της άμμου και της βιομάζας δεν είναι τόσο έντονη όσο και στην Ensyn Ταχεία Θερμική Επεξεργασία (RTP) της κινούμενης ρευστοστερεάς κλίνης, επομένως μειώνει τα προβλήματα φθοράς.

Ορισμένα μειονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι :

- Ολόκληρη η διαδικασία είναι πολύπλοκη, συμπεριλαμβάνει ένα περιστρεφόμενο κώνο, μία κλίνη φυσαλίδων για τη καύση άνθρακα και τη μεταφορά άμμου πίσω στον αντιδραστήρα,
- Θέματα αναβάθμισης του συστήματος είναι αβέβαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ



Εικόνα 7: Σύστημα πυρόλυσης περιστρεφόμενου κώνου

Ο επόμενος πίνακας δείχνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων ειδών αντιδραστήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ταχεία πυρόλυση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΥΡΟΛΥΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

| Τύπος αντιδραστήρα | Κατάσταση | Απόδοση βιοελαίου ξηρής βιομάζας | Πολυπλοκότητα | Προδιαγραφές μεγέθους τροφοδοσίας | Απαιτήσεις αδρανούς αερίου | Μέγεθος αντιδραστήρα | Αναβάθμιση | Ποιότητα αερίου |
|------------------------------|--------------|----------------------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------|------------|-----------------|
| Ρευστοποιημένη κλίνη | Εμπορική | 75 wt.% | Μέτρια | Υψηλές | Υψηλές | Μέτριο | Εύκολη | Χαμηλή |
| Κινούμενη ρευστοστερέα κλίνη | Εμπορική | 75 wt.% | Υψηλή | Υψηλές | Υψηλές | Μέτριο | Εύκολη | Χαμηλή |
| Περιστρεφόμενου κώνου | Επίδειξης | 70 wt.% | Υψηλή | Υψηλές | Χαμηλές | Μικρό | Μέτρια | Υψηλή |
| Συμπαρασυρόμενης ροής | Εργαστηριακή | 60 wt.% | Μέτρια | Υψηλές | Υψηλές | Μέτριο | Εύκολη | Χαμηλή |
| Αφαιρετικής πυρόλυσης | Εργαστηριακή | 75 wt.% | Υψηλή | Χαμηλές | Χαμηλές | Μικρό | Δύσκολη | Υψηλή |
| Κοχλία | Πίλοτική | 60 wt.% | Μέτρια | Μέτριες | Χαμηλές | Μικρό | Μέτρια | Υψηλή |
| Πυρόλυσης σε κενό | Καμία | 60 wt.% | Υψηλή | Χαμηλές | Χαμηλές | Υψηλό | Δύσκολη | Μέτρια |

| | |
|--------------|----------------|
| Εμπορικός | 2 t/h - 20 t/h |
| Επίδειξης | 200-2000 kg/h |
| Πίλοτική | 20-200 kg/h |
| Εργαστηριακή | 1-20 kg/h |

Πίνακας 2 : Χαρακτηριστικά αντιδραστήρων παραγωγής βιοελαίου

1.4 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά έγινε περιγραφή της προετοιμασίας που υπόκειται η αρχική πρώτη ύλη – βιομάζα ώστε να είναι κατάλληλη προς επεξεργασία μέσω της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης. Στη συνέχεια, έγινε αναφορά στη τεχνολογία της ταχείας πυρόλυσης και στους αντιδραστήρες που είναι κατάλληλοι για παραγωγή βιοελαίου. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, θα γίνει περιγραφή του τελικού προϊόντος βιοελαίου, δηλαδή της χημικής του σύστασης, των ιδιοτήτων του καθώς και των επιπτώσεων του στο περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου.

2 ΒΙΟΕΛΑΙΟ

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο βιοέλαιο, όπου είναι το τελικό προϊόν, στη παραγωγή του οποίου αποσκοπεί η ταχεία πυρόλυση βιομάζας. Θα αναφερθούν κάποια από τα βασικά του στοιχεία, η χημική του σύσταση καθώς και οι ιδιότητες του. Επίσης, θα γίνει ανάλυση της σταθερότητας που παρουσιάζει, των επιπτώσεων του στο περιβάλλον και στην υγεία του ανθρώπου καθώς και στις διάφορες χρήσεις του. Επιπλέον, θα περιγραφούν οι απαραίτητες προδιαγραφές που οφείλει να έχει το βιοέλαιο ώστε να μπορέσει να καταστεί ως εναλλακτικό καύσιμο.

2.2 Ορισμός

Το βιοέλαιο έχει σκούρο καφέ χρώμα και καπνώδη οσμή. Η εμφάνιση του είναι ομογενής και από μακροσκοπικής άποψης είναι μονοφασικό υγρό. Σε μικροσκοπικό επίπεδο, παρόλα αυτά, αποτελείται από πλήθος πολυφασικών δομών. Πρόκειται για ένα μίγμα υγρής φάσης (20-30% κατά μάζα υγρασίας) και ενός μεγάλου αριθμού (άνω των 300) οργανικών και ανόργανων ενώσεων σύστασης C-H-O-N-S σε αναλογία μάζας 70-80%. Εδώ πρέπει να τονιστεί η διαφορά της προέλευσης μεταξύ του ενός μέρους του νερού του βιοελαίου, το οποίο προέρχεται από την αρχική υγρασία της βιομάζας και του άλλου το οποίο σχηματίζεται από H και O του στερεού C-H-O-N-S κομματιού του αρχικού καυσίμου μέσω της πυρόλυσης. Το νερό αυτό δεν είναι δυνατόν να διαχωριστεί από το υπόλοιπο μέρος του βιοελαίου με συμβατικές μεθόδους όπως η κλασματική απόσταξη. Το βιοέλαιο περιέχει και ένα πάρα πολύ μικρό ποσοστό στερεής τέφρας (<0.1% κατά βάρος). Οι ιδιότητες του βιοελαίου εξαιτίας της πολύπλοκης φύσης του υλικού αυτού μπορούν να περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων. Ακόμα και αν παραχθεί τέλεια, υπό όλες τις προϋποθέσεις επεξεργασίας που είναι απαραίτητες για την παραγωγή του βιοελαίου, η ίδια η βιομάζα τροφοδοσίας μπορεί να επηρεάσει τη φύση του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, εκτός απ τις διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους βιομάζας ακόμα και το μέρος όπου ένα συγκεκριμένο είδος καλλιεργείται μπορεί να επηρεάσει τα πράγματα. Όπως για παράδειγμα, η σύνθεση των ορυκτών που είναι παρών στη βιομάζα. Επίσης, δεν είναι ασυνήθιστο να παρατηρηθούν και παραλλαγές σε πολλές από τις φυσιο-χημικές ιδιότητες του βιοελαίου. Αυτό οφείλεται τόσο στη μη ομοιομορφία της πρώτης ύλης όσο και στην υψηλή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

θερμοκρασία στο περιβάλλον αντίδρασης. Δηλαδή, εκεί όπου εκτίθενται τα τμήματα των ατμών βιομάζας που προκύπτουν άμεσα κατά τη πυρόλυση



Εικόνα 8 : Βιοέλαιο

2.3 Χημική σύσταση του βιοελαίου

Όταν η βιομάζα υπόκειται σε πυρόλυση, οι δεσμοί διασπώνται για να παραχθούν τμήματα των αρχικών μακρο-πολυμερών: κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, το μεγαλύτερο μέρος του αρχικού οξυγόνου διατηρείται στα τμήματα, τα οποία στο σύνολο τους περιλαμβάνουν το βιοέλαιο. Έρευνες αναφέρουν ότι το βιοέλαιο περιέχει 45-50% κατά βάρος οξυγόνο, αλλά αυτό πιστεύεται ότι σχετίζεται με τη περιεκτικότητα σε νερό. Επίσης, μία άμεση ανάλυση του βιοελαίου δίνει ένα χημικό τύπο $CH_{1,9}O_{0,7}$ που αντιπροσωπεύει περίπου 46% οξυγόνο. Η διαφορά ανάμεσα στο οξυγόνο και την αρχική βιομάζα του βιοελαίου σχετίζεται με το πώς το οξυγόνο είναι συζευγμένο στις ενώσεις στα μόνιμα αέρια και πόση είναι η περιεκτικότητα του κατά βάρος. Το οξυγόνο είναι ενσωματωμένο στις περισσότερες από τις 300 ενώσεις(και περισσότερες) που έχουν ταυτοποιηθεί στο βιοέλαιο.

Οι παραπάνω ενώσεις μπορούν να καταταχθούν σε πέντε μεγάλες κατηγορίες : υδροξυαλδεύδες, υδροξυκετόνες, σάκχαρα, καρβοξυλικά οξέα και φαινόλες. Αυτές οι φαινόλες προέρχονται κυρίως από το συστατικό λιγνίνη της βιομάζας. Μία πιο λεπτομερής κατάταξη, κατηγοριοποιεί τις ενώσεις στις παρακάτω κατηγορίες : οξέα, αλκοόλες, αλδεύδες, εστέρες, κετόνες, φαινόλες, σάκχαρα, φουράνια, αλκένια, αρωματικές, ενώσεις αζώτου και οξυγονούχες ενώσεις. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση οποιασδήποτε μεμονωμένης χημικής ένωσης (μετά του νερού) είναι η υδροξυακεταλδεύδη σε ποσοστά μέχρι και 10% κατά βάρος. Αυτή ακολουθείται

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

από οξικό και μυρμηκικό οξύ περίπου 5% και 3% κατά βάρος αντίστοιχα. Αυτός είναι ο κύριος λόγος γιατί το βιοέλαιο παρουσιάζει pH στην περιοχή από 2.0-3.0.

Ο Πίνακας 3 παραθέτει τις χημικές ιδιότητες των βιοελαίων που παράγονται από τρεις διαφορετικούς τύπους βιομάζας: σημόδα, πεύκο και λεύκη. Η στήλη με το τίτλο <διάφορα> βάζει σε μια σειρά μία συλλογή από πάνω από 150 δείγματα βιοελαίου που παράγονται από μια ποικιλία πρώτων υλών (διαφορετικών οργανισμών).

| Ιδιότητα | Σημόδα | Πεύκο | Λεύκη | Διάφορα |
|--------------------------------|--------|-------|-------|-----------|
| Στερεά (wt%) | 0.06 | 0.03 | 0.045 | 0.01-1 |
| pH | 2.5 | 2.4 | 2.8 | 2.0-3.7 |
| Νερό (wt%) | 18.9 | 17.0 | 16.8 | 15-30 |
| Πυκνότητα (kg/m ³) | 1.25 | 1.24 | 1.20 | 1.2-1.3 |
| Ιξώδες, cSt @50°C | 28 | 28 | 13.5 | 13-80 |
| LHV (MJ/kg) | 16.5 | 17.2 | 17.3 | 13-18 |
| Στάχτη (wt%) | 0.004 | 0.03 | 0.007 | 0.004-0.3 |
| CCR(wt%) | 20 | 16 | N/M | 14-23 |
| C(wt%) | 44.0 | 45.7 | 48.1 | 32-49 |
| H(wt%) | 6.9 | 7.0 | 5.3 | 6.9-8.6 |
| N(wt%) | <0.1 | <0.1 | 0.14 | 0.0-0.2 |
| S(wt%) | 0.00 | 0.02 | 0.04 | 0.0-0.05 |
| O(wt%) | 49.0 | 47.0 | 46.1 | 44-60 |
| Na+K (ppm) | 29 | 22 | 2 | 5-500 |
| Ca(ppm) | 50 | 23 | 1 | 4-600 |
| Mg(ppm) | 12 | 5 | 0.7 | N/M |
| Σημείο ανάφλεξης(°C) | 62 | 95 | 64 | 50-100 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

| | | | | |
|-----------------|-----|-----|-----|--------|
| Σημείο ροής(°C) | -24 | -19 | N/M | -36 -9 |
|-----------------|-----|-----|-----|--------|

Πίνακας 3 : Ιδιότητες βιοελαίου από διάφορες πρώτες ύλες

Επίσης, η χημεία των βιοελαίων είναι δυνατό να επηρεαστεί είτε μεταβάλλοντας τις θερμικές συνθήκες στις οποίες παράγονται είτε με τη παρουσία καταλυτών κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πυρόλυσης. Είναι γνωστό ότι, αυξάνοντας την ευαισθησία της πυρόλυσης (σχέση χρόνου/θερμοκρασίας) το χημικό προφίλ των τελικών ελαίων μεταβάλλεται.

2.4 Ικανότητα αποθήκευσης του βιοελαίου (σταθερότητα)

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της μετατροπής της στερεάς βιομάζας σε υγρό βιοέλαιο είναι η ικανότητα να αποθηκεύεται μέχρι να χρειαστεί η άμεση χρήση του για ενέργεια. Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας η μακροπρόθεσμη ικανότητα αποθήκευσης των βιοελαίων ήταν αρκετά δύσκολη και έπρεπε να ξεπεράσει αρκετά προβλήματα. Το κυριότερο από αυτά ήταν η αργή σταδιακή αύξηση στο ιξώδες των προσφάτων παραχθέντων ελαίων. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται επίσης και στα καύσιμα που προέρχονται από το πετρέλαιο αλλά με πολύ λιγότερο ρυθμό. Για να αντιληφθεί κάποιος καλύτερα τη διαφορά, τα καύσιμα υδρογονανθράκων μπορούν να αποθηκευτούν για περιόδους έως και έξι μήνες, ενώ το βιοέλαιο ανάλογα με τις ιδιότητες του ελαίου φαίνεται να έχει διάρκεια ζωής από εβδομάδες ή το πολύ μέχρι μερικούς μήνες. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι αυτή η διάρκεια ζωής μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό. Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα που παρατηρήθηκε στα βιοέλαια και φάνηκε να συμβαδίζει με την αύξηση στο ιξώδες ήταν η αλλαγή φάσης. Αρχικά ο σχηματισμός του ξεκίνησε ως προϊόν μίας φάσης και επομένως εν συνεχεία μπορεί να μετασχηματιστεί σε υψηλού μοριακού βάρους πολλαπλές φάσεις όπως πίσσες, λάσπες, κεριά και νερό. Επιπλέον, οι καυστήρες καύσης, τα ακροφύσια έγχυσης και άλλες συσκευές τελικής χρήσης έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν με υγρά που έχουν σταθερές ιδιότητες. Συνεπώς, προκειμένου να κερδίσει την αποδοχή από τους τελικούς χρήστες αυτών των ελαίων αυτό ήταν μία σημαντική τεχνική πρόκληση που έπρεπε να ξεπεραστεί.

Η παραγωγή των βιοελαίων από ταχεία πυρόλυση είναι μία μη ισορροπημένη θερμοδυναμική διαδικασία. Τόσο οι σύντομοι χρόνοι παραμονής στη ζώνη υψηλής θερμοκρασίας της διαδικασίας όσο και η ταχεία θερμική απόσβεση εν συνεχεία οδηγούν σε ένα υγρό προϊόν που δεν είναι επίσης σε ισορροπία. Επιπλέον, οι πολλές οξυγονωμένες ενώσεις που εμφανίζονται στο βιοέλαιο προσπαθούν να επιτύχουν ισορροπία κατά τη διάρκεια αποθήκευσης τους οδηγώντας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

όμως σε πρόσθετες χημικές αντιδράσεις. Συνεπώς, αυτές οι αντιδράσεις προκαλούν αυξήσεις του μέσου μοριακού βάρους και κατά συνέπεια αυξάνουν το ιξώδες του ελαίου.

Τα σωματίδια άνθρακα που εμφανίζονται στο βιοέλαιο έχουν επίσης πολύ σημαντικές επιπτώσεις στο ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται το ιξώδες σε αυτά τα έλαια. Η ανάλυση των σωματιδίων άνθρακα έδειξε τελικώς ότι ένα σημαντικό ποσοστό του ανόργανου υλικού μένει εκτεθειμένο στην επιφάνεια τους. Επίσης, τα ανόργανα υλικά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από μέταλλα αλκαλίων(Na , K) και αλκαλικών γαιών(Ca , Mg). Ένας καταλύτης γνωστός για την επίδραση στις αντιδράσεις σχηματισμού του άνθρακα κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης είναι το αλκαλικό μέταλλο κάλιο. Οι Diebold and Czernik (1997) γνωρίζοντας τι συμβαίνει μεταξύ των γνωστών ενώσεων στο βιοέλαιο προσπάθησαν με την προσθήκη διαφόρων διαλυτών (συμπεριλαμβανομένου του νερού) να διακόψουν χημικά την διαμόρφωση μοριακών αντιδράσεων στα βιοέλαια. Από όλες τις περιπτώσεις διαλυτών που διερευνήθηκαν η μεθανόλη έδειξε τα μεγαλύτερα οφέλη και ήταν και η λιγότερο δαπανηρή μέθοδος. Γενικά, με τη προσθήκη ενός διαλύτη βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό η ποιότητα του βιοελαίου μειώνοντας το ιξώδες του, αλλά παράλληλα συμβάλλει στην αύξηση της θερμαντικής του αξίας.

2.5 Χρήσεις βιοελαίου

Το βιοέλαιο έχει τη δυνατότητα να είναι αντικείμενο σε πολλαπλές εφαρμογές. Εφαρμογές, που κυμαίνονται από επιλογές συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας έως και εξαγωγή επιλεγμένων χημικών. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο υδρογονανθράκων καυσίμων σε συμβατικές μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή παραγωγής ατμού αλλά δεν έχει εγκριθεί ακόμα στο εμπόριο. Αυτό, οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο έχουν χαμηλότερα κόστη σε σύγκριση με αυτά των βιοελαίων. Ωστόσο, θα πρέπει ακόμα να ρυθμιστούν ζητήματα που αφορούν τη ποιότητα του βιοελαίου, ιδίως σε ορισμένες πιο εξελιγμένες εφαρμογές όπως στους κινητήρες εσωτερικής καύσης και τις ανεμογεννήτριες αερίωσης. Η αναβάθμιση των βιοελαίων σε υψηλότερης αξίας καύσιμα μεταφορών απαιτεί απο-οξυγόνωση καθώς επίσης και μεταρρύθμιση των περισσοτέρων ενώσεων που είναι παρούσες στο βιοέλαιο. Επιπλέον, εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας οξυγόνου που εμφανίζεται θα έχουμε απώλεια στην απόδοση της μάζας(ή όγκου), αλλά αυτό θα αντισταθμιστεί έναντι των υψηλότερων θερμαντικών τιμών.

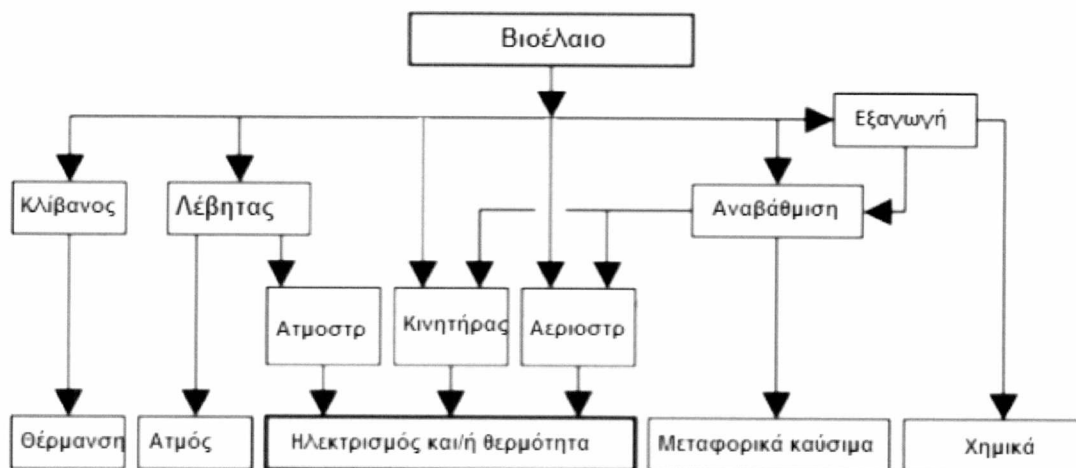
Τα βιοέλαια κάνοντας μικρές μόνο τροποποιήσεις στις μηχανές έχουν τη δυνατότητα να αντικαταστήσουν για χαμηλές έως και μέτριες ταχύτητες σταθερών κινητήρων ντίζελ, το συμβατικό καύσιμο ντίζελ. Ωστόσο, παρατηρούνται ορισμένες δυσκολίες όπως : το βιοέλαιο είναι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

πολύ δύσκολο να αυταναφλεχθεί χωρίς τη προσθήκη σημαντικών ποσοτήτων νιτρικών (πρόσθετα ανάφλεξης) και τα ιζήματα άνθρακα που σχηματίζονται στα μπεκ έγχυσης μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα έμφραξης. Παρόλα αυτά, οι δυσκολίες που εμφανίζονται λόγω φθοράς και διάβρωσης φαίνεται να είναι επιλύσιμες. Προκειμένου να υλοποιηθεί αυτό πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα τα υλικά για τα βασικά εξαρτήματα της μηχανής καθώς και να βελτιωθεί η διαδικασία της αφαίρεσης των σωματιδίων από το έλαιο.

Οι αεριοστρόβιλοι καύσης είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία που προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής ενέργειας και θερμότητας με σχετικά υψηλή αποδοτικότητα. Η τροφοδοσία τους γίνεται κυρίως με αποστάγματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Ωστόσο, αν σχεδιαστούν σωστά, σε συνδυασμό με κατάλληλες προδιαγραφές καυσίμων, θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργήσουν με οποιοδήποτε καύσιμο, συμπεριλαμβανομένου και του βιοελαίου. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες προκειμένου να διερευνηθεί η χρήση των βιοελαίων στις διάφορες εφαρμογές των αεριοστρόβιλων καύσης. Όπως και με τις εφαρμογές στους κινητήρες ντίζελ έτσι και εδώ τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν ότι η λειτουργία τουρμπίνων μέσω της χρήσης των βιοελαίων είναι πράγματι εφικτό να υλοποιηθεί.

Η τελική χρήση του βιοελαίου ανάλογα με την επεξεργασία που ακολουθεί μπορεί να είναι: παραγωγή θερμότητας (μέσω άμεσης καύσης), παραγωγή ατμού, ηλεκτρισμός ή συνδυασμένη παραγωγή ισχύος και θερμότητας (μέσω ατμοπαραγωγών, μηχανών εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλων) και καύσιμα κίνησης. Τα ενδιάμεσα βήματα διεργασιών που ενδέχεται να περνά το βιοέλαιο προκειμένου να είναι ικανό για χρήση είναι η αναβάθμιση της ποιότητας του με καταλύτες, η χημική του επεξεργασία ή αεριοποίηση και η κατάλληλη διαχείριση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ορισμένες από τις τελικές χρήσεις του βιοελαίου.



Εικόνα 9 : Χρήσεις βιοελαίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

2.6 Προδιαγραφές βιοελαίου

Εάν υπήρχε ένα ενιαίο σύνολο πρότυπων προδιαγραφών για το βιοέλαιο θα διευκόλυνε σε μεγάλο βαθμό τους σχεδιαστές των διαφόρων συσκευών τελικής χρήσης. Διότι, θα μπορούσαν να επιλέξουν τα κατάλληλα υλικά και να κάνουν τις απαραίτητες αλλαγές στο σχεδιασμό προκειμένου να επιτευχθεί πολύ καλύτερη απόδοση από την μέχρι τώρα αποδεδειγμένη. Είναι λογικό, ότι, προκειμένου η τεχνολογία της πυρόλυσης βιομάζας να μπορέσει να έχει εμπορική αποδοχή θα απαιτήσει να καθοριστούν αυτές οι προδιαγραφές. Δυστυχώς, σε αυτόν τον τομέα κατά τη διάρκεια όλων αυτών των ετών υπήρξε μικρή πρόοδος.

Το 1996, όσον αφορά τη διεργασία της πυρόλυσης, σύμφωνα με τη Διεθνή ενεργειακή συμφωνία που έγινε με την επωνυμία Task XIII προτάθηκε μια σειρά προδιαγραφών για το βιοέλαιο. Οι προδιαγραφές αυτές είχαν διαμορφωθεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του οργανισμού ASTM για τα καύσιμα υδρογονανθράκων. Η προσπάθεια αυτή έγινε προκειμένου να μιμηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο τις βασικές ιδιότητες που καθορίζονται για τα καύσιμα πετρελαίου. Σε αυτή τη περίπτωση, ο κατασκευαστής του εξοπλισμού τελικής χρήσης θα χρειαστεί να τροποποιήσει τη συσκευή σε σχετικά μικρό βαθμό προκειμένου να λειτουργήσει με καύσιμο το βιοέλαιο. Οι προτεινόμενες προδιαγραφές από αυτή τη συμφωνία παρατίθενται στο παρακάτω πίνακα.

| Property | Light Bio-oil (~ASTM #2) | Light-Medium Bio-oil (~ASTM #4) | Medium Bio-oil (~PURL 100) | Heavy Bio-oil (~CAN 6) |
|--------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Viscosity, cSt | 1.9-3.4 FO 1.9-4.1 D 1.9-4.1 GT @40°C | 5.5-24 @40°C | 17-100 @50°C | 100-638 @50°C |
| Ash,wt% | 0.05 FO D 0.01 GT | 0.05 FO 0.01 D | 0.10 FO | 0.10 FO |
| Pour point, °C min | Report | Report | Report | Report |
| Conradson carbon, | Report | Report | Report | Report |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

| | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| wt% | | | | |
| Max 0.1 µm filtered ethanol insol. solids, wt% | 0.01 FO | 0.05 | 0.10 | 0.25 |
| Accelerated aging rate@90°C,cSt/hr | Report | Report | Report | Report |
| Water, wt% of wet oil,max | 32 | 32 | 32 | 32 |
| LHV,MJ/L min,wet oil | 18 | 18 | 18 | Report |
| C, wt% dry | Report | Report | Report | Report |
| H, wt% dry | - | - | - | - |
| O, wt% dry | - | - | - | - |
| S, wt% dry | Max | Max | .2 Max | .4 Max |
| N, wt% dry | Max | Max | .3 Max | .4 Max |
| K+Na,ppm | Report 0.5GT | Report | Report | Report |
| Phase stability @20°C after 8hr @90°C | Single phase | Single phase | Single phase | Single phase |
| Flash point,°C minimum | 52 | 55 | 60 | 60 |
| Density, kg/m ³ | Report | Report | Report | Report |

Πίνακας 4 : Προτεινόμενες προδιαγραφές για διάφορες κατηγορίες βιοελαίου

Όπως με τα καύσιμα πετρελαίου, έτσι και οι προαναφερθείσες προδιαγραφές είναι δομημένες σύμφωνα με το ιζώδες και τη περιεκτικότητα του βιοελαίου σε τέφρα. Κυρίως αυτές οι ιδιότητες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις συσκευές τελικής χρήσης. Γενικά, σε όλες αυτές τις αρχικές προτάσεις για τις προδιαγραφές του βιοελαίου είναι πολύ πιθανόν να συμβούν και προσαρμογές σε αυτές τις τιμές. Γεγονός που δικαιολογείται, αφού με τη πάροδο του χρόνου αποκτάται μεγαλύτερη εμπειρία σχετικά με τη χρήση του βιοελαίου ως καύσιμο στις διάφορες συσκευές τελικής χρήσης.

2.7 Επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία

Δεδομένου του μεγάλου αριθμού ενώσεων που υπάρχουν στο βιοέλαιο, είναι λογικό να προκαλούνται ανησυχίες σχετικά με την ανθρώπινη υγεία και τις επιπτώσεις που ενδεχομένως να έχει αυτό το υλικό στο περιβάλλον. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, περισσότερες από 300 ειδικές ενώσεις έχουν εντοπιστεί στη βιομάζα του ελαίου πυρόλυσης και ορισμένες από αυτές είναι γνωστές ως καρκινογόνες ουσίες όπως είναι το βενζόλιο και το φαινανθρένιο. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές ενώσεις στο βιοέλαιο που δεν έχουν αναγνωρισθεί και η τοξικότητά τους καθώς και οι επιπτώσεις τους στην υγεία δεν είναι γνωστές από την ερευνητική κοινότητα ανάπτυξης της τεχνολογίας της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας. Επομένως, αυτό είναι ένα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να διευθετηθεί για την ενδεχόμενη εμπορευματοποίηση αυτής της τεχνολογίας.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα έλαια που παράγονται σε χαμηλότερη διάσπαση (πυρόλυση) ή θερμικό περιορισμό φαίνεται να είναι σχετικά πιο ήπια αλλά όσο οι περιορισμοί αυξάνονται ενισχύεται και η εμφάνιση καρκίνου. Η έκθεση σε πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH) σχετίζεται με την υψηλή συχνότητα εμφάνισης του καρκίνου. Γεγονός το οποίο γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στον κλάδο της βιομηχανίας πίσσας άνθρακα. Αυτοί οι υδρογονάνθρακες (PAH) μπορούν επίσης να προκύψουν και μέσα από τη βιομάζα κάτω από αντίξοες συνθήκες πυρόλυσης. Ευτυχώς, όμως η παραγωγή υψηλών αποδόσεων βιοελαίου απαιτεί συνθήκες λειτουργίας βασιζόμενες στις χαμηλότερες συνθήκες διάσπασης (πυρόλυσης).

Κατά τη διερεύνηση των πτυχών της διαδικασίας της ταχείας πυρόλυσης στην υγεία, το επίκεντρο της έρευνας ήταν εξ ολοκλήρου το υγρό προϊόν. Διότι, ορισμένες από τις αναγνωρισμένες ενώσεις είναι γνωστές ως καρκινογόνες ουσίες. Επιπλέον, σε πολλές από τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για ταχεία πυρόλυση, ο άνθρακας μπορεί να είναι κονιοροποιημένος σε πολύ μικρά μεγέθη. Μάλιστα, ορισμένα σωματίδια του είναι πολύ πιθανό να έχουν εύρος μεγέθους από 2.5-10 μm. Επομένως, ενέχουν σοβαρούς κινδύνους στο αναπνευστικό σύστημα. Συνεπώς, μια βιομηχανία πυρόλυσης προκειμένου να προστατέψει τους εργαζομένους της, δεδομένου των επιπτώσεων των σωματιδίων στην ανθρώπινη υγεία τους, οφείλει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των εκθέσεων του OSHA. Θα ήταν σκόπιμο σε οποιαδήποτε μελλοντική μελέτη τοξικολογίας να περιλαμβάνεται και η αξιολόγηση της ασφάλειας και της υγείας.

Ένα ακόμα ζήτημα σημαντικής περιβαλλοντικής σημασίας και ασφάλειας είναι το χαμηλό pH των βιοελαίων. Σε μελέτες που διεξήχθησαν, δεν υπήρχε καμία σχετική αναφορά για τυχόν επιβλαβείς συνέπειες από την επαφή του ανθρώπου με το όξινο βιοέλαιο. Επίσης, εάν το pH του ελαίου κυμαίνεται από 2.0-2.5, τότε το έλαιο είναι πιθανό να έχει επιβλαβείς συνέπειες στα μάτια αλλά δεν έχει τεκμηριωθεί πλήρως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

Το βιοέλαιο βιοϋποβαθμίζεται ευκολότερα στα εδάφη, με ρυθμούς σημαντικά υψηλότερους, σε σχέση με τα καύσιμα υδρογονανθράκων. Επίσης, το ίδιο ισχύει και για την βιοαποικοδόμηση σε νερό. Ωστόσο, στη περίπτωση μιας μεγάλης διαρροής σε ένα ποτάμι, λίμνη ή ρεύμα, το χαμηλό pH αυτών των ελαίων θα έχει προφανώς αρνητικές συνέπειες στην υδατοκαλλιέργεια. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλά παραδείγματα διαρροής βυτιοφόρων δίπλα σε δρόμους με ποτάμια, λίμνες ή ακόμα και μέσα σε θάλασσες, δεν θα ήταν αδύνατο να συμβεί αντίστοιχα κάτι παρόμοιο και στη μεταφορά των βιοελαίων.

2.8 Προτάσεις αναβάθμισης του βιοελαίου

Όπως σημειώθηκε στη προηγούμενη ενότητα, η ποιότητα του βιοελαίου μπορεί να βελτιωθεί και να αναβαθμιστεί σε υψηλότερο βαθμό και επομένως να πωλείται σε υψηλότερη τιμή. Η απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος προκειμένου το βιοέλαιο να έρθει στην επιθυμητή περιοχή ιξώδους, περιλαμβάνει τη προσθήκη διαλυτών ή περιορισμένων ποσοτήτων νερού. Επίσης μπορούν να προκύψουν πρόσθετα οφέλη εάν χρησιμοποιηθούν ως διαλύτες αλκοόλες, αφού θα αναπροσαρμοστεί η θερμαντική αξία όπως επίσης και θα βελτιωθεί η μακροχρόνια ιδιότητα αποθήκευσης του. Επιπλέον, με τη διαδικασία της διήθησης, τα στερεά που βρίσκονται υπό τη μορφή τέφρας και τα κονιοροποιημένα μέσα ρευστοποιήσης μπορούν να απομακρυνθούν. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε όταν είναι ζεστό το έλαιο (φάση ατμών) είτε μετά τη συμπύκνωση του. Δυστυχώς, αυτό το στάδιο επεξεργασίας θα προσθέσει επιπλέον πολυπλοκότητα και επιπρόσθετα κόστη λειτουργίας στο τελικό προϊόν. Αυτές οι φυσικές τεχνικές αναβάθμισης μπορεί να βελτιώσουν τη ποιότητα του καθαρού βιοελαίου αλλά θα εξακολουθούν να απαιτούν το σχεδιασμό του εξοπλισμού τελικής χρήσης.

Η συσκευή τελικής χρήσης θα απαιτούσε λίγη ή καμία τροποποίηση εάν το βιοέλαιο μπορούσε να αναβαθμιστεί χημικά, διότι θα παραγόταν ένα προϊόν που θα έμοιαζε περισσότερο στους υδρογονάνθρακες πετρελαίου. Αυτός θα ήταν ο πιο γρήγορος τρόπος προκειμένου το βιοέλαιο να κερδίσει την αποδοχή των καυσίμων βιομάζας. Ουσιαστικά, αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει την απο-οξυγόνωση και μετέπειτα την αναμόρφωση των υπολοίπων υδρογονανθράκων. Γενικά, για τη χημική αναβάθμιση του βιοελαίου έχουν διερευνηθεί δύο προσεγγίσεις: η καταλυτική πυρόλυση και η καταλυτική υδρογονοκατεργασία.

Υπάρχουν μια σειρά από εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν προκειμένου να προωθηθεί το βιοέλαιο ως εναλλακτικό καύσιμο. Ορισμένα από αυτά είναι :

- Δεν υπάρχουν παγκόσμια αποδεκτά πρότυπα ή προδιαγραφές για το βιοέλαιο,

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΟΕΛΑΙΟ

- Η ποιότητα και η συνεχής ροή παραγωγής του βιοελαίου πρέπει να είναι καθορισμένες, ιδίως όσον αφορά τη σταθερότητα και την αποθήκευση του ελαίου,
- Πρέπει να καθοριστούν οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, η ασφάλεια και η υγεία του προσωπικού παραγωγής σε ενδεχόμενη έκθεση τους στο βιοέλαιο. Η ανάγκη αυτή είναι επίσης σημαντική και για τους καταναλωτές που θα χρησιμοποιούν το προϊόν,
- Ιδιαίτερα εάν τα ζητήματα υγείας και ασφάλειας είναι άγνωστα η δημόσια αποδοχή μπορεί να είναι ένα ζήτημα. Η οσμή επίσης είναι ένα άλλο ζήτημα που σχετίζεται με τη δημόσια αποδοχή. Το βιοέλαιο έχει μια ισχυρή καπνώδης μυρωδιά που είναι απίθανο να καλυφθεί από άλλες ενώσεις,
- Ένα βραχυπρόθεσμο τεχνικό εμπόδιο, είναι η έλλειψη επαρκούς εφοδιασμού βιοελαίου για μακροπρόθεσμη δοκιμή σε καυστήρες και συσκευές για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επί του παρόντος υπάρχει ένας περιορισμένος αριθμός πηγών για τη παραγωγή βιοελαίου και μικρή υποστήριξη για τη χρηματοδότηση των γραμμών παραγωγής τους,
- Είναι ανάγκη να εδραιωθεί ένα φράγμα πολιτικής ώστε να διασφαλίσει μακροπρόθεσμες προμήθειες πόρων βιομάζας. Αυτό είναι ένα ευρέως διαδεδομένο πρόβλημα για όλες τις τεχνολογίες αξιοποίησης βιομάζας και θα αποτρέψει την εισροή επενδυτικών κεφαλαίων, εκτός και αν επιλυθεί τελικά. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ευνοϊκό επενδυτικό κλίμα θα είναι απαραίτητος ένας ελάχιστος εγγυημένος εφοδιασμός δέκα χρόνων.

2.9 Επίλογος

Οι ερευνητές κυρίως τα τελευταία 25 χρόνια έχουν μάθει πολλά σχετικά με την επιστήμη και τη τεχνολογία της πυρόλυσης βιομάζας. Αυτή η βάση γνώσεων οφείλεται στην ευρεία κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του βιοελαίου. Ωστόσο, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν σημαντικά τεχνικά και οικονομικά ζητήματα. Στην επόμενη ενότητα, γίνεται η ανάλυση ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει μια γενική εφοδιαστική αλυσίδα βιοκαυσίμων. Η εμπορική αποδοχή του βιοελαίου θα πρέπει να συνδυαστεί με ένα κατάλληλο δίκτυο διανομής, αφού θα πρέπει να παράγονται μεγάλες ποσότητες που θα μπορούν να καλύψουν την υπάρχουσα ζήτηση καυσίμου.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε η ανάλυση του βιοελαίου, ως ένα προϊόν δεύτερης γενιάς βιοκαυσίμων, προερχόμενο από κατάλληλη επεξεργασία βιομάζας μέσω της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση των μαθηματικών μοντέλων που αφορούν μια γενική εφοδιαστική αλυσίδα βιοκαυσίμων. Με ένα κατάλληλο δίκτυο διανομής η αποδοχή του βιοελαίου από την παγκόσμια αγορά ως μια νέα πηγή καυσίμων θα βοηθηθεί σε μεγάλο βαθμό. Στόχος αυτής της ενότητας είναι να γίνει η κατάλληλη εγκατάσταση της εφοδιαστικής αλυσίδας ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό της κόστος.

3.2 Σημασία της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας

Ο σχεδιασμός τόσο της εφοδιαστικής αλυσίδας όσο και του επιχειρηματικού σχεδιασμού είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη βιομηχανία των καυσίμων. Η παραγωγή των πρώτων υλών καθώς και τα logistics αποτελούν το 35% ή περισσότερο του συνολικού κόστους παραγωγής των προηγμένων βιοκαυσίμων. Σε γενικές γραμμές, το κόστος της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να αποτελεί έως και 50-75% του κόστους της πρώτης ύλης. Επομένως, προκειμένου να διευκολυνθεί η εμπορευματοποίηση της παραγωγής των βιοκαυσίμων είναι σημαντικό να διερευνηθούν ορισμένα ζητήματα. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι ο βέλτιστος αριθμός και οι τοποθεσίες των βιοδιυλιστηρίων καθώς και η βέλτιστη κατανομή των πρώτων υλών και των βιοκαυσίμων. Το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο θα περιγραφεί παρακάτω συντάχθηκε από τους Leilei Zhang and Guiping Hu (2013) «Supply chain design and operational planning models for biomass to drop-in fuel production», Biomass&Bioenergy (2013) pp. 238-250.

3.3 Περιγραφή του Μοντέλου

Αυτή η μελέτη, χρησιμοποιώντας ένα μικτό ακέραιο γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού, στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής των βιοκαυσίμων. Το προτεινόμενο μοντέλο, αφού εξετάσει διάφορα σενάρια ζήτησης βιοκαυσίμων στοχεύει στη βελτιστοποίηση του αριθμού των εγκαταστάσεων βιοδιυλιστηρίων, των χωρητικότητων των εγκαταστάσεων, στις περιοχές καθώς και στις κατανομές μεταξύ της βιομάζας και των βιοκαυσίμων. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει εκτός από συνεχείς και δυαδικές μεταβλητές. Στις επόμενες ενότητες, παρουσιάζεται ένα ετήσιο μοντέλο βελτιστοποίησης Ενότητα 3.4 για να μελετήσει τις στρατηγικές απόφασης της αλυσίδας εφοδιασμού των βιοκαυσίμων. Επιπλέον, αντίστοιχα με το ετήσιο μοντέλο, στην Ενότητα 3.5 παρουσιάζεται ένα πιο λεπτομερές μοντέλο επιχειρησιακού σχεδιασμού πολλαπλών χρονικά περιόδων. Στη δεύτερη μοντελοποίηση αναλύεται περαιτέρω η διαχείριση της παραγωγής και της κατανομής των βιοκαυσίμων. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει την ονοματολογία δεικτών, δεδομένων, μεταβλητών και παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο ετήσιο καθώς και στο πολλαπλά χρονικά περιόδων μοντέλο.

Δείκτες

| | |
|----------|---|
| <i>i</i> | Υποδεικνύει τις τοποθεσίες εφοδιασμού βιομάζας , |
| <i>J</i> | Υποδεικνύει τις τοποθεσίες των βιοδιυλιστηρίων , |
| <i>K</i> | Υποδεικνύει τις τοποθεσίες ζήτησης των βιοκαυσίμων , |
| <i>L</i> | Υποδεικνύει τα επίπεδα χωρητικότητας των βιοδιυλιστηρίων , |
| <i>T</i> | Υποδεικνύει όλες τις χρονικές περιόδους μέσα σε ένα χρόνο . |

Σύνολα

| | |
|----------|--|
| <i>I</i> | Σύνολο από τοποθεσίες εφοδιασμού βιομάζας , |
| <i>J</i> | Σύνολο από τοποθεσίες βιοδιυλιστηρίων, |
| <i>K</i> | Σύνολο από τοποθεσίες ζήτησης βιοκαυσίμων , |
| <i>L</i> | Σύνολο από επίπεδα χωρητικότητας βιοδιυλιστηρίων , |
| <i>T</i> | Σύνολο από χρονικές περιόδους μέσα σε ένα χρόνο . |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

| Παράμετροι Πρώτης Ύλης | |
|----------------------------------|--|
| A_i | Διαθέσιμη πρώτη ύλη στη τοποθεσία i σε ένα έτος , |
| $A_{i,t}$ | Διαθέσιμη πρώτη ύλη στη τοποθεσία i κατά το μήνα t , |
| h_i^S | Μοναδιαίο κόστος διατήρησης της πρώτης ύλης ανά μήνα στη τοποθεσία i , |
| U_i^S | Μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης για τη τοποθεσία i , |
| D_{ij} | Απόσταση από τη τοποθεσία i στο βιοδυλιστήριο j , |
| S_i | Συντελεστής βιωσιμότητας για τη τοποθεσία i , |
| l_1 | Συντελεστής απωλειών υλικών της πρώτης ύλης στη διάρκεια ενός έτους , |
| l_2 | Συντελεστής απωλειών υλικών της πρώτης ύλης για κάθε μήνα , |
| τ | Συντελεστής διαχυτότητας , |
| $C_i^{S,CL}$ | Κόστος συλλογής και φόρτωσης της πρώτης ύλης στη τοποθεσία i , |
| $C_{ij}^{S,T}$ | Κόστος μεταφοράς της πρώτης ύλης από τη τοποθεσία i στο βιοδυλιστήριο j . |
| Παράμετροι Βιοδυλιστηρίων | |
| \underline{U}_{lt}^B | Ελάχιστη ποσότητα επεξεργασίας βιομάζας στο μήνα t για επίπεδο χωρητικότητας l , |
| \overline{U}_{lt}^B | Μέγιστη ποσότητα επεξεργασίας βιομάζας στο μήνα t για επίπεδο χωρητικότητας l , |
| $h_j^{B,B}$ | Μοναδιαίο κόστος διατήρησης της βιομάζας στο βιοδυλιστήριο j ανά μήνα , |
| $h_j^{B,G}$ | Μοναδιαίο κόστος διατήρησης του βιοκαυσίμου στο βιοδυλιστήριο j ανά μήνα , |
| $U_j^{B,B}$ | Μέγιστο επίπεδο αποθήκευσης της βιομάζας στο βιοδυλιστήριο j , |
| $U_j^{B,G}$ | Μέγιστο επίπεδο αποθήκευσης του βιοκαυσίμου στο βιοδυλιστήριο j , |
| B_{jl} | Αν το επίπεδο l υπάρχει στο βιοδυλιστήριο j , παίρνει τιμές 0 και 1 , |
| U_l^B | Σταθερή χωρητικότητα του βιοδυλιστηρίου για επίπεδο χωρητικότητας l σε ένα χρόνο , |
| C_l^B | Σταθερό κόστος του βιοδυλιστηρίου για επίπεδο χωρητικότητας l , |
| $D1_{jk}$ | Απόσταση από το βιοδυλιστήριο j στη τοποθεσία ζήτησης k , |
| Y_j | Αναλογία μετατροπής της βιομάζας σε βιοκαύσιμο στο βιοδυλιστήριο j , |
| $C_j^{G,C}$ | Μοναδιαίο κόστος μετατροπής του βιοκαυσίμου στο βιοδυλιστήριο j , |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

| | |
|----------|---|
| Γ | Μοναδιαίος συντελεστής μετατροπής από γαλόνι σε τόνο, |
| Q | Προϋπολογισμός για τις εγκαταστάσεις των βιοδυλιστηρίων , |
| H | Μακροπρόθεσμος ορίζοντας προγραμματισμού , |
| R | Ετήσιο επιτόκιο για επενδύσεις. |

Παράμετροι Ζήτησης και Τοποθεσίας Βιοκαυσίμων

| | |
|----------------|---|
| M | Αριθμός τοποθεσιών ζήτησης , |
| G_k | Συνολική ζήτηση των βιοκαυσίμων για τη τοποθεσία k , |
| G_{kt} | Συνολική ζήτηση των βιοκαυσίμων για τη τοποθεσία k το μήνα t , |
| $G_{jk}^{G,T}$ | Κόστος μεταφοράς των βιοκαυσίμων από τα βιοδυλιστήρια j στη τοποθεσία ζήτησης k |
| h_k^M | Μοναδιαίο κόστος διατήρησης των βιοκαυσίμων στη τοποθεσία ζήτησης k ανά μήνα, |
| U_k^M | Επίπεδο αποθέματος βιοκαυσίμων στη τοποθεσία ζήτησης k . |

Συνεχείς Μεταβλητές

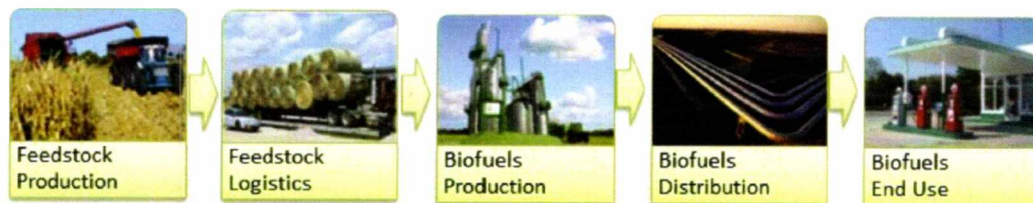
| | |
|----------------|---|
| f_{ij} | Η ροή της πρώτης ύλης βιομάζας από τη τοποθεσία i στο βιοδυλιστήριο j , |
| $f_{ij,t}$ | Η ροή της πρώτης ύλης βιομάζας από τη τοποθεσία i στο βιοδυλιστήριο j το μήνα t , |
| q_{jk} | Η ροή του βιοκαυσίμου από τη τοποθεσία j στη τοποθεσία ζήτησης k , |
| q_{jkt} | Η ροή του βιοκαυσίμου από τη τοποθεσία j στη τοποθεσία ζήτησης k το μήνα t , |
| u_{it} | Η ποσότητα συγκομιδής της πρώτης ύλης στη τοποθεσία i το χρόνο t , |
| q_{jt}^B | Η ποσότητα επεξεργασίας της βιομάζας στο βιοδυλιστήριο j το χρόνο t , |
| I_{it}^S | Το επίπεδο αποθεμάτων πρώτης ύλης στη τοποθεσία i το χρόνο t , |
| $I_{jt}^{B,B}$ | Το επίπεδο αποθεμάτων πρώτης ύλης στο βιοδυλιστήριο j το χρόνο t , |
| $I_{jt}^{B,G}$ | Το επίπεδο αποθεμάτων βιοκαυσίμων στο βιοδυλιστήριο j το χρόνο t , |
| I_{kt}^M | Το επίπεδο αποθεμάτων βιοκαυσίμων στη τοποθεσία ζήτησης k το χρόνο t . |

Δυναμικές Μεταβλητές

δ_{jl} Ισούται με 1 αν λειτουργεί το βιοδιυλιστήριο επιπέδου l στη τοποθεσία j , διαφορετικά με 0.

Πίνακας 5 : Ονοματολογία δεικτών, δεδομένων, παραμέτρων και μεταβλητών

Στο Σχήμα 10 απεικονίζεται η γενική αλυσίδα εφοδιασμού της βιομάζας για τη παραγωγή και τη διανομή των βιοκαυσίμων. Αρχικά, η βιομάζα συλλέγεται και προ-επεξεργάζεται σε μικρά σωματίδια στις διάφορες τοποθεσίες προκειμένου να είναι έτοιμη για μετατροπή σε βιοκαύσιμο. Εν συνεχεία, η προ-κατεργασμένη βιομάζα μεταφέρεται στις εγκαταστάσεις των βιοδιυλιστηρίων, όπου εκεί επεξεργάζεται και αναβαθμίζεται σύμφωνα με τις υπάρχουσες προδιαγραφές. Τέλος, αφού τροποποιηθεί καταλλήλως μεταφέρεται σύμφωνα με ένα δίκτυο διανομής στους διάφορους χώρους ζήτησης των βιοκαυσίμων.



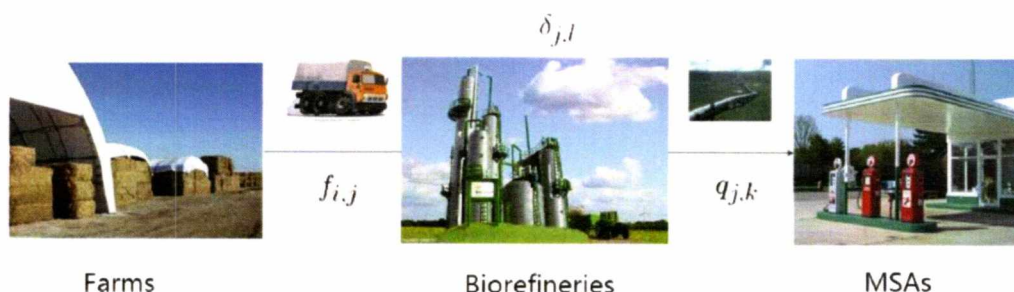
Εικόνα 10 : Αλυσίδα εφοδιασμού βιομάζας για παραγωγή και διανομή βιοκαυσίμων

3.4 Μοντελοποίηση Ετήσιου Προβλήματος

Το ετήσιο μοντέλο στοχεύει στο να προσδιορίσει τον αριθμό, το μέγεθος καθώς και τις θέσεις των εγκαταστάσεων της εφοδιαστικής αλυσίδας των βιοκαυσίμων για μακροπρόθεσμο χρονικό προγραμματισμό. Σε αυτό το μοντέλο, θεωρείται ότι οι εγκαταστάσεις των βιοδιυλιστηρίων έχουν ευέλικτα επίπεδα αποθήκευσης και παραγωγής και ότι μπορούν να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες επεξεργασίας της βιομάζας και των βιοκαυσίμων. Ο στόχος της

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

μοντελοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού ετήσιου κόστους. Μέσα σε αυτό, συμπεριλαμβάνονται τα κόστη : μεταφοράς βιομάζας, μετατροπής βιοκαυσίμων, μεταφοράς βιοκαυσίμων, εγκατάστασης καθώς και ένα πρόστιμο έλλειψης τροφοδοσίας βιοκαυσίμου. Όσον αφορά τη τροφοδοσία των βιοκαυσίμων, πολλές φορές το επίπεδο ζήτησης τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τη τιμή αγοράς τους. Στο Σχήμα 11 φαίνεται η απεικόνιση της εφοδιαστικής αλυσίδας των βιοκαυσίμων του μοντέλου. Όπως φαίνεται, τα δρομολόγια της πρώτης ύλης βιομάζας από τη τοποθεσία i στο βιοδιυλιστήριο j απεικονίζονται με $f_{i,j}$, τα βιοδιυλιστήρια επιπέδου l στη j τοποθεσία με $\delta_{j,l}$ και η διανομή του βιοκαυσίμου από τη χώρα j στη τοποθεσία ζήτησης k με $q_{j,k}$.



Εικόνα 11 : Εφοδιαστική αλυσίδα βιοκαυσίμων

3.4.1 Περιορισμοί Ετήσιου Μοντέλου

Ο περιορισμός (1), υποδηλώνει ότι για κάθε τοποθεσία εφοδιασμού βιομάζας i , η εξερχόμενη πρώτη ύλη βιομάζας $\sum_{j=1}^J f_{ij}$ δεν θα πρέπει να είναι περισσότερη από τη διαθέσιμη πρώτη ύλη. Όπου η διαθέσιμη πρώτη ύλη A_i στη τοποθεσία i , είναι πολλαπλασιασμένη με τη διαφορά $(1 - S_i)$ που εκφράζει το συντελεστή βιωσιμότητας.

$$\sum_{j=1}^J f_{ij} \leq (1 - S_i)A_i, \quad \forall i \in I \quad (1)$$

Ο περιορισμός (2) δηλώνει ότι εάν το βιοδιυλιστήριο λειτουργεί ($\sum_{l=1}^L \delta_{j,l} = 1$), τότε η εξερχόμενη πρώτη ύλη $\sum_{j=1}^J f_{ij}$ που μεταφέρεται στη τοποθεσία j , πολλαπλασιασμένη με ένα συντελεστή απωλειών υλικών $(1 - l_1)$, δεν θα πρέπει να είναι περισσότερη από την χωρητικότητα του βιοδιυλιστηρίου $\sum_{l=1}^L U_l^B$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

$$(1 - l_1) \sum_{i=1}^l f_{ij} \leq \sum_{l=1}^L U_l^B \delta_{jl} , \forall j \in J \quad (2)$$

Ο περιορισμός (3) υποδεικνύει το ισοζύγιο μάζας της βιομάζας και του βιοκαυσίμου για κάθε εγκατάσταση βιοδιυλιστηρίου j . Η ποσότητα του βιοκαυσίμου που επεξεργάζεται το βιοδιυλιστήριο $(1 - l_1) \sum_{i=1}^l f_{ij} Y_j$, θα πρέπει να είναι ίση με την ποσότητα των βιοκαυσίμων που εξέρχονται $\gamma \sum_{k=1}^M q_{jk}$ από αυτό.

$$(1 - l_1) \sum_{i=1}^l f_{ij} Y_j = \gamma \sum_{k=1}^M q_{jk} , \forall j \in J \quad (3)$$

Ο περιορισμός (4) ορίζει ότι στις τοποθεσίες των βιοδιυλιστηρίων μπορεί να υπάρχει το πολύ ένα βιοδιυλιστήριο επιπέδου χωρητικότητας l που να λειτουργεί. Δηλαδή, η δυαδική μεταβλητή δ_{jl} μόλις πάρει τη τιμή 1, σημαίνει ότι στη τοποθεσία j υπάρχει το πολύ ένα διυλιστήριο επιπέδου χωρητικότητας l . Σε αντίθετη περίπτωση είναι ίση με 0.

$$\sum_{l=1}^L \delta_{jl} \leq 1 , \forall j \in J \quad (4)$$

Ο περιορισμός (5) περιλαμβάνει το όριο του προϋπολογισμού για τη συνολική επένδυση. Δηλαδή αν τελικά υπάρχει βιοδιυλιστήριο στη τοποθεσία j επιπέδου χωρητικότητας l ($\delta_{jl} = 1$), θα έχει ένα συγκεκριμένο κόστος εγκατάστασης C_l^B . Για όλα τα βιοδιυλιστήρια στις τοποθεσίες j χωρητικότητας l , τα κόστη εγκατάστασης δεν μπορούν να ξεπερνούν το συνολικό προϋπολογισμό των εγκαταστάσεων Q .

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L C_l^B \delta_{jl} \leq Q \quad (5)$$

Ο περιορισμός (6) καθορίζει ποιες τιμές της μεταβλητής δ_{jl} μπορούν να πάρουν μη μηδενική τιμή, αν θα έχουν το συγκεκριμένο επίπεδο χωρητικότητας l .

$$\delta_{jl} \leq B_{jl} , \forall j, l \quad (6)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι περιορισμοί (7), (8) και (9) καθορίζουν οι μεταβλητές να βρίσκονται στα επιτρεπτά όρια. Αφού, οι τιμές της ροής της εξερχόμενης βιομάζας για κάθε τοποθεσία πρέπει να είναι θετικές (7), η ροή του βιοκαυσίμου από κάθε βιοδυλιστήριο στη τοποθεσία ζήτησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός (8) και η δυαδική μεταβλητή μπορεί να πάρει μόνο τιμές 0 ή 1.

$$f_{ij} \geq 0 \quad , \quad \forall i \quad , \quad j \in J \quad (7)$$

$$q_{jk} \geq 0 \quad , \quad \forall j \in J \quad , \quad k \in K \quad (8)$$

$$\delta_{jl} \in \{0,1\} \quad (9)$$

3.4.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (C_i^{S,CL} + \tau D_{ij} C_{ij}^{S,T}) f_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M (C_j^{G,C} + \tau \gamma D_{jk} C_{jk}^{G,T}) q_{jk} \\ & + \sum_{k=1}^M \lambda_k \left(G_k - \sum_{j=1}^J q_{jk} \right) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{C_l^B \delta_{jl}}{r(1+r)^H - 1} \end{aligned}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει σαν στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Ωστόσο, το συνολικό κόστος αποτελείται από επιμέρους κόστη: κόστος συλλογής και φόρτωσης της βιομάζας $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_i^{S,CL} f_{ij}$, κόστος μεταφοράς της βιομάζας $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tau D_{ij} C_{ij}^{S,T} f_{ij}$, κόστος μετατροπής βιοκαυσίμου $\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M C_j^{G,C} q_{jk}$, κόστος μεταφοράς βιοκαυσίμου $\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M \tau \gamma D_{jk} C_{jk}^{G,T} q_{jk}$, κόστος προστίμου για έλλειψη κάλυψης ζήτησης ως προς βιοκαύσιμο $\sum_{k=1}^M \lambda_k (G_k - \sum_{j=1}^J q_{jk})$ και το συνολικό κόστος κατασκευής της εγκατάστασης του βιοδυλιστηρίου $\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{C_l^B \delta_{jl}}{r(1+r)^H - 1}$. Ο όρος λ_k είναι το πρόστιμο για

την έλλειψη κάλυψης ζήτησης των βιοκαυσίμων. Υποτίθεται ότι είναι η συμβατική τιμή αγοράς των καυσίμων. Αυτό σημαίνει ότι εάν οι παραγωγοί των βιοκαυσίμων δεν είναι σε θέση να

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

καλύψουν την υπάρχουσα ζήτηση για τα καύσιμα, τότε οι ανάγκες των ενδιαφερομένων ως προς καύσιμα θα ικανοποιηθούν με βάση το πετρέλαιο.

Το παραπάνω μοντέλο βελτιστοποίησης αν και περιλαμβάνει γραμμικούς περιορισμούς, η αντικειμενική του συνάρτηση είναι μη γραμμική. Επομένως, προκειμένου να μετατραπεί το μοντέλο σε γραμμικό, στη θέση του όρου $(G_k - \sum_{j=1}^J q_{jk})$ προστέθηκε η βοηθητική συνεχής μεταβλητή y_k . Επιπλέον, όλοι οι περιορισμοί παρέμειναν ίδιοι εκτός του ότι προστέθηκαν δύο ακόμα.

Συνεπώς η καινούργια αντικειμενική συνάρτηση είναι :

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (C_i^{S,CL} + \tau D_{ij} C_{ij}^{S,T}) f_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M (C_j^{G,C} + \tau \gamma D_{jk} C_{jk}^{G,T}) q_{jk} + \sum_{k=1}^M \lambda_k y_k \\ + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{C_l^B \delta_{jl}}{r(1+r)^H - 1} \end{aligned}$$

Και οι επιπλέον περιορισμοί : ο περιορισμός (9) δηλώνει ότι για κάθε τοποθεσία ζήτησης k η μεταβλητή y_k θα πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη ή ίση της διαφοράς της συνολικής ζήτησης βιοκαυσίμων G_k από την εξερχόμενη συνολική ροή του βιοκαυσίμου $\sum_{j=1}^J q_{jk}$ από όλες τις τοποθεσίες j . Ο περιορισμός (10) δηλώνει ότι η μεταβλητή y_k παίρνει μόνο θετικές τιμές, αφού η διαφορά $(G_k - \sum_{j=1}^J q_{jk})$ δεν μπορεί να είναι αρνητική.

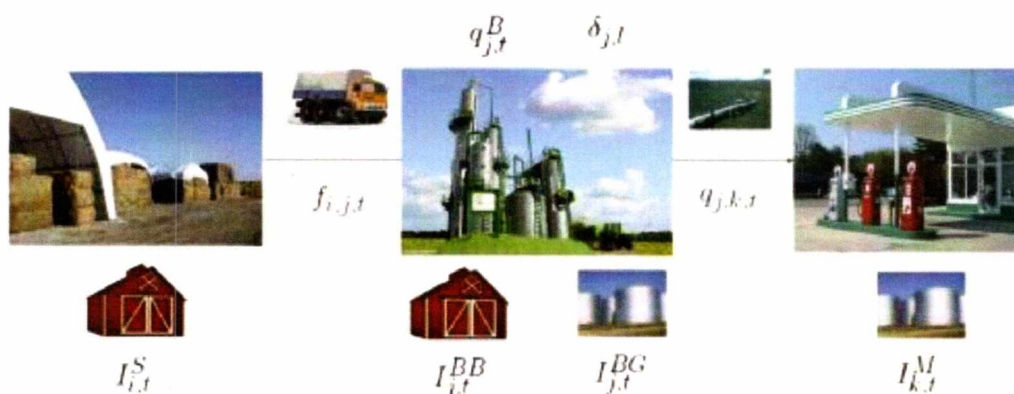
$$y_k \geq (G_k - \sum_{j=1}^J q_{jk}), \forall k \in K \quad (9)$$

$$y_k \geq 0 \quad (10)$$

3.5 Μοντελοποίηση Προβλήματος Πολλαπλών Χρονικά Περιόδων

Η βέλτιστη θέση επιλογής των βιοδιυλιστηρίων καθώς και η διανομή της βιομάζας και των βιοκαυσίμων μπορεί να αναλυθεί με βάση το ετήσιο μοντέλο βελτιστοποίησης. Ωστόσο, απαραίτητη προϋπόθεση για την εμπορευματοποίηση των βιοκαυσίμων, εκτός από τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων είναι και ένας κατάλληλος επιχειρηματικός σχεδιασμός. Σε αυτή τη παράγραφο θα γίνει η παρουσίαση ενός μοντέλου πολλαπλών χρονικά περιόδων σχετικά με τη βιομάζα της εφοδιαστικής αλυσίδας των βιοκαυσίμων. Ο επιχειρησιακός σχεδιασμός λαμβάνει επιπρόσθετα υπόψη το μηνιαίο επίπεδο παραγωγής του βιοδιυλιστηρίου καθώς επίσης κάνει έλεγχο της κατανομής και των επιπέδων βιομάζας και βιοκαυσίμου. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, η υπολογιστική προσπάθεια για αυτό το μοντέλο των πολλαπλών χρονικά περιόδων αυξάνεται. Κάτι που είναι λογικό, αφού το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το προηγούμενο.

Στο Σχήμα 12 φαίνεται η απεικόνιση της παραγωγής και της διανομής των βιοκαυσίμων του μοντέλου. Όπως φαίνεται, τα δρομολόγια της πρώτης ύλης βιομάζας από τη τοποθεσία i στο βιοδιυλιστήριο j το μήνα t απεικονίζονται με f_{ijt} , τα βιοδιυλιστήρια επιπέδου l στη τοποθεσία j με δ_{jl} , με q_{jt}^B η ποσότητα επεξεργασίας της βιομάζας στο βιοδιυλιστήριο j το χρόνο t και η διανομή του βιοκαυσίμου από τη τοποθεσία j στη τοποθεσία ζήτησης k το χρόνο t με q_{jkt} . Επίσης, με I_{it}^S απεικονίζεται το επίπεδο αποθεμάτων πρώτης ύλης στη τοποθεσία i το χρόνο t , με $I_{jt}^{B,B}$ το επίπεδο αποθεμάτων πρώτης ύλης στο βιοδιυλιστήριο j το χρόνο t , με $I_{jt}^{B,G}$ το επίπεδο αποθεμάτων βιοκαυσίμων στο βιοδιυλιστήριο j το χρόνο t και με I_{kt}^M το επίπεδο αποθεμάτων βιοκαυσίμων στη τοποθεσία ζήτησης k το χρόνο t .



Εικόνα 12 : Μοντέλο πολλαπλών περιόδων παραγωγής και διανομής βιοκαυσίμων

3.5.1 Περιορισμοί Μοντέλου Πολλαπλών Περιόδων

Ο περιορισμός (1) δηλώνει ότι, για κάθε τοποθεσία i το μήνα t η συγκομιδή της βιομάζας u_{it} δεν μπορεί να υπερβαίνει τη διαθέσιμη βιομάζα A_{it} που υπάρχει. Η διαφορά $(1 - S_i)$ εκφράζει το συντελεστή βιωσιμότητας της τοποθεσίας i .

$$u_{it} \leq (1 - S_i)A_{it}, \forall i \in I, t \in T \quad (1)$$

Ο περιορισμός (2) υποδεικνύει ότι, το βιοδυλιστήριο λειτουργεί μόνο όταν η παραγωγή φτάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Σε αυτό το μοντέλο ορίζονται τόσο τα άνω όσο και τα κάτω όρια των επιπέδων παραγωγής που απαιτούνται προκειμένου να λειτουργεί το βιοδυλιστήριο. Δηλαδή, αν υπάρχει βιοδυλιστήριο στη τοποθεσία j επιπέδου l ($\delta_{jl} = 1$), η ποσότητα βιομάζας που αυτό επεξεργάζεται q_{jt}^B πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη ποσότητα βιομάζας που επεξεργάζεται \bar{U}_{lt}^B και μεγαλύτερη από την μικρότερη \underline{U}_{lt}^B . Αυτό ισχύει για κάθε βιοδυλιστήριο j , επιπέδου χωρητικότητας l για τη χρονική περίοδο t .

$$\delta_{jl}\underline{U}_{lt}^B \leq q_{jt}^B \leq \delta_{jl}\bar{U}_{lt}^B, \forall j \in J, t \in T, l \in L \quad (2)$$

Οι περιορισμοί (3), (4), (5) και (6) αφορούν την ισορροπία που πρέπει να διατηρείται στην αποθήκευση της βιομάζας και των βιοκαυσίμων για την εγκατάσταση j τη χρονική περίοδο t . Πιο συγκεκριμένα :

Ο περιορισμός (3) δηλώνει ότι, σε κάθε τοποθεσία i τη χρονική περίοδο t , το επίπεδο αποθεμάτων της πρώτης ύλης I_{it}^S θα πρέπει να είναι συγκεκριμένο. Δηλαδή, θα πρέπει να ισούται με τη ποσότητα συγκομιδής της πρώτης ύλης u_{it} σε αυτή τη χρονική περίοδο t και το σύνολο του αποθέματος της πρώτης ύλης της προηγούμενης χρονικής περιόδου $(1 - l_2)I_{i,t-1}^S$ και της βιομάζας που φεύγει $\sum_{j=1}^J f_{ijt}$ από τη τοποθεσία i στο βιοδυλιστήριο j τη χρονική περίοδο t .

$$I_{it}^S = (1 - l_2)I_{i,t-1}^S + u_{it} - \sum_{j=1}^J f_{ijt}, \forall i \in I, t \in T \quad (3)$$

Ο περιορισμός (4) δηλώνει επίσης ότι σε κάθε βιοδυλιστήριο j το επίπεδο αποθεμάτων της πρώτης ύλης $I_{jt}^{B,B}$ τη χρονική περίοδο t πρέπει να είναι σταθερό. Εξαρτάται από το επίπεδο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

αποθεμάτων της πρώτης ύλης της προηγούμενης χρονικής περιόδου $(1 - l_2)I_{j,t-1}^B$, της βιομάζας που εισέρχεται $\sum_{i=1}^I f_{ijt}$ στη χρονική περίοδο t και της ποσότητας που φεύγει και πάει για επεξεργασία.

$$I_{jt}^{B,B} = (1 - l_2)I_{j,t-1}^B + \sum_{i=1}^I f_{ijt} - r_{jt}, \forall j \in J, t \in T \quad (4)$$

Ο περιορισμός (5) εκφράζει ότι σε κάθε βιοδιυλιστήριο j το επίπεδο αποθεμάτων των βιοκαυσίμων $I_{jt}^{B,G}$ τη χρονική περίοδο t θα πρέπει να είναι σταθερό. Ισούται με το επίπεδο αποθεμάτων των βιοκαυσίμων της προηγούμενης χρονικής περιόδου $I_{j,t-1}^{B,G}$, τη βιομάζας που επεξεργάζεται στο βιοδιυλιστήριο q_{jt}^B καθώς και το βιοκαύσιμο που φεύγει $\sum_{k=1}^M q_{jkt}$ από το βιοδιυλιστήριο j για τη τοποθεσία ζήτησης k .

$$I_{jt}^{B,G} = I_{j,t-1}^{B,G} + \frac{1}{\gamma} q_{jt}^B Y_j - \sum_{k=1}^M q_{jkt}, \forall j \in J, t \in T \quad (5)$$

Ο περιορισμός (6) έχει σχέση με το επίπεδο αποθεμάτων των βιοκαυσίμων I_{kt}^M στη τοποθεσία ζήτησης k τη χρονική περίοδο t . Η τιμή αυτή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το σύνολο του αποθέματος της προηγούμενης χρονικής περιόδου $I_{k,t-1}^M$ και της ποσότητας βιοκαυσίμου που εισέρχεται $\sum_{j=1}^J q_{jkt}$, μείον τη συνολική ζήτηση βιοκαυσίμων G_{kt} τη χρονική περίοδο t .

$$I_{kt}^M \geq I_{k,t-1}^M + \sum_{j=1}^J q_{jkt} - G_{kt}, \forall k \in K, t \in T \quad (6)$$

Σε αυτό το μοντέλο, όπως φαίνεται και στους περιορισμούς (7) – (11) οι μεταβλητές απόφασης περιλαμβάνονται σε εξισώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Ο περιορισμός (7) περιλαμβάνει το επίπεδο αποθεμάτων της πρώτης ύλης I_{it}^S για κάθε τοποθεσία i , το οποίο πρέπει να είναι μικρότερο από τη μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης U_i^S που έχει η τοποθεσία i η χρονική περίοδο t .

$$0 \leq I_{it}^S \leq U_i^S, \forall i \in I, t \in T \quad (7)$$

Ο περιορισμός (8) δηλώνει ότι το επίπεδο αποθεμάτων της πρώτης ύλης $I_{jt}^{B,B}$ τη χρονική περίοδο t για κάθε βιοδυλιστήριο j , πρέπει να είναι μικρότερο από το μέγιστο επίπεδο χωρητικότητας βιομάζας $U_j^{B,B}$ που έχει η εγκατάσταση j .

$$0 \leq I_{jt}^{B,B} \leq U_j^{B,B}, \forall j \in J, t \in T \quad (8)$$

Ο περιορισμός (9) εκφράζει ότι το επίπεδο αποθεμάτων των βιοκαυσίμων $I_{jt}^{B,G}$ τη χρονική περίοδο t για κάθε εγκατάσταση j , πρέπει να είναι μικρότερο από το μέγιστο επίπεδο χωρητικότητας βιοκαυσίμων $U_j^{B,G}$ της κάθε εγκατάστασης.

$$0 \leq I_{jt}^{B,G} \leq U_j^{B,G}, \forall j \in J, t \in T \quad (9)$$

Ο περιορισμός (10) περιλαμβάνει το επίπεδο αποθεμάτων των βιοκαυσίμων I_{kt}^M στη τοποθεσία ζήτησης k τη χρονική περίοδο t , όπου πρέπει να είναι μικρότερο από το επίπεδο χωρητικότητας βιοκαυσίμου U_k^M που έχει η εγκατάσταση.

$$0 \leq I_{kt}^M \leq U_k^M, \forall k \in K, t \in T \quad (10)$$

Ο περιορισμός (11) δηλώνει ότι τη χρονική στιγμή $t = 0$, τα επίπεδα αποθεμάτων : της τοποθεσίας που τροφοδοτεί πρώτη ύλη, του βιοδυλιστηρίου για πρώτη ύλη, του βιοδυλιστηρίου για βιοκαύσιμα και της τοποθεσίας ζήτησης για βιοκαύσιμα, ξεκινάνε άδεια (παίρνουν τη τιμή 0).

$$I_{i,0}^S = I_{j,0}^{B,B} = I_{j,0}^{B,G} = I_{k,0}^M = 0, \forall i, j \in J, k \in K \quad (11)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Οι περιορισμοί (12) – (16) καθορίζουν οι παρακάτω μεταβλητές να βρίσκονται στα επιτρεπόμενα όρια. Δηλαδή, η ροή της πρώτης ύλης βιομάζας από τη τοποθεσία i στο βιοδιυλιστήριο j το μήνα t να είναι θετική (12). Η ροή του βιοκαυσίμου από τη τοποθεσία j στη τοποθεσία ζήτησης k το μήνα t να είναι θετική (13). Η ποσότητα συγκομιδής της πρώτης ύλης στη τοποθεσία i το χρόνο t να είναι θετική (14). Η ποσότητα επεξεργασίας της βιομάζας στο βιοδιυλιστήριο j το χρόνο t να είναι θετική (15). Και η δυαδική μεταβλητή μπορεί να πάρει τιμές μόνο 0 ή 1 (16).

$$f_{ijt} \geq 0, \forall i, j \in J, t \in T \quad (12)$$

$$q_{jkt} \geq 0, \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (13)$$

$$u_{it} \geq 0, \forall i \in I, t \in T \quad (14)$$

$$q_{jt}^B \geq 0, j \in J, t \in T \quad (15)$$

$$\delta_{jl} \in \{0,1\}, \forall j \in J, l \in L \quad (16)$$

3.5.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\begin{aligned} \min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tau D_{ij} C_{ij}^{S,T} f_{ijt} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M \tau \gamma D_{1jk} C_{jk}^{G,T} q_{jkt} + \sum_{i=1}^I C_i^{S,CL} u_{it} + \sum_{j=1}^J \frac{1}{\gamma} C_j^{G,C} q_{jt}^B \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^M \lambda_{kt} \left(G_{kt} - \sum_{j=1}^J q_{jkt} \right) + \sum_{i=1}^I h_i^S I_{it}^S + \sum_{j=1}^J h_j^{B,B} I_{jt}^{B,B} + \sum_{j=1}^J h_j^{B,G} I_{jt}^{B,G} \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^M h_k^M I_{kt}^M \right\} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{C_l^B \delta_{jl}}{r(1+r)^H - 1} \end{aligned}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει σαν στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος για όλες τις περιόδους του χρόνου. Ωστόσο, το συνολικό κόστος αποτελείται από επιμέρους κόστη: κόστος μεταφοράς της βιομάζας $\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \tau D_{ij} C_{ij}^{S,T} f_{ijt}$, κόστος μεταφοράς του βιοκαυσίμου $\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M \tau \gamma D_{1jk} C_{jk}^{G,T} q_{jkt}$, κόστος συλλογής και φόρτωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

της βιομάζας $\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C_i^{S,CL} u_{it}$, κόστος μετατροπής του βιοκαυσίμου $\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \frac{1}{\gamma} C_j^{G,C} q_{jt}^B$, κόστος προστίμου για έλλειψη κάλυψης ζήτησης βιοκαυσίμου $\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^M \lambda_{kt} (G_{kt} - \sum_{j=1}^J q_{jkt})$ και το σταθερό κόστος για την εγκατάσταση του βιοδυστηρίου $\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{c_l^B \delta_{jl}}{r(1+r)^H}$. Επίσης, στην αντικειμενική συνάρτηση συμπεριλαμβάνονται τα κόστη απογραφής της βιομάζας και των βιοκαυσίμων στη διάρκεια των χρονικών περιόδων. Τα κόστη απογραφής περιλαμβάνουν : το κόστος απογραφής της βιομάζας στη τοποθεσία i $\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I h_i^S I_{it}^S$, το κόστος απογραφής της βιομάζας στο βιοδυστήριο j $\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J h_j^{B,B} I_{jt}^{B,B}$, το κόστος απογραφής του βιοκαυσίμου στο βιοδυστήριο j $\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J h_j^{B,G} I_{jt}^{B,G}$ καθώς και το κόστος απογραφής του βιοκαυσίμου στη τοποθεσία ζήτησης k $\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^M h_k^M I_{kt}^M$.

3.6 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν δύο μαθηματικά μοντέλα που επιλύουν το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του αριθμού, των χωρητικοτήτων και των τοποθεσιών εγκατάστασης των βιοδυστηρίων. Για να γίνει αυτό εφικτό, στόχος τους είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας. Το πρώτο μοντέλο αφορά ένα ετήσιο μοντέλο για μακροπρόθεσμο στρατηγικό σχεδιασμό. Σε αντίθεση με το δεύτερο μοντέλο, όπου είναι πολλαπλών χρονικά περιόδων και γίνεται λεπτομερής ανάλυση του επιχειρησιακού σχεδιασμού της πρώτης ύλης και του βιοκαυσίμου. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίλυση των παραπάνω μοντέλων.

4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση και η περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων που επιλύουν το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους μιας γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας βιοκαυσίμων. Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει η παρουσίαση των μεθόδων επίλυσης και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την λύση των παραπάνω μοντέλων.

4.2 Μέθοδοι Επίλυσης

Για την υλοποίηση των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το IBM CPLEX Optimization Studio Academic Research Edition 12.5. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού. Το όνομα CPLEX προέρχεται από την καινοτομία του λογισμικού αυτού που αφορά στην ενσωμάτωση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης Simplex σε προγραμματιστικό περιβάλλον της γλώσσας C. Κατόπιν στο πρόγραμμα εισήχθη και η χρήση άλλων γλωσσών προγραμματισμού για την μοντελοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Η μοντελοποίηση των προγραμμάτων στην παρούσα μελέτη έγινε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C++. Η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού είναι αντικειμενοστραφής και είναι συνδυασμός των ευρέως χρησιμοποιούμενων γλωσσών C και Java. Επίσης, το λογισμικό ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των προγραμμάτων είναι το Microsoft Visual Studio 2010.

Το πακέτο βελτιστοποίησης της IBM σε συνδυασμό με τη διαδικασία του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (C++) δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα της αποτελεσματικής υλοποίησης κάθε είδους βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται στο Microsoft Visual Studio η βιβλιοθήκη της CPLEX, πράγμα το οποίο δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής αντικειμένων των κλάσεων της CPLEX. Για παράδειγμα, για τον ορισμό των μεταβλητών απόφασης χρησιμοποιούνται αντικείμενα της κλάσης «IloNumVarArray» ή «IloNumVarMatrix» για μονοδιάστατους ή πολυδιάστατους πίνακες αριθμητικών μεταβλητών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

απόφασης. Για τους περιορισμούς ορίζονται αντικείμενα των κλάσεων «HoRangeArray» ή «HoRangeMatrix» αντίστοιχα. Τέλος, εφόσον έχουν εισαχθεί τα δεδομένα, οι μεταβλητές απόφασης, οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται στο σύστημα ο τύπος της βελτιστοποίησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) και χρησιμοποιείται η εντολή «cplexsolve» που ορίζει την επίλυση με το υπολογιστικό πακέτο της IBM.

Η υλοποίηση των προγραμμάτων έλαβε χώρα στο εργαστήριο Οργάνωσης Παραγωγής της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, που βρίσκεται στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Τα χαρακτηριστικά του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε είναι τα εξής:

- Επεξεργαστής: Intel(R) Core(TM) i5-3330 CPU 3.00GHz,
- Εγκατεστημένη μνήμη: 16.00 GB,
- Λογισμικό: Windows 7 Professional 64-bit.

Αντικείμενο μελέτης εκτός από την εύρεση της βέλτιστης λύσης που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση του συνολικού κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας, αποτέλεσε και ο χρόνος εκτέλεσης. Για τον παραπάνω λόγο όλα τα αποτελέσματα λήφθηκαν από τον ίδιο υπολογιστή.

4.3 Αριθμητικό Παράδειγμα

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα παραδείγματα μιας γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας βιοελαίου στην Ελλάδα που έχει σαν στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους της. Η γενική εφοδιαστική αλυσίδα περιλαμβάνει είκοσι (20) διαφορετικές τοποθεσίες τροφοδοσίας πρώτης ύλης βιομάζας(εξάγουν διαφορετικές ποσότητες βιομάζας και έχουν διαφορετικά επίπεδα χωρητικότητας), τέσσερα (4) βιοδιυλιστήρια επεξεργασίας διαφορετικών τοποθεσιών και τρεις (3) τοποθεσίες ζήτησης πελατών. Ο συντελεστής απωλειών πρώτης ύλης (l_1) είναι ίσος με 0.05, ο συντελεστής διαχυτότητας (τ) με 1.27 και ο συντελεστής βιωσιμότητας (S_i) με 0.718. Επίσης, ο χρονικός ορίζοντας για εγκαταστάσεις μονάδων παραγωγής ενέργειας και χημικών διεργασιών είναι 25 χρόνια και το ετήσιο επιτόκιο, αν και εξαρτάται από το συντελεστή της οικονομίας, ίσο με 0.07. Ο μοναδιαίος συντελεστής από γαλόνι σε τόνο είναι 0.72 (γ).Επιπλέον, το πρόστιμο μη ικανοποίησης της ζήτησης (λ) ισούται με 1000ευρώ. Ως πρώτη ύλη βιομάζας για τις διάφορες τοποθεσίες (i), έχουμε χρησιμοποιήσει δύο διαφορετικούς τύπους : μίσχανθο (αχυρώδης) και ξύλο (wood chips). Οι δύο αυτοί τύποι βιομάζας είναι ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς τους στη πυκνότητα: μίσχανθος (χαμηλή, 150 kg/m^3) – ξύλο(υψηλή, 220 kg/m^3). Έχουν διαφορετικό κόστος διατήρησης(h_i^S μίσχανθου 5ευρώ/τόνο , ξύλου 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

ευρώ/τόνο) καθώς και συλλογής-φόρτωσης ($C_i^{S,CL}$ μίσχανθου 30ευρώ/τόνο, 50% υψηλότερο από wood chips,). Να σημειωθεί ότι, οι 10 τοποθεσίες τροφοδοσίας βιομάζας (i) θεωρήσαμε ότι εξάγουν μίσχανθο ενώ οι άλλες 10 chips ξύλου. Επίσης, οι τροφοδοσίες από τις τοποθεσίες ζήτησης (i) προς τα βιοδυλιστήρια (j) και προς τους πελάτες (k) εκφράζονται σε τόνους, οι αποστάσεις ανάμεσα στις τοποθεσίες τροφοδοσίας - των βιοδυλιστηρίων - των πελατών σε χιλιόμετρα και τα κόστη σε ευρώ. Σύμφωνα με αυτές τις βασικές παραδοχές περιγράφονται παρακάτω δύο διαφορετικά παραδείγματα εφοδιαστικών αλυσίδων .

4.3.1 Περιγραφή πρώτου αριθμητικού παραδείγματος

Σε αυτή τη περίπτωση της εφοδιαστικής αλυσίδας, θεωρήθηκε ότι όλα τα βιοδυλιστήρια (j) που επεξεργάζονται τη πρώτη ύλη χρησιμοποιούν αντιδραστήρες ατέρμονος κοχλία με αποδόσεις μετατροπής της βιομάζας (Y_j) ίσες με 0.55. Επίσης, έχουν δύο διαφορετικά επίπεδα χωρητικότητας βιομάζας (U_j^B) καθώς και το κόστος κάθε επίπεδου αντίστοιχα είναι διαφορετικό (C_j^B), υψηλότερο το ένα από το άλλο.

4.3.2 Περιγραφή δεύτερου αριθμητικού παραδείγματος

Σε αυτή τη περίπτωση της εφοδιαστικής αλυσίδας, αναβαθμίστηκαν τα δύο από τα τέσσερα βιοδυλιστήρια ($j=0$ και $j=1$) που επεξεργάζονται τη πρώτη ύλη χρησιμοποιώντας αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης που δίνουν μεγαλύτερες αποδόσεις μετατροπής βιομάζας (Y_j) ίσες με 0.75. Επίσης, οι συγκεκριμένοι αντιδραστήρες έχουν ένα επίπεδο χωρητικότητας βιομάζας (U_j^B) κόστους αντίστοιχα υψηλού με τους προηγούμενους, ωστόσο τα προηγούμενα βιοδυλιστήρια σε αυτό το παράδειγμα χρησιμοποιούν μόνο το επίπεδο χωρητικότητας με το χαμηλότερο κόστος.

4.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών παραδειγμάτων. Αυτά περιλαμβάνουν τις ποσότητες της βιομάζας που μεταφέρθηκαν από τις τοποθεσίες (i) στα βιοδυλιστήρια (j), καθώς και τις ποσότητες του βιοελαίου που μεταφέρθηκαν από τα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

βιοδιυλιστήρια (j) στις τοποθεσίες ζήτησης-πελάτες (k). Επίσης, δείχνει ποια βιοδιυλιστήρια χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εξασφαλίσουν την απαιτούμενη ζήτηση. Οι τοποθεσίες βιομάζας με αριθμό από 0-9 εξάγουν μίσχανθο ενώ οι υπόλοιπες chips ξύλου. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε με βάση την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας.

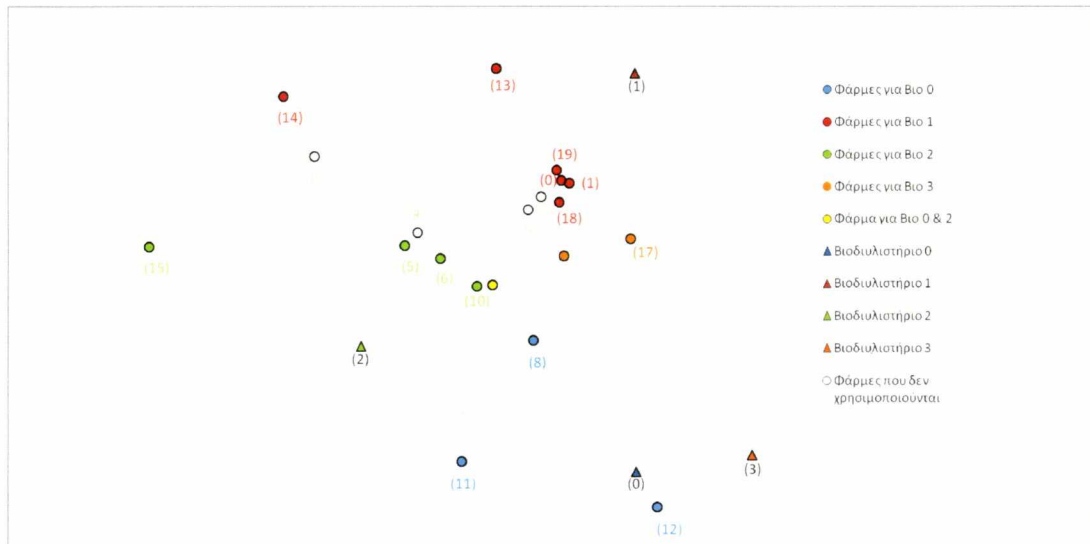
4.4.1 Αποτελέσματα πρώτου αριθμητικού παραδείγματος

Στο παρακάτω πίνακα και γράφημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πρώτου παραδείγματος σύμφωνα με τις παραδοχές που προαναφέρθηκαν. Στο πίνακα 6 παρουσιάζονται οι ποσότητες που μεταφέρονται από τις τοποθεσίες βιομάζας στα βιοδιυλιστήρια και σε ποια βιοδιυλιστήρια. Επίσης, στο γράφημα 1 γίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το πίνακα 6 και σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα. Στο πίνακα 7 παρουσιάζονται οι ποσότητες που μεταφέρονται από τα βιοδιυλιστήρια στους πελάτες προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση και από ποια βιοδιυλιστήρια πραγματοποιείται η ροή. Παράλληλα, στο γράφημα 2 γίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το πίνακα 7 και σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα.

| Τοποθεσίες βιομάζας | Βιοδιυλιστήριο | Ποσότητα |
|---------------------|----------------|----------|
| 7 | 0 | 18909,3 |
| 8 | 0 | 11280 |
| 11 | 0 | 16920 |
| 12 | 0 | 9870 |
| 0 | 1 | 12499,5 |
| 1 | 1 | 19740 |
| 13 | 1 | 15510 |
| 14 | 1 | 11280 |
| 18 | 1 | 4230 |
| 19 | 1 | 5640 |
| 5 | 2 | 14100 |
| 6 | 2 | 19740 |
| 7 | 2 | 5129,43 |
| 10 | 2 | 21150 |
| 15 | 2 | 22560 |
| 16 | 3 | 21150 |
| 17 | 3 | 18330 |

Πίνακας 6 : Ροή ποσοτήτων από τις τοποθεσίες βιομάζας στα βιοδιυλιστήρια

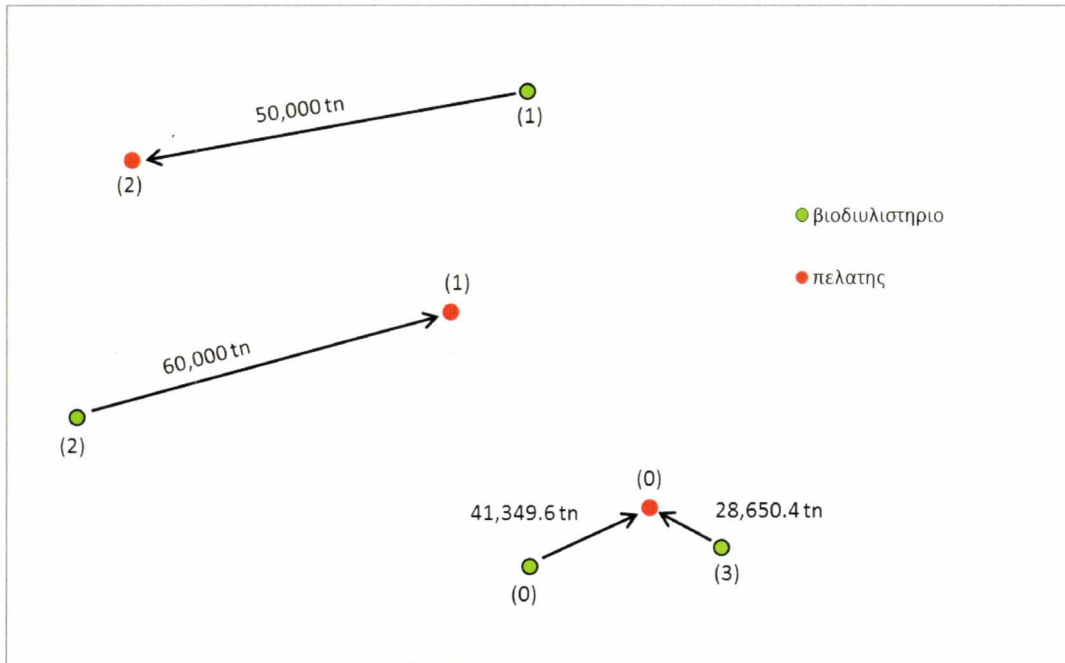
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ



Γράφημα 1 : Σχηματική αναπαράσταση τοποθεσιών βιομάζας-βιοδιυλιστηρίων

| Βιοδιυλιστήριο | Πελάτης | Ποσότητα |
|----------------|---------|----------|
| 0 | 0 | 41349,6 |
| 1 | 2 | 50000 |
| 2 | 1 | 60000 |
| 3 | 0 | 28650,4 |

Πίνακας 7 : Ροή ποσοτήτων από τα βιοδιυλιστήρια προς τους πελάτες



Γράφημα 2 : Σχηματική αναπαράσταση βιοδιυλιστηρίων – πελατών

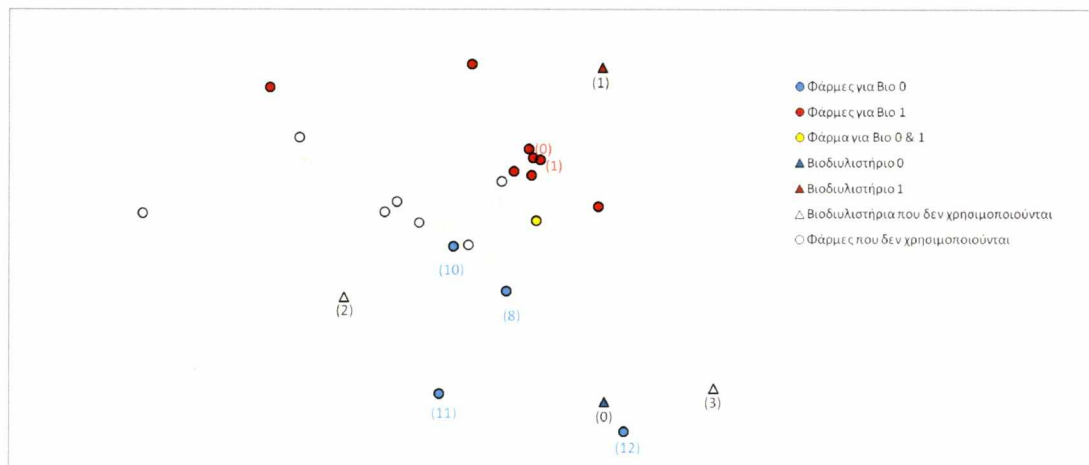
4.4.2 Αποτελέσματα δεύτερου αριθμητικού παραδείγματος

Στο παρακάτω πίνακα και γράφημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου παραδείγματος σύμφωνα με τις παραδοχές που προαναφέρθηκαν. Στο πίνακα 8 παρουσιάζονται οι ποσότητες που μεταφέρονται από τις τοποθεσίες βιομάζας στα βιοδιυλιστήρια και σε ποια βιοδιυλιστήρια. Επίσης, στο γράφημα 3 γίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το πίνακα 8 και σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα. Στο πίνακα 9 παρουσιάζονται οι ποσότητες που μεταφέρονται από τα βιοδιυλιστήρια στους πελάτες προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση και από ποια βιοδιυλιστήρια πραγματοποιείται η ροή. Παράλληλα, στο γράφημα 4 γίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το πίνακα 9 και σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

| Τοποθεσίες βιομάζας | Βιοδυλιστήριο | Ποσότητα |
|---------------------|---------------|----------|
| 8 | 0 | 11280 |
| 10 | 0 | 21150 |
| 11 | 0 | 16920 |
| 12 | 0 | 9870 |
| 16 | 0 | 11516,8 |
| 0 | 1 | 22560 |
| 1 | 1 | 19740 |
| 2 | 1 | 4234,74 |
| 13 | 1 | 15510 |
| 14 | 1 | 11280 |
| 16 | 1 | 9633,16 |
| 17 | 1 | 18330 |
| 18 | 1 | 4230 |
| 19 | 1 | 5640 |

Πίνακας 8 : Ροή ποσοτήτων από τις τοποθεσίες βιομάζας στα βιοδυλιστήρια

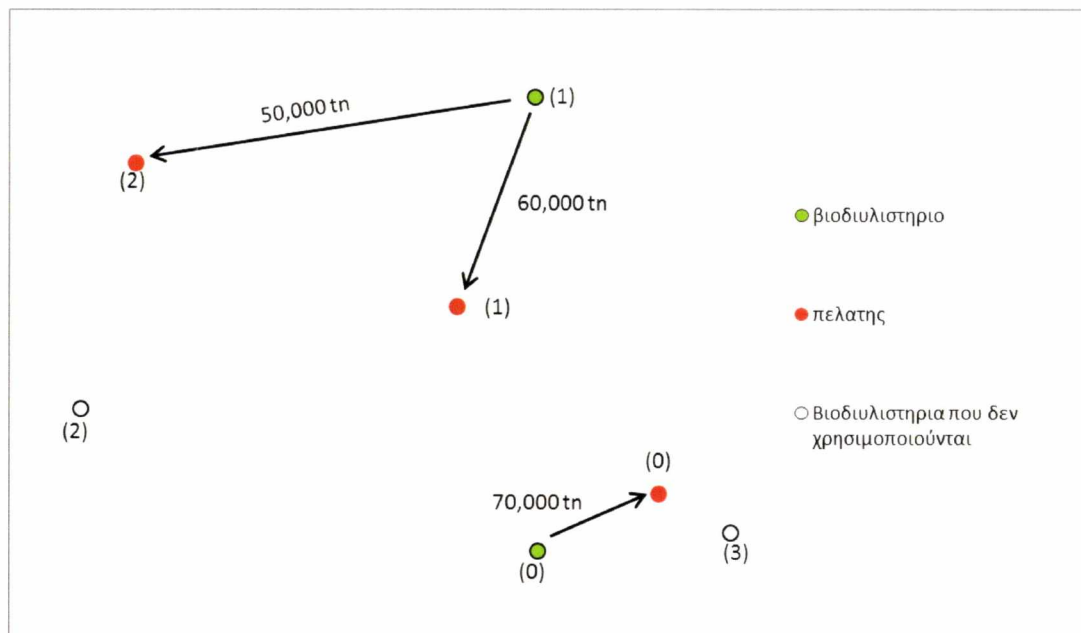


Γράφημα 3 : Σχηματική αναπαράσταση τοποθεσιών βιομάζας-βιοδυλιστηρίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

| Βιοδιυλιστήριο | Πελάτης | Ποσότητα |
|----------------|---------|----------|
| 0 | 0 | 70000 |
| 1 | 1 | 60000 |
| 1 | 2 | 50000 |

Πίνακας 9 : Ροή ποσοτήτων από τα βιοδιυλιστήρια προς τους πελάτες



Γράφημα 4 : Σχηματική αναπαράσταση βιοδιυλιστηρίων – πελατών

4.5 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν για το μαθηματικό μοντέλο οι μέθοδοι επίλυσης του και τα αποτελέσματα δύο διαφορετικών περιπτώσεων εφοδιαστικής αλυσίδας βιοελαίου. Στόχος του μαθηματικού μοντέλου όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ώστε να καλυφθεί η απαιτούμενη ζήτηση. Στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται σχολιασμός και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προήλθαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου για την κάθε μια περίπτωση.

5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4) παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι επίλυσης αλλά και τα αποτελέσματα των μαθηματικών μοντέλων. Περιγράφηκαν δύο διαφορετικές εφαρμογές της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας του βιοελαίου βασιζόμενες στους αντιδραστήρες πυρόλυσης που χρησιμοποιούν. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση και σχολιασμός μεταξύ των αποτελεσμάτων.

5.2 Σύγκριση και Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων

Στο πρώτο αριθμητικό παράδειγμα και τα τέσσερα (4) βιοδιυλιστήρια χρησιμοποιούν για τη διεργασία της ταχεία πυρόλυσης βιομάζας τον ίδιο τύπο αντιδραστήρα. Αρχικά, παρατηρείται από τον πίνακα των αποτελεσμάτων (Πίνακας 6) και το γράφημα (Γράφημα 1) για τις ροές τις βιομάζας μεταξύ των τοποθεσιών ζήτησης και των βιοδιυλιστηρίων (f_{ij}), ότι, ορισμένες τοποθεσίες τροφοδοσίας βιομάζας δεν χρησιμοποιούνται καθόλου. Συγκεκριμένα τέσσερις (4) τοποθεσίες βιομάζας αν και παράγουν πρώτη ύλη δεν τροφοδοτούν τα βιοδιυλιστήρια, ακόμα και αν είναι πιο κοντά από άλλες, αφού η απαιτούμενη ζήτηση μπορεί να καλυφθεί και από τις υπόλοιπες με το συνολικό κόστος να είναι μικρότερο. Επίσης, οι συγκεκριμένες τοποθεσίες που δεν χρησιμοποιούνται εξάγουν ως πρώτη ύλη μίσχανθο, όπου το κόστος συλλογής του και φόρτωσης είναι διπλάσιο από αυτό των chips ξύλου. Επιπλέον, παρατηρείται από το γράφημα ότι μία τοποθεσία ζήτησης αν και παράγει μίσχανθο τροφοδοτεί με πρώτη ύλη δύο βιοδιυλιστήρια (βιοδιυλιστήριο 0-βιοδιυλιστήριο2) για το λόγο ότι οι απαιτήσεις των βιοδιυλιστηρίων προκειμένου να καλύψουν την απαιτούμενη ζήτηση δεν έχουν ικανοποιηθεί. Επιπρόσθετα, αξιολογείται η συγκεκριμένη τοποθεσία γιατί όπως φαίνεται και από το διάγραμμα βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από τις υπόλοιπες τοποθεσίες τροφοδοσίας βιομάζας, αφού το κόστος μεταφοράς παίζει σημαντικό ρόλο. Ακόμα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι τοποθεσίες τροφοδοσίας βιομάζας που αξιοποιούνται είναι εκείνες που βρίσκονται πιο κοντά στα βιοδιυλιστήρια, ανεξαρτήτως το τι παράγουν, κάτι που είναι λογικό, διότι όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το κόστος μεταφοράς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη τελική επιλογή εγκατάστασης του δικτύου διανομής. Εν συνεχεία, από τον Πίνακα 7 και το Γράφημα 2 φαίνεται το μέγεθος των

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

εξερχόμενων ροών του βιοελαίου (q_{jk}) που απαιτούνται προς τους πελάτες προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση τους με το ελάχιστο κόστος. Παρατηρείται, ότι για την ικανοποίηση της ζήτησης του πελάτη (0) η τροφοδοσία γίνεται από δύο βιοδιυλιστήρια, ενώ οι υπόλοιποι ικανοποιούνται από το καθένα βιοδιυλιστήριο ξεχωριστά.

Στο δεύτερο αριθμητικό παράδειγμα, όπως έχει προαναφερθεί έχουν αναβαθμιστεί τα δύο από τα τέσσερα βιοδιυλιστήρια με αντιδραστήρες καλύτερης απόδοσης (75%) σε σχέση με τους προηγούμενους (55%), όπου έχουν ένα επίπεδο χωρητικότητας συγκεκριμένου κόστους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως φαίνεται και από το Πίνακα 8 και το Γράφημα 3 δεν χρησιμοποιούνται αρκετές τοποθεσίες τροφοδοσίας βιομάζας (συνολικά 8), συγκριτικά με το πρώτο παράδειγμα (συνολικά 4), παρόλα αυτά η συνολική ζήτηση ικανοποιείται. Επίσης, με την αλλαγή των αντιδραστήρων παρατηρείται ότι τα δύο βιοδιυλιστήρια χαμηλότερης ποιότητας, αν και έχουν χαμηλότερο κόστος χωρητικότητας, δεν χρησιμοποιούνται καθόλου ακόμα και αν βρίσκονται όπως φαίνεται και από το γράφημα πλησιέστερα στους πελάτες. Διότι, το συνολικό κόστος της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας από τη μη αξιοποίηση αρκετών τοποθεσιών τροφοδοσίας βιομάζας ελαχιστοποιείται σε μεγάλο βαθμό. Και σε αυτή τη περίπτωση, οι τοποθεσίες βιομάζας που επιλέγονται είναι οι πλησιέστερες στα βιοδιυλιστήρια. Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε και φαίνεται στο Γράφημα 4, η ζήτηση των πελατών ικανοποιείται μόνο από τα δύο βιοδιυλιστήρια που λειτουργούν, παρόλο που τα προηγούμενα βιοδιυλιστήρια βρίσκονται όπως και στο πρώτο αριθμητικό μοντέλο πλησιέστερα. Επομένως, προκειμένου να ικανοποιηθεί το ίδιο επίπεδο ζήτησης των πελατών και η εφοδιαστική αλυσίδα διανομής του βιοελαίου να έχει μικρότερο κόστος θα ήταν ωφέλιμο να αναβαθμιστεί το υπάρχον σύστημα.

5.3 Επίλογος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, έγινε η σύγκριση και ο σχολιασμός μεταξύ των δύο παραδειγμάτων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή της κάθε μιας περίπτωσης, αυτό που παρατηρείται είναι ότι αν αναβαθμιστούν οι αντιδραστήρες ταχείας πυρόλυσης βιομάζας, ακόμα και με υψηλό κόστος χωρητικότητας, το συνολικό κόστος της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας θα μειωθεί.

6 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η πυρόλυση βιομάζας συνιστά ένα σύνθετο θερμοχημικό φαινόμενο, ο ακριβής μηχανισμός του οποίου παραμένει ακόμα ανεξιχνίαστος. Ωστόσο, η διεργασία που δίνει τις μεγαλύτερες αποδόσεις υγρού προϊόντος (βιοελαίου) και μπορεί να αντικαταστήσει επαρκώς τα καύσιμα υδρογονανθράκων όπως μελετήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι η διαδικασία της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας. Για τον καλύτερο όμως προσδιορισμό των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης διεργασίας είναι αναγκαία η επίλυση σημαντικών ζητημάτων που αφορούν το βιοέλαιο. Είναι αναγκαία η ακριβής γνώση των ιδιοτήτων του βιοελαίου, όπως η ειδική θερμοχωρητικότητα, τα ακριβή συστατικά των οργανικών ενώσεων που περιέχει, η δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς του καθώς και να προσδιοριστούν οι απαραίτητες προδιαγραφές. Όλοι οι παραπάνω λόγοι θα μπορέσουν να βελτιώσουν και τη ποιότητα του βιοελαίου ώστε να καταστεί παγκοσμίως ως εναλλακτικό ενεργειακό καύσιμο.

Ο σχεδιασμός τόσο της εφοδιαστικής αλυσίδας όσο και του επιχειρηματικού σχεδιασμού είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη βιομηχανία των καυσίμων. Προκειμένου το βιοέλαιο να μπορέσει να καλύψει τις απαιτούμενες ζητήσεις θα πρέπει να έχει ένα κατάλληλο δίκτυο διανομής. Για το λόγο αυτό, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν μοντέλα τα οποία στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους της γενικής εφοδιαστικής αλυσίδας του βιοελαίου. Τα εν λόγω μοντέλα ανήκουν στα προβλήματα μικτού αέριου γραμμικού προγραμματισμού. Στη παρούσα διπλωματική έγινε ανάλυση δύο διαφορετικών περιπτώσεων δικτύου διανομής βιοελαίου, έχοντας ως βάση τους αντιδραστήρες πυρόλυσης που χρησιμοποιούν τα βιοδιυλιστήρια. Και στις δύο περιπτώσεις στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους διανομής ανάμεσα στις τοποθεσίες τροφοδοσίας βιομάζας, τις τοποθεσίες των βιοδιυλιστηρίων και τις τοποθεσίες των πελατών. Η υλοποίηση έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού C++ ενώ για την επίλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CPLEX. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των μοντέλων και σχολιάστηκαν τα συμπεράσματα.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A. Ζερβός, 2008. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*.
- Shafizadeh F., 1968. "Pyrolysis and Combustion of Cellulose Materials". *Advances in Carbohydrate Chemistry*, Vol. 23, pg. 419.
- Shafizadeh, F., McGinnis, G.D., Philpot, C.W., 1972 "Thermal Degradation of Xylan and Related Model Compounds." *Carbohydrate Research*, Vol. 25, pg. 23.
- Bradbury, A.G.W., Sakai, Y., Shafizadeh, F., 1979 "A Kinetic Model for Pyrolysis of Cellulose." *J. Applied Polymer Science*. Vol. 23, pg. 3271.
- Bridgewater, A.V., Czernik, S., Piskorz, J., 2001 "An Overview of Fast Pyrolysis." Bridgewater A.V., ed. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. Oxford: Blackwell Science, pp. 977-997.
- Reed, T.B., Diebold, J.P., Desrosiers, R., 1980 "Perspectives in Heat Transfer Requirements and Mechanisms for Fast Pyrolysis." *Specialists Workshop on Fast Pyrolysis of Biomass, Proceedings: October 19-22, 1980, Copper Mountain, CO. SERI/CP-622-1096*. Golden, CO: Solar Energy Research Institute, pp. 7-20.
- Thambuaj, R., DynaMotive Energy Systems Corporation, 2000 "Fast Pyrolysis of Biomass for Green Power Generation." *First World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry*.
- Diebold, J.P., 1980 "Preliminary Results in the Fast Pyrolysis of Biomass to Lower Olefins." *Petroleum Chemistry Division of ACS Symposium on Alternate Feedstocks for Petrochemicals, August 24-29, Las Vegas, NV*.
- Milne, T.A., Soltys, M.N., 1983 "Direct Mass Spectrometric Studies of the Pyrolysis of Carbonaceous Fuels II, Qualitative Observations of Primary and Secondary Processes in Biomass." *J. Analytical and Applied Pyrolysis*, pp. 111-131.
- Evans, R.J., Milne, T.A., 1987 "Molecular Characterization of the Pyrolysis of Biomass. II Applications." *Energy and Fuel*, pp. 311-319.
- Himmel, M., Tucker, M., Baker, J., Rivard, C., Oh, K., Grohman, K., 1985, . John Wiley & Sons Inc. 1986 "Comminution of Biomass: Hammer and Knife Mills." *Biotechnology and Bioenergy Symposium*, No.15.
- Bridgewater, A.V., Peacock, G.V.C., 1999 "Fast Pyrolysis Process for Biomass." *Sustainable and Renewable Energy Reviews*, Vol. 4, pp. 1-73.
- Diebold, J.P., Scahill, J. 1981 "Ablative Pyrolysis in Biomass in the Entrained Flow Cyclonic Reactor at SERI.", *Annual report October 1981 – November 1982, SERI/PR-234-1883, UC Category: 61a*.
- Diebold, J.P., Scahill, J. May 1984 "Ablative, Entrained Flow Fast Pyrolysis of Biomass." *Proceedings 16th Biomass Thermochemical Conversion Contractors Meeting, Portland, OR*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Roy, C., Blanchette, D., Korving, L., Yang, J., DeCaumia, B., 1997“Development of a Novel Vacuum Pyrolysis Reactor with Improved Heat Transfer Potential,” Bridgewater, A.V., Boocock, D.G.B., eds. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. Blackie Academic and Professional, pp. 351-367.

Wagenaar, B.M., Venderbosch, R.H., Carrasco, J., Strenziok, R., Van der Aa, B.J., 2001“Rotating Cone Bio-oil Production and Applications,” Bridgewater, A.V., ed. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. Oxford: Blackwell Science, pp. 1268-1280.

Scott, D.S., Piskorz, J., 1985“Production of Liquids from Biomass by Continuous Flash Pyrolysis of Biomass,” Egneus, H., Ellegard, A., eds. *BioEnergy* 84. Vol. 3, London: Elsevier, pp. 15-23.

Oasmaa, A., Czernik, S., 1999“Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils – State-of-the-Art for End Users.” *Energy & Fuels*, Vol. 13, pp 914-921.

Soltes, E.J., Elder, T.J., 1981“Pyrolysis,” Goldstein, I.S., ed. *Organic Chemicals from Biomass*. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 63.

Piskorz, J., Scott, D.S., Radlien, D., 1980“Composition of Oils Obtained by Fast Pyrolysis of Different Woods,” Soltes, E.J., Milne, T.A., eds. *Pyrolysis Oils from Biomass: Producing Analyzing and Upgrading*. Washington, DC: ACS Symposium Series 376, ACS, pp. 167-178.

Diebold, J.P., 1997, A Review of the Toxicity of Biomass Pyrolysis Liquids Formed at Low Temperatures. NREL/TP-430-22739. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Milne, T.A., Agblevor, F., Davis, M., Deutch, S., Johnson, D., 1997“A Review of the Chemical composition of Fast Pyrolysis Oils,” Bridgewater, A.V., Boocock, D.G.B., eds. *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*. London: Blackie Academic & Professional, pp. 409-424.

Elliot, D.C., 1986, Analysis and Comparison of Biomass Pyrolysis / Gasification Condensates. PNL-5943. Final Report. Richland WA: Pacific Northwest Laboratory.

Diebold, J.P., 2000, A Review of the Chemical and Physical Mechanisms of the Storage Stability of Fast Pyrolysis Bio-oils. NREL/SR-570-27613. Work Performed by J.P. Diebold. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.

Scott, D., 1987, Technical Evaluation of the Waterloo Fast Pyrolysis Process. Energy Mines and Resources Canada, Ottawa, Ontario, Canada, DSS Contract File No: 20ST.31926-3-5026, ISBN 0-662-15614-5, pp 104-123.

Leilei Zhang and Guiping Hu, 2013. “Supply chain design and operational planning models for biomass to drop-in fuel production”. *Biomass&Bioenergy*, pp. 238-250.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000121279

