

Μελέτη Ανάπτυξης & Σχεδιασμού Μεταλλικού Κλιβάνου Πυρόλυσης Βιομάζας



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

του Τορτοπίδη Παναγιώτη

Βόλος 2003

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 2425/1

Ημερ. Εισ.: 20-10-2003

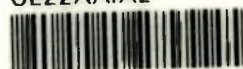
Δωρεά: Συγγραφέα

Ταξιθετικός Κωδικός: Δ

662.88

TOP

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072597

Περιεχόμενα

1. Περίληψη	3
2. Εισαγωγή	5

Μέρος 1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3. Πυρόλυση – Ανθρακοποίηση Ξύλου	9
3.1 Πυρόλυση.....	9
3.2 Ανθρακοποίηση Ξύλου	11
3.3 Χαρακτηριστικά Ξύλου.....	16
3.3.1 Το είδος του ξύλου.....	18
3.3.2 Η περιεκτικότητα σε υγρασία	19
3.3.3 Οι διαστάσεις του ξύλου	20
3.4 Χαρακτηριστικά των προϊόντων της αργής πυρόλυσης του Ξύλου.....	22
3.4.1 Ξυλάνθρακας ή Κάρβουνο.....	23
3.4.2 Οξειδία της πυρόλυσης (Pyrolygneous acid).....	31
4. Κλίβανοι - Φούρνοι Πυρόλυσης	34
4.1 Γενικές πληροφορίες.....	34
4.2 Τύποι Κλιβάνων – Φούρνων	35
4.2.1 Κλίβανος γήινων κοιλωμάτων (earth pit)	35
4.2.2 Κλίβανος γήινου αναχώματος (earth mounts).....	38
4.2.3 Κλίβανοι τούβλου (brick kilns).....	42
4.2.3.1 Αργεντινικός κλίβανος σχήματος μισού πορτοκαλιού	44
4.2.3.2 Βραζιλιάνικος κλίβανος κυψελών	46
4.2.4 Μεταλλικοί κλίβανοι (metal kilns).....	49
4.3 Σύγκριση απόδοσης συστημάτων ανθράκωσης.....	53

Μέρος 2 Πειραματικό Μέρος

5. Θερμική Ανάλυση	57
5.1 Θερμική ανάλυση και Θερμιδομετρία	57
5.2 Τεχνικές Θερμικής Ανάλυσης	59
5.2.1 Ανάλυση TGA (Thermo gravimetric analysis)	59
5.2.2 Ανάλυση DSC (Differential Scanning Calorimetry)	60
5.3 Περιγραφή Πειραματικής Συσκευής	61
5.4 Είδη Πειραματικών Φάσεων και Διαδικασιών	66
5.5 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας - Παρουσίαση αποτελεσμάτων	68
6. Πείραμα σε μεταλλικό κλίβανο τύπου τύμπανου	73
6.1 Περιγραφή της συσκευής	73
6.2 Παρουσίαση πρώτου πειράματος	75
6.3 Παρουσίαση Δεύτερου πειράματος	79
6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων	87

Μέρος 3 Μελέτη Ανάπτυξης – Προκαταρκτικός Σχεδιασμός

7. Πρωτογενής Μελέτη - Σχεδιασμός Μεταλλικού Κλιβάνου Πυρόλυσης	89
7.1 Μοντελοποίηση της Διεργασίας πυρόλυσης για κλίβανο άμεσης επαφής	90
7.2 Σχεδιασμός Κλιβάνου	98
7.2.1 Αρχικές Ιδέες	98
7.2.2 Βελτιωμένη μορφή Κλιβάνου	101
7.2.3 Υπολογισμός ποσότητας Ξυλείας	108
7.2.4 Εναλλακτική πρόταση – Κλίβανος έμμεσης επαφής	109
8. Συμπεράσματα	117
9. Βιβλιογραφία	119

1. Περίληψη

Η πυρόλυση είναι μία θερμοχημική διεργασία με την οποία μετατρέπουν τη βιομάζα σε προϊόντα μεγαλύτερης αξίας τα οποία και καλύτερα εκμεταλλεύσιμα. Το πιο σύνηθες προϊόν τέτοιων διεργασιών είναι το κάρβουνο, το οποίο παράγεται με την πυρόλυση. Η πυρόλυση ουσιαστικά είναι η διάσπαση της βιομάζας προς κάρβουνο απουσία οξυγόνου με σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας

Η παρακάτω εργασία έχει ως αντικείμενο την ενδελεχή διερεύνηση της θερμοχημικής διεργασίας της αργής πυρόλυσης (ανθρακοποίηση), αλλά και ολόκληρης της διαδικασίας η οποία οδηγεί στην παραγωγή του ξυλάνθρακα με σκοπό την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό μεταλλικού κλιβάνου πυρόλυσης ξύλου και παραγωγής ξυλάνθρακα.

Προκειμένου να μελετήσουμε την διεργασία της αργής πυρόλυσης η οποία οδηγεί στην ανθρακοποίηση του ξύλου, πραγματοποιήσαμε μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων στη συσκευή της θερμικής ανάλυσης όπου και μελετήσαμε την συμπεριφορά διαφορετικών ειδών ξύλου (Melego, Ostria, Querqus, Kastanea, Fagus) δηλαδή το εναπομείναν ποσοστό μάζας ανάλογα με την θερμοκρασία θέρμανσής του (που ήταν συνεχώς αυξανόμενη). Στη συνέχεια ελέγξαμε την συμπεριφορά ενός μόνο είδους το Fagus, που είχε και την καλύτερη απόδοση στο προηγούμενο πείραμα, και μετρήσαμε το εναπομείναν ποσοστό μάζας ανάλογα με την τελική θερμοκρασία πυρόλυσης (που ήταν συνεχώς σταθερή) και ανάλογα του χρόνου θέρμανσης. Τέλος καταγράψαμε την θερμοροή του δείγματος συναρτήσει του χρόνου, όπου διαπιστώσαμε ότι σε κάποια στιγμή η διεργασία της πυρόλυσης είναι εξώθερμη.

Σε δεύτερη φάση πραγματοποιήσαμε δύο σειρές πειραμάτων σε μεταλλικό κλίβανο πιλοτικών διαστάσεων προκειμένου να αποκτήσουμε γνώση για την πραγματική πλέον διάσταση της πυρόλυσης όπου και διαπιστώσαμε ότι η ποσότητα των πτητικών παραγόμενων παραπροϊόντων της διεργασίας είναι πολύ μεγάλη και ικανή να συντηρήσει και να ολοκληρώσει την διαδικασία από κάποια στιγμή και μετά.

Έχοντας λοιπόν συσσωρεύσει την γνώση και την εμπειρία που μας έδωσαν οι πειραματικές μας προσπάθειες αλλά και η διεθνή βιβλιογραφία φθάσαμε στο τελικό στάδιο αυτής της εργασίας όπου και περιγράψαμε την δομή και τον τρόπο λειτουργίας δύο μεταλλικών κλιβάνων άμεσης και έμμεσης επαφής, του θερμαντικού μέσου με το ξύλο προς πυρόλυση, και σχεδιάσαμε τα προκαταρκτικά σχέδια από τα οποία στην συνέχεια θα βγουν και τα τελικά μηχανολογικά σχέδια για την δημιουργία του μεταλλικού κλιβάνου.

Ως γενική σύνοψη των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης είναι ότι ο ιδανικότερος τρόπος παραγωγής ξυλάνθρακα είναι η διαδικασία των τριών σταδίων σε κλίβανο έμμεσης επαφής. Δηλαδή ένα στάδιο της αφύγρανσης των ξύλων, δεύτερο στάδιο της πυρόλυσης και τρίτο στάδιο της ψύξης. Πλεονεκτήματα που εμφανίζει αυτός ο σχεδιασμός είναι ο μειωμένος χρόνος ολοκλήρωσης του κύκλου της διαδικασίας και η βέλτιστη εκμετάλλευση της ενέργειας των καυσαερίων αλλά και των πτητικών παραπροϊόντων της πυρόλυσης. Κλειδί στην διαδικασία της ανθρακοποίησης είναι ο επαρκής και ορθός έλεγχος της τελικής θερμοκρασίας πυρόλυσης.

2. Εισαγωγή

Η πυρόλυση αποτελεί μία θερμοχημική διεργασία. Τέτοιου είδους διεργασίες μετατρέπουν τη βιομάζα σε προϊόντα μεγαλύτερης αξίας τα οποία είναι και πιο εκμεταλλεύσιμα όπως το κάρβουνο. Το πιο σύννηθες προϊόν τέτοιων διεργασιών είναι το κάρβουνο, το οποίο παράγεται με την πυρόλυση. Η πυρόλυση ουσιαστικά είναι η διάσπαση της βιομάζας προς κάρβουνο απουσία οξυγόνου με σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και το κύριο μέρος της πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες ανώτερες των 270°C. Η διεργασία αυτή παράγει στερεά προϊόντα (κάρβουνο), υγρά (βιοέλαια) και ένα μίγμα αερίων. Το ποσοστό κάθε φάσης των προϊόντων ποικίλει ανάλογα με την αρχική σύσταση της βιομάζας που χρησιμοποιείται και τις επιβαλλόμενες συνθήκες θέρμανσης κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης. Μία ενδεικτική τιμή σύστασης προϊόντων είναι 350 kg κάρβουνο, 450 kg βιοέλαια , 75 kg στάχτη και 60 m³ αέρια προϊόντα για πυρόλυση βιομάζας ενός τόνου.

Γενικά όλες οι μορφές βιομάζας μπορούν να μετασχηματιστούν θερμοχημικά. Βέβαια η κάθε μορφή θα έχει τη δική της σύσταση και ποιότητα στα προϊόντα. Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται εκτεταμένη έρευνα στο πεδίο της θερμικής μετατροπής της βιομάζας σε υγρά, στερεά ή αέρια προϊόντα. Ανάλογα με το ποια από τις παραπάνω φάσεις των προϊόντων μας ενδιαφέρει έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες καύσης, πυρόλυσης, εξαέρωσης, και υγροποίησης βιομάζας.

Η παραγωγή στερεών προϊόντων (κάρβουνο) που ενδιαφέρει την παρούσα εργασία γίνεται με τη διαδικασία της πυρόλυσης. Η πυρόλυση συγκριτικά με τις υπόλοιπες διεργασίες βρίσκεται ακόμη σε αρχικά στάδια ανάπτυξης . Μπορεί να διακριθεί σε γρήγορη και αργή πυρόλυση, ανάλογα με το ρυθμό θέρμανσης που προκαθορίζεται. Το κύριο προϊόν κατά την γρήγορη πυρόλυση (μεγάλοι ρυθμοί θέρμανσης) είναι βιοέλαια ενώ το κύριο προϊόν για αργούς ρυθμούς θέρμανσης είναι κάρβουνο.

Στην παρούσα εργασία μας απασχολεί η αργή πυρόλυση αφού το ζητούμενο είναι η μελέτη ανάπτυξης και ο σχεδιασμός μεταλλικού κλιβάνου

για την παραγωγή κάρβουνου από ξύλο. Η διεργασία αυτή ονομάζεται και ανθρακοποίηση του ξύλου.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του παραγόμενου ξυλοκάρβουνου αλλά και την διεργασία της ανθρακοποίησης είναι

- α. η υγρασία του ξύλου
- β. το είδος της ξυλείας
- γ. οι διαστάσεις του ξύλου (εξωτερική επιφάνεια και διάμετρο)
- δ. ο ρυθμός και η θερμοκρασία κατά την οποία πραγματοποιείται η διεργασία της ανθρακοποίησης

Η παρακάτω μελέτη γίνεται στα πλαίσια προγράμματος ΠΑΒΕΤ με αντικείμενο την ανάπτυξη και το σχεδιασμό για την κατασκευή ενός πλήρως αυτοματοποιημένου κλιβάνου βιομάζας για την παραγωγή ξυλάνθρακα. Η κατασκευή του κλιβάνου προγραμματίζεται να γίνει από την εταιρία μεταλλικών κατασκευών Μ.Ε.Κ Α.Ε. Η κατασκευή τέτοιου εξοπλισμού αποτελεί μέλημα λίγων και εξειδικευμένων εταιριών.

Στην Ελλάδα η μέχρι τώρα παραγωγή ξυλάνθρακα γίνεται με παραδοσιακούς τρόπους (χωμάτινα καμίνια). Οι μέθοδοι αυτοί όμως παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα σε σχέση με τη χρήση του κλιβάνου που προγραμματίζεται να κατασκευαστεί στα πλαίσια αυτού του προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα η παραγωγή ξυλάνθρακα με την χρήση του κλιβάνου αναμένεται να έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Αυξημένο ποσοστό απόδοσης το οποίο αγγίζει το 40% σε σχέση με ένα ποσοστό απόδοσης της τάξης του 25% που παρουσιάζουν οι παραδοσιακές μέθοδοι.
- Καλύτερες και πιο σύγχρονες συνθήκες παραγωγής.
- Μείωση κινδύνου περιβαλλοντικών καταστροφών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

- Το προϊόν (ξυλάνθρακας) είναι καλύτερης ποιότητας αφού παρουσιάζει πτητικά λιγότερο από 25 % ενώ για τα χωμάτινα καμίνια η τιμή των πτητικών στο προϊόν είναι μεγαλύτερη από 30 %.
- Δυνατότητα για παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας προϊόντος.
- Απαιτείται μικρότερος χρόνος για την παραγωγή του προϊόντος (5 τόνοι / 3 ημ).
- Δυνατότητα αδιάλειπτης παραγωγής σε όλο το έτος αφού το ξύλο δεν είναι εκτεθειμένο σε βροχή ή υγρασία κατά τη διάρκεια κακών καιρικών συνθηκών.
- Πλήρη εκμετάλλευση των παραπροϊόντα που παράγονται κατά την πυρόλυση με σκοπό την εξοικονόμηση αλλά και ορθή χρήση της ενέργειας.

Επιπρόσθετα οι αυξημένες απαιτήσεις της ελληνικής αγοράς σε ξυλάνθρακα και το μεγάλο κόστος λειτουργίας που έχουν οι παραδοσιακές μέθοδοι σε σχέση με την χρήση του κλιβάνου αποτελούν ένα ακόμη σημαντικό λόγο για την προώθηση ενός τέτοιου έργου. Ταυτόχρονα λόγω του μικρού αριθμού εταιρειών σε διεθνές επίπεδο που εξειδικεύονται σε τέτοιο εξοπλισμό η συγκεκριμένη πρόταση γίνεται ακόμη πιο ενδιαφέρουσα από οικονομική άποψη για την ανάπτυξη μιας τέτοιας τεχνογνωσίας.

Η παραγωγή του ξυλάνθρακα γίνεται στον κλίβανο με τη διαδικασία της πυρόλυσης του ξύλου (βιομάζα). Κατά τη διαδικασία αυτή η βιομάζα εκτίθεται σε σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας απουσία οξυγόνου. Πιο συγκεκριμένα ξεκινώντας από μία θερμοκρασία 270°C την οποία διατηρούμε σταθερή για λίγο χρόνο μπαίνουμε στη διαδικασία ανθρακοποίησης. Η όλη διαδικασία μπορεί να ολοκληρώνεται σε δύο θαλάμους. Στον πρώτο παράγεται η απαιτούμενη θερμοκρασία με την καύση κάποιας καύσιμης ύλης και στο δεύτερο θάλαμο πραγματοποιείται η ανθρακοποίηση της βιομάζας (πυρόλυση). Μέρος των αερίων της καύσης που γίνεται στον πρώτο κλίβανο διοχετεύονται σε κλίβανο που αναμένει ώστε να χρησιμοποιηθεί για να μειωθεί η υγρασία της

βιομάζας και να αποφευχθεί η σπατάλη ενέργειας και χρόνου κατά τη φάση της ανθρακοποίησης.

Μια τέτοια διαδικασία παραγωγής ξυλάνθρακα μπορεί να στεγαστεί είτε σε βιομηχανικό χώρο και να είναι πλήρως αυτοματοποιημένη είτε να λειτουργεί σε χώρο χωρίς τις απαραίτητες υποδομές (π.χ δάσος) πληρώνοντας μόνο τις βασικές αρχές. Μία μονάδα πλήρως αυτοματοποιημένη με δυνατότητα παραγωγής ξυλάνθρακα και άλλων παράγωγων της βιομάζας (ενεργός άνθρακας, ξυλέλαιο, αλκοόλη, πίσσα κ.τ.λ.) κοστίζει στη διεθνή αγορά περίπου 6 εκατομ. ευρώ.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής του ξυλάνθρακα στους κλιβάνους η βιομάζα αναμένεται να περνά από τις εξής φάσεις :

- Φάση φορτώματος
- Φάση αποβολής υγρασίας
- Φάση ανθρακοποίησης
- Φάση απόκτησης θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ψύξης)

Ο κλίβανος που προγραμματίζεται να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί κατά την περάτωση αυτού του προγράμματος μπορεί να αποτελέσει τη βάση για όλες τις πιο πάνω εφαρμογές. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως το μέγεθος των εφαρμογών και τα οικονομικά οφέλη που θα προκύψουν από την ανάπτυξη και τη λειτουργία του κλιβάνου αυτού θα είναι πολύ μεγάλα.

Μέρος 1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3. Πυρόλυση – Ανθρακοποίηση Ξύλου

3.1 Πυρόλυση

Η πυρόλυση αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη χημική διεργασία κατά την οποία, υπό συνθήκες έλλειψης οξυγόνου και υψηλής θερμοκρασίας οι μεγάλες ανθρακικές αλυσίδες των οργανικών μορίων σπάνε σε μικρότερες. Έτσι, όταν υποβάλουμε μια ποσότητα βιομάζας σε πυρόλυση τα προϊόντα μπορεί να είναι εκτός από στερεά, υγρά και αέρια. Ο όρος βιομάζα δεν αναφέρεται μόνο σε ξυλεία ή υπολείμματα ξυλείας αλλά επίσης περιλαμβάνει τις ακόλουθες κατηγορίες:

- Υπολείμματα από δασικές διεργασίες, όπως πριονίδι, φλοιούς, κορμούς και κλαδιά μαλακών και σκληρότερων ξύλων.
- Υπολείμματα από αγροτικές διεργασίες, όπως άχυρο από σιτάρι, κριθάρι, βλαστούς από καλαμπόκι, βαμβάκι, σόγια, ηλιοτρόπια, φλούδες από διάφορους καρπούς, όπως ηλιοτρόπια, κοκκοφοίνικες, φιστίκια, φουντούκια, καρύδια, καθώς επίσης και περιβλήματα καρπών όπως από ελιές και ρύζι ή τελικώς υπολείμματα κλαδέματος ελιών, οπωροφόρων δέντρων ή αμπελιών.
- Υπολείμματα από φυτείες γλυκοπατάτας, καλαμοσάκχαρου κ.α

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία εντατικοποίηση της έρευνας στο πεδίο της μετατροπής της βιομάζας κάτω από συνθήκες θέρμανσης σε προϊόντα και στις τρεις φάσεις. Η μετατροπή αυτή μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνολογίες όπως καύση (combustion), εξαέρωση (gasification), πυρόλυση (pyrolysis) και υγροποίηση (liquefaction). Συγκρινόμενη με τις δυο πρώτες διεργασίες, η πυρόλυση βρίσκεται στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης της.

Η διεργασία της πυρόλυσης μπορεί να διακριθεί σε δύο διαφορετικές μορφές: γρήγορη και αργή, αυτό εξαρτάται από τις εφαρμοζόμενες συνθήκες. Στην αργή πυρόλυση η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή και πολύ συχνά για αυτό το είδος πυρόλυσης χρησιμοποιείται ο όρος ανθρακοποίηση (carbonization). Σε αντίθεση, στη γρήγορη πυρόλυση η θέρμανση της βιομάζας επιτυγχάνεται κυρίως με ακτινοβολία (flash). Το κύριο προϊόν της γρήγορης πυρόλυσης είναι υγρό (βιοέλαια), ενώ το κύριο προϊόν της αργής πυρόλυσης είναι άνθρακας (char). Βέβαια η αναλογία των προϊόντων της πυρόλυσης ποικίλει ανάλογα με τη χημική σύνθεση της βιομάζας και τις εφαρμοζόμενες συνθήκες. Για παράδειγμα από την πυρόλυση ενός τόνου σκληρού ξύλου (σε αντίθεση με το μαλακό ξύλο των κωνοφόρων) από τα δάση της Ευρώπης παράγονται : 350 Kg ξυλάνθρακας, 450 Kg ελαιώδες προϊόν, 75 Kg στάχτης και 60 m³ αερίων.

Πριν η βιομάζα υποβληθεί σε πυρόλυση απαιτείται ένα στάδιο ξήρανσης, εκτός και αν η πρώτη ύλη είναι ήδη στεγνή. Η υγρασία είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την απόδοση του προϊόντος της πυρόλυσης καθώς και το βαθμό θέρμανσης της βιομάζας και το ειδικό βάρος της. Ένας άλλος αξιόλογος παράγοντας που επηρεάζει την πυρόλυση της βιομάζας είναι το μέγεθος των σωματιδίων, δηλαδή η ειδική επιφάνεια των κομματιών ή σωματιδίων της βιομάζας επιδρά σημαντικά στην αποτελεσματικότητα της θερμοχημικής μετατροπής (thermochemical conversion), στον χρόνο της αντίδρασης όπως επίσης και στην επιλογή του ρυθμού θέρμανσης. Η στοιχειακή ανάλυση της βιομάζας (υδρογόνο, άνθρακας, άζωτο, οξυγόνο και στάχτη %κ.β σε άνυδρη βιομάζα) οδηγεί είτε σε υψηλού βαθμού θέρμανση (Higher Heating Value, HHV), είτε σε χαμηλού βαθμού θέρμανση (Lower Heating Value, LHV).

Κατά τη πυρόλυση τα ασταθή συστατικά της βιομάζας (πίσσα, υγρά και αέρια) αποδεσμεύονται και το στερεό μέρος παραμένει ως προϊόν (ξυλάνθρακας). Οι πίσσες και τα έλαια ως προϊόντα πυρόλυσης διαφέρουν πάρα πολύ σε σύσταση και χαρακτηριστικά. Αποτελούνται από μία ελαιώδη και μία υγρή φάση πλούσια σε οργανικές ουσίες. Διάφοροι ερευνητές συγκρίνουν αυτό το ελαιώδες προϊόν με ένα ASTM No 6 καύσιμο.

Σε μία συνηθισμένη διεργασία πυρόλυσης η απαιτούμενη θερμότητα παράγεται από την καύση μερικής ποσότητας της βιομάζας με ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Η πυρόλυση ξεκινάει βαθμιαία μεταξύ 150 και 220°C, κάτω από τους 150 °C λαμβάνει χώρα η αφυδάτωση. Μεταξύ 220 και 250 °C τα προϊόντα είναι κυρίως υγρά τα οποία περιέχουν οξικό οξύ, καθώς και αέριο μονοξειδίο και διοξείδιο του άνθρακα και ένα μικρό ποσό από στάχτη. Τα δεύτερα παράγονται πάνω από τους 280 °C. Η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία φτάνουν τα ασταθή είναι μεταξύ 400 - 450 °C. Η απόδοση των αέριων προϊόντων αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

3.2 Ανθρακοποίηση Ξύλου

Στη συγκεκριμένη μελέτη μας απασχολεί κατά κύριο λόγο η αργή πυρόλυση ή αλλιώς ανθρακοποίηση μια και στόχος είναι η παραγωγή ξυλάνθρακα (κάρβουνο). Το στάδιο της ανθρακοποίησης στην διαδικασία παραγωγής ξυλάνθρακα είναι το σημαντικότερο βήμα όλων, δεδομένου ότι επηρεάζει ολόκληρη τη διαδικασία από την ανάπτυξη του δέντρου μέχρι την τελική διανομή του προϊόντος στο χρήστη. Η ανθρακοποίηση από μόνη της είναι σχετικά ένα φτηνό βήμα. Ακόμα κι αν το σύστημα παραγωγής των ανθρακαερίων είναι υψηλού αρχικού κόστους δεν απαιτεί ιδιαίτερα πολύ εργατικό δυναμικό ανά μονάδα παραγωγής. Χαρακτηριστικά, το στάδιο της ανθρακοποίησης αντιπροσωπεύει περίπου το 10% των συνολικών δαπανών από την ανάπτυξη και τη συγκομιδή του δέντρου στην άφιξη του ολοκληρωμένου ξυλάνθρακα στα καταστήματα. Η αποδοτικότητα της ανθρακοποίησης λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε επηρεάζει προς τα πίσω ακόμα και τη διαδικασία όπου το ξύλο συλλέγεται, δηλαδή υψηλός βαθμός μετατροπής σημαίνει ότι λιγότερα δέντρα πρέπει να αναπτυχθούν, να κοπούν, να 'στεγνώσουν', να μεταφερθούν και να φορτωθούν στον κλίβανο ή σε οποιαδήποτε άλλη μονάδα ανθρακοποίησης. Ο συγκεκριμένος τρόπος με τον οποίο το ξύλο ανθρακώνεται είναι επίσης ικανός να επηρεάσει τη γενική

παραγωγή λόγω της επίδρασης που έχει στο ποσοστό των παραγόμενων παραπροϊόντων. Τα παραπροϊόντα μπορεί να μην είναι καθόλου εμπορεύσιμα ή να καταστούν εμπορεύσιμα αφού περάσουν από μια αρκετά δαπανηρή διαδικασία εμπλουτισμού τους.

Οι τρεις σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό μετατροπής του ξύλου σε κάρβουνο είναι:

- (α) Η περιεκτικότητα σε υγρασία του ξύλου κατά τη διάρκεια της ανθρακοποίησης.
- (β) Ο τύπος του εξοπλισμού ανθρακοποίησης που χρησιμοποιείται.
- (γ) Η προσοχή με την οποία πραγματοποιείται η διαδικασία.

Η πρώτη ύλη μας δεν είναι βιομάζα με τη γενικότερη σημασία του όρου όπως δόθηκε στην αρχή, αλλά είναι δασικό ξύλο. Γενικά, τα εμφανή αποτελέσματα της διεργασίας σε πρώτη ύλη που περιέχει κυρίως κυτταρίνη, μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Το χρώμα αλλάζει από ανοιχτόχρωμο σε καφέ και τελικά μαύρο
- Το υλικό χάνει την ελαστικότητα και την μηχανική αντοχή του
- Μειώνεται το αρχικό του μέγεθος
- Μειώνεται το βάρος του

Στη συνέχεια περιγράφεται τι ακριβώς συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ανθρακοποίησης του ξύλου. Βέβαια, οι διαφορές που παρουσιάζει αυτή η διεργασία από την γενικότερη πυρόλυση της βιομάζας είναι ελάχιστες, αλλά μία και η ανθρακοποίηση μας ενδιαφέρει άμεσα αξίζει να την περιγράψουμε από την αρχή.

Κατά την διάρκεια της ανθρακοποίησης λοιπόν, το ξύλο θερμαίνεται σε κάποιου είδους κλειστό χώρο (φούρνο), απουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου που θα οδηγούσε σε ανάφλεξη και τελικά στο κάψιμο του ξύλου και στη δημιουργία τέφρας. Χωρίς οξυγόνο αναγκάζουμε το υλικό του ξύλου να αποσυντεθεί σε ποικίλες ουσίες με βασική τον ξυλάνθρακα, ένα μαύρο πορώδες στερεό που

αποτελείται κυρίως από τον στοιχειώδη άνθρακα. Άλλα συστατικά είναι η τέφρα, που ανέρχεται από 0,5 σε 6% ανάλογα με τον τύπο του ξύλου, την ποσότητα φλοιού, την ανάμιξη με χώμα και άμμο, κ.λ.π. και τις πηκτώδεις ουσίες που διαφεύγουν μέσω της πορώδους δομής του ξυλάνθρακα. Τα υγρά και αέρια προϊόντα που παράγονται μπορούν να συλλεχθούν από ατμούς που διοχετεύονται εάν ο ξυλάνθρακας δημιουργείται σε κλειστό ελεγχόμενο φούρνο. Τα υγρά συμπυκνώνονται αν περάσουμε το ρεύμα από έναν συμπυκνωτή, ενώ τα αέρια που δεν έχουν συμπυκνωθεί συνήθως καίγονται και δίνουν πίσω ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Αυτό το αέριο καύσιμο που προέρχεται από την ανθρακοποίηση, είναι χαμηλής θερμαντικής αξίας (περίπου 10% αυτής του φυσικού αερίου).

Τα άλλα προϊόντα εκτός από τον ξυλάνθρακα αναφέρονται συνήθως ως παραπροϊόντα. Για χρόνια η ανάκτηση των χημικών ουσιών που αυτά περιέχουν ήταν ακμάζουσα βιομηχανία σε πολλές αναπτυγμένες χώρες. Μετά την εμφάνιση της πετροχημικής βιομηχανίας αυτή η βιομηχανία των παραπροϊόντων έχει γίνει αντιοικονομική δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις οι χημικές ουσίες μπορούν να παραχθούν από το πετρέλαιο πιο φτηνά.

Όταν το ξύλο θερμαίνεται στον φούρνο ο δρόμος για μετατροπή του σε ξυλάνθρακα περνά μέσω καθορισμένων σταδίων. Ο σχηματισμός του ξυλάνθρακα έχει μελετηθεί εργαστηριακά και έχουν αναγνωριστεί τα ακόλουθα στάδια στη διαδικασία μετατροπής

- από 20 έως 110°C

Το ξύλο απορροφά τη θερμότητα, δεδομένου ότι είναι ξηρή, εκπέμποντας την υγρασία του ως υδρατμό (ατμός). Η θερμοκρασία παραμένει στους 100°C ή ελαφρώς άνω από 100°C έως ότου το ξύλο γίνει εντελώς ξηρό

- από 110 έως 270°C

Εξαλείφονται τα τελευταία ίχνη ύδατος και το ξύλο αρχίζει να αποσυντίθεται με την εκπομπή κάποιου μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα, οξικού οξέος και μεθανόλης. Η προσφερόμενη θερμότητα απορροφάται.

- από 270 έως 290°C

Αυτό είναι το σημείο στο οποίο αρχίζει η εξώθερμη αποσύνθεση των ξύλων. Η θερμοκρασία αυξάνεται και η αποσύνθεση συνεχίζει αυθόρμητα δεδομένου ότι η θερμότητα του ξύλου δεν πέφτει κάτω από την θερμοκρασία αποσύνθεσης. Μικτά αέρια και ατμοί συνεχίζουν να εκπέμπονται μαζί με λίγη πίσσα.

- από 290 έως 400°C

Καθώς η αποσύνθεση της δομής του ξύλου συνεχίζεται, οι ατμοί που εκπέμπονται περιλαμβάνουν καύσιμο μονοξειδίο του άνθρακα, υδρογόνο και μεθάνιο μαζί με το αέριο διοξείδιο του άνθρακα και τους συμπυκνώσιμους ατμούς: το νερό, το οξικό οξύ, τη μεθανόλη, την ακετόνη, κλπ. Οι πίσσες αρχίζουν να υπερισχύουν καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται.

- από 400 έως 500°C

Στους 400°C ο μετασχηματισμός του ξύλου σε ξυλάνθρακα είναι σχεδόν πλήρης. Ο ξυλάνθρακας σε αυτήν την θερμοκρασία περιέχει ακόμα αξιόλογα ποσά πίσσας που παγιδεύεται στη δομή, ίσως 30% κατά βάρος. Αυτός ο ελαφρά "καμένος" ξυλάνθρακας χρειάζεται περαιτέρω να θερμάνει για να διώξει περισσότερη πίσσα και να αυξήσει έτσι τη σταθερή του περιεκτικότητα σε άνθρακα, περίπου στο 75% που είναι το αποδεκτό για τον εμπορικό ξυλάνθρακα καλής ποιότητας. Για να διώξει αυτήν την πίσσα ο ξυλάνθρακας υπόκειται σε περαιτέρω θέρμανση ώστε η θερμοκρασία του να φτάσει στους περίπου 500°C, ολοκληρώνοντας κατά συνέπεια το στάδιο ανθρακοποίησης.

Η θερμότητα παίζει κυρίαρχο ρόλο στη διεργασία της ανθρακοποίησης και στη συνέχεια παρουσιάζονται πληροφορίες για την όσο δυνατό αποτελεσματικότερη χρήση της. Στην ανθρακοποίηση λοιπόν, λαμβάνουν χώρα ουσιαστικές ροές (flux) θερμότητας προς και από το ξύλο που ανθρακώνεται. Σωστός έλεγχος αυτών των ροών επηρεάζει άμεσα την αποτελεσματικότητα και την ποιότητα της παραγωγής ξυλάνθρακα. Οι ροές θερμότητας μπορούν να υπολογιστούν και να εμφανιστούν σε ένα διάγραμμα ισορροπίας θερμότητας της διαδικασίας. Αυτό βέβαια χρειάζεται γνώσεις εφαρμοσμένης μηχανικής για τη θερμότητα αλλά οι βασικές αρχές δεν είναι δύσκολο να κατανοηθούν.

Παροχή θερμότητας θα μπορούσε να προέλθει από την καύση κάποιου είδους καυσίμου που συνήθως στην περίπτωση της παραγωγής ξυλάνθρακα είναι το ξύλο.

Τα τρία βασικά στάδια που απαιτούν παροχή θερμότητας στην παραγωγή ξυλάνθρακα είναι:

- Η ξήρανση του ξύλου.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας του ξηρού ξύλου στον φούρνο στους 270°C για να αρχίσει αυθόρμητα η πυρόλυση όπου το ίδιο το ξύλο ελευθερώνει θερμότητα.
- Τελική θέρμανση περίπου στους 500-550°C για να διώξει την πίσσα και να αυξήσει τον παραμένοντα άνθρακα στο αποδεκτό ποσοστό για τον καλό εμπορικό ξυλάνθρακα.

Ιδανική διαδικασία ανθρακοποίησης θα ήταν μια που δεν θα απαιτούσε καμία εξωτερική θερμότητα για την πραγματοποίησή της. Η εξώθερμη ενέργεια της διαδικασίας θα μπορούσε να αιχμαλωτιστεί μαζί με τη θερμότητα που παράγεται από την καύση των απαιριών και των υγρών παραπροϊόντων και αυτή στο σύνολο της θα ήταν επαρκής για να στεγνώσει το ξύλο, να αυξήσει την θερμοκρασία στο σημείο της αυθόρμητης πυρόλυσης και να θερμάνει έπειτα σε μια θερμοκρασία ικανοποιητική ώστε ο ξυλάνθρακας να απαλλαγεί από τις υπόλοιπες πίσσες. Στην πράξη όμως λόγω των απωλειών θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων του φούρνου και της ελλιπούς ξήρανσης είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Εντούτοις μερικά συστήματα, ιδιαίτέρως αυτά που έχουν μεγάλων διαστάσεων σύστημα επανακυκλοφορίας των αερίων, πλησιάζουν το ιδανικό, εκεί βέβαια όπου και το κλίμα της γεωγραφικής περιοχής επιτρέπει την κατάλληλη ξήρανση της πρώτης ύλης. Κανένα ξύλο δεν ανθρακοποιείται εάν δεν είναι ουσιαστικά εντελώς ξηρό. Το νερό στο πράσινο μέρος του ξύλου είναι ενδεικτικά περίπου 50% του βάρους του πράσινου μέρους του ξύλου και αυτό πρέπει όλο να εξατμιστεί προτού να αρχίσει η πυρόλυση να διαμορφώνει το ξύλο σε ξυλάνθρακα.

Είναι οικονομικότερο να εξατμιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο αυτής της υγρασίας χρησιμοποιώντας τη θερμότητα του ήλιου προτού να ανθρακωθεί το ξύλο. Στις ξηρές περιοχές π.χ των σαβάνων αυτό είναι αρκετά απλό δεδομένου ότι το ξύλο μπορεί να αφηθεί 12 μήνες ή και περισσότερο να ξεραθεί χωρίς σοβαρές απώλειες από την επίθεση εντόμων ή την αποσύνθεση. Στους υγρούς τροπικούς κύκλους όμως δύο ή τρεις μήνες είναι πρακτικά το όριο προτού οι απώλειες εντόμων και αποσύνθεσης γίνουν αφόρητες. Στην παραγωγή ξυλάνθρακα πρέπει να βρεθεί το σημείο ισορροπίας ανάμεσα στις απώλειες λόγω της υπερβολικής περιεκτικότητας σε υγρασία και στις απώλειες ξύλου λόγω της βιολογικής αποσύνθεσης.

3.3 Χαρακτηριστικά Ξύλου

Η πρώτη ύλη για την ανθρακοποίηση, η συλλογή και η προετοιμασία της αποτελούν την σημαντικότερη πτυχή της κατασκευής ξυλάνθρακα οποία και αν είναι η μέθοδος ανθρακοποίησης που χρησιμοποιείται. Σε αυτό το κεφάλαιο οι πρώτες ύλες διαιρούνται σε δύο ομάδες: εκείνες που προήλθαν από τα δέντρα, δηλαδή ξύλο σε οποιαδήποτε μορφή και εκείνες που προήλθαν από τη γεωργία, τα αποκαλούμενα γεωργικά υπολείμματα. Δεν παράγουν όλες οι πρώτες ύλες ποιοτικό ξυλάνθρακα και η ποιότητα του ξυλάνθρακα που παράγεται από μια ιδιαίτερη πρώτη ύλη πρέπει να ελεγχθεί για να διαπιστωθεί αν πληρεί τις προτεινόμενες προδιαγραφές των αγορών ή είναι κατάλληλος για τις τελικές χρήσεις και όλα αυτά προτού να γίνει οποιαδήποτε επένδυση. Σε αυτό το σημείο υπάρχει μία σημαντική λεπτομέρεια στην οποία πρέπει να δώσουμε προσοχή. Όταν μετατρέπουμε σε κωκ ξυλάνθρακα αυτός λιώνει προκειμένου να διαμορφωθεί η ισχυρή δομή του κωκ και αυτό συμβαίνει ακόμα και αν η πρώτη ύλη είναι ξυλάνθρακας σε μορφή σκόνης. Στην περίπτωση όμως τη δική μας οι πρώτες μας ύλες (ξύλα) όταν ανθρακώνονται δεν λιώνουν και ο ξυλάνθρακας διατηρεί τη μορφή της αρχικής πρώτης ύλης, δηλαδή τα κομμάτια των ξύλων παράγουν τα κομμάτια του ξυλάνθρακα και τα κονιοποιημένα γεωργικά απόβλητα ή το πριονίδι παράγουν τον ξυλάνθρακα

υπό μορφή σκόνης που είναι μορφή μη αποδεκτή για πολλές βιομηχανικές χρήσεις ξυλάνθρακα.

Η μηχανική αντοχή του κομματιού ή της σκόνης ξυλάνθρακα εξαρτάται επίσης από την πρώτη ύλη. Προκειμένου για παράδειγμα ο ξυλάνθρακας να έχει υψηλή αντοχή στην συντριβή (high crushing strength) όπως απαιτείται για τη χρήση του σε φούρνους (καύσιμο) πρέπει η πρώτη ύλη να περιέχει μεγάλο ποσοστό ληγνίνης ή ουσιών παραπλήσιων με αυτήν. Αυτές οι ουσίες όταν ανθρακώνονται δίνουν τη συνοχή στην δομή του ξυλάνθρακα. Ξυλάνθρακας υψηλής αντοχής δημιουργείται από ξύλο ή τσόφλια καρυδιών. Όλες οι άλλες πρώτες ύλες παράγουν το λεπτό ξυλάνθρακα που πρέπει να είναι και είναι οικονομικός κυρίως όταν πωλείται στην αγορά για ψήσιμο με σχάρες (Barbecue) στους μέσης κλάσης καταναλωτές.

Το ξύλο όμως όπως έχει περιγραφεί είναι κατά πολύ η σημαντικότερη πρώτη ύλη και παράγει άριστο ξυλάνθρακα, για τον λόγο αυτό στις επόμενες παραγράφους δίνονται με λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του ξύλου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ξυλάνθρακα καθώς επίσης περιγράφεται και η διαδικασία μέχρι το κατάλληλο ξύλο να φτάσει να γίνει το ζητούμενο τελικό προϊόν.

Υπάρχουν δύο ευρείς τύποι ξύλου, ξυλεία πλατύφυλλων που παράγονται από τα πλατύφυλλα είδη (πλατάνια, βελανιδιές, οξιές) και μαλακών ξύλων που παράγονται από τα κωνοφόρα. Και οι δύο παράγουν τον ξυλάνθρακα αλλά ο ξυλάνθρακας ξυλείας πλατύφυλλων είναι συνήθως ανθεκτικότερος από τον ξυλάνθρακα μαλακού ξύλου. Υπάρχουν επίσης διαφορές μεταξύ του υγρού συμπυκνώματος που παράγεται όταν ανθρακώνονται οι δύο τύποι ξύλων. Τα μαλακά ξύλα λόγω της περιεκτικότητάς τους σε ρητίνη τείνουν να παράγουν περισσότερες πίσσες και λιγότερο οξικό οξύ. Συχνά όπου είναι διαθέσιμη ύλη από πεύκα είναι πιο συμφέρον να μειωθεί πρώτα η περιεκτικότητα του ξύλου σε ρετσίνι (κολοφώνια) με τη χρήση κάποιας διαλυτικής διεργασίας και μετά να κοπεί το ξύλο σε κομμάτια (φέτες).

Τα χαρακτηριστικά του ξύλου (πρώτη ύλη), όπως έχει προαναφερθεί, έχουν σημαντικότερη επίδραση τόσο στην επιλογή όσο και στην απόδοση του εξοπλισμού ανθράκωσης. Οι τρεις σημαντικότεροι παράγοντες είναι

- το είδος του ξύλου
- η περιεκτικότητα σε υγρασία και
- οι διαστάσεις του ίδιου του ξύλου

3.3.1 Το είδος του ξύλου

Μιλώντας αρχικά για τα είδη, όλα τα είδη ξύλου γενικά μπορούν να ανθρακωθούν για να παράγουν ξυλάνθρακα προς χρήση. Υπάρχει βέβαια μια διαφοροποίηση στην περιεκτικότητα σε τέφρα των διαφορετικών ξύλων αλλά αυτό δεν είναι γενικά σημαντικό. Ο φλοιός, εντούτοις, έχει अपαράδεχτα υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και η δομή του ξυλάνθρακα που δημιουργείται από φλοιούς είναι πάρα πολύ εύθρυπτη ώστε ο συγκεκριμένος τύπος ξυλάνθρακα δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για τις περισσότερες εφαρμογές. Επομένως, όπου είναι δυνατόν, ο φλοιός δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ή το ποσοστό του φλοιού που παραμένει μαζί με το κυρίως ξύλο πρέπει να ελαχιστοποιείται.

Τα μαλακά ξύλα παράγουν γενικά έναν μαλακότερο, πιο εύθρυπτο ξυλάνθρακα σε σχέση με τα ξύλα των πλατύφυλλων αλλά όπου είναι διαθέσιμα σε ποσότητα και σε κατάλληλη τιμή, αποτελούν μια καλή πρώτη ύλη και μπορούν να παράγουν όλους τους τύπους ξυλανθράκων.

Όπου είναι δυνατή η επιλογή του ανεφοδιασμού της πρώτης ύλης, όπως για παράδειγμα οι φυτείες που έχουν δημιουργηθεί για να παρέχουν ξύλο, αξίζει να επιλεχθεί τόσο το είδος του ξύλου όσο και το ποσοστό ανάπτυξης του προκειμένου οι ιδιότητες του ξυλάνθρακα να είναι βέλτιστες. Τα είδη ευκαλύπτων παράγουν τον καλό πυκνό ξυλάνθρακα και είναι για το σκοπό αυτό τα ευνοημένα είδη στις φυτείες. Στην περίπτωση που φυτεύεται κάποιο λιγότερο γνωστό είδος πρέπει να γίνουν προσεκτικές δοκιμές ώστε να οδηγήσει σε κάποιο αποδεδειγμένο και αποδεκτό τύπο ξυλάνθρακα.

Αυτό όμως που έχει σημασία μακροπρόθεσμα είναι η μάζα του εμπορεύσιμου ξυλάνθρακα που παράγεται ανά μονάδα μάζας της πρώτης ύλης. Ο όγκος του ξύλου που αναπτύσσεται ανά εκτάριο είναι μόνο ένας πρόχειρος δείκτης. Για παράδειγμα μεγάλη αύξηση του όγκου του ξύλου μπορεί να αντιστοιχεί σε χαμηλής πυκνότητας ξύλο και ως εκ τούτου χαμηλή παραγωγή ξυλάνθρακα ανά μονάδα όγκου του ξύλου καθώς το πυκνότερο ξύλο παράγει συνήθως έναν πυκνότερο, λιγότερο εύθρυπτο ξυλάνθρακα. Μολαταύτα οι ευκάλυπτοι αποτελούν ακόμα το ευνοημένο γένος.

3.3.2 Η περιεκτικότητα σε υγρασία

Η υγρασία στο ξύλο το οποίο φορτώνεται στον κλίβανο (φούρνο) πρέπει να εξατμιστεί χρησιμοποιώντας ενέργεια και αυτό μειώνει τη γενική παραγωγή. Επίσης ο χρόνος για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος ανθρακοποίησης είναι εκτεταμένος, κατά συνέπεια αυξάνεται το κόστος της διεργασίας. Από την άλλη ο διαθέσιμος όγκος των χλωρών, φρέσκων ξύλων είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από το ξηρό ξύλο και κατά συνέπεια όταν φορτώνεται στον κλίβανο (φούρνο) χλωρό ξύλο μειώνεται οριακά η ενεργή επιφάνειά του. Το ξύλο μπορεί να ξεραθεί στον αέρα χωρίς κανένα κόστος θέρμανσης. Το τμήμα ξήρανσης στον αέρα είναι κυρίως οικονομικό και όχι ενεργειακό συν την απώλεια πρώτης ύλης λόγω αποσύνθεσης της λόγω επίθεσης που δέχεται από έντομα και μύκητες. Είναι απαραίτητο λοιπόν να βρεθεί η βέλτιστη μέση χρονική λύση στην ξήρανση έτσι ώστε το μέγιστο ποσό υγρασίας να χάνεται την περίοδο που η απώλεια ύδατος είναι γρήγορη. Οι οικονομικές δαπάνες είναι λιγότερες και η απώλεια ξύλου λόγω των εντόμων και των μυκήτων είναι σχετικά ακόμα χαμηλή. Περίπου τρεις μήνες για ξήρανση είναι κατά προσέγγιση βέλτιστοι αλλά αυτό ποικίλλει με το κλίμα και το είδος του ξύλου. Αποτελεσματική ξήρανση είναι δύσκολη στους υγρούς τροπικούς κύκλους.

Το πόσο σημαντικό κεφάλαιο για την διαδικασία της ανθρακοποίησης αποτελεί το εν λόγω, μαρτυρά και ο πίνακας που παρατίθεται στην συνέχεια και που καθιστά φανερό με αριθμούς την απώλεια ενέργειας που μπορεί να υπάρξει ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας ενός ξύλου. Τα δεδομένα αφορούν

ευρωπαϊκό σκληρό ξύλο και φαίνεται πόσο αυξάνει βαθμιαία η ενέργεια που απαιτείται όσο το επί της % ποσοστό υγρασίας αυξάνει.

Υγρασία %	Ενέργεια που χρησιμοποιείται (MJ/m³)	Καυσαέρια (m³)	Ηλεκτρική ενέργεια (kWh)
5	35	210	2.5
10	40	270	3.2
15	154	490	4.4
20	293	770	5.2
25	460	1050	7.2
30	648	1400	9.0

Πίνακας 3.1 Επίδραση της υγρασίας του ξύλου στην απαιτούμενη ενέργεια

3.3.3 Οι διαστάσεις του ξύλου

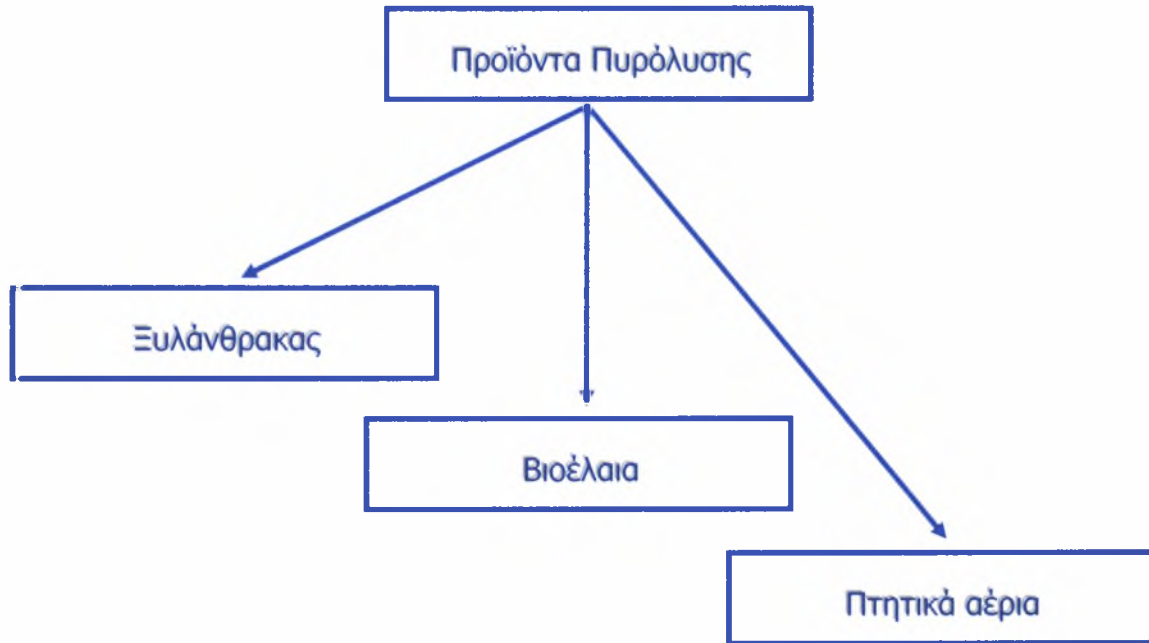
Το ποσοστό ανθρακοποίησης συσχετίζεται πολύ με το μέγεθος των κομματιών ξύλου. Τα μεγάλα κομμάτια ξύλου ανθρακώνονται αργά δεδομένου ότι η μεταφορά της θερμότητας στο εσωτερικό του ξύλου είναι σχετικά μια αργή διαδικασία. Το πριονίδι, από την άλλη, μπορεί με ακτινοβολία να ανθρακώνεται πολύ γρήγορα αλλά ο παραγόμενος κονιορτοποιημένος ξυλάνθρακας είναι χαμηλής αγοραστικής αξίας. Αφ' ετέρου, οι κορμοί μεγάλης διαμέτρου των σκληρών ειδών ξύλου μπορούν να καταστραφούν όταν ανθρακώνονται καθιστώντας τον ξυλάνθρακα πιο εύθρυπτο από αυτόν που θα παραγόταν από κορμούς μικρότερης διαμέτρου. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι ο ξυλάνθρακας με βέλτιστες ιδιότητες, για χρήση παραδείγματος χάριν στη βαριά

βιομηχανία, παράγεται όταν τα κομμάτια ξύλου είναι περίπου διαστάσεων 25-80 χιλιοστά μετρώντας εγκάρσια του κομματιού. Το μέγεθος κατά μήκος του κομματιού έχει μικρή επιρροή.

Στις φυτείες η ομοιομορφία των ξύλων όσον αφορά το μέγεθός τους μέγεθος είναι δυνατή αλλά από τα φυσικά δάση παράγεται ένα ευρύ φάσμα μεγεθών, όπως είναι λογικό. Η κοπή και ο διαχωρισμός του ξύλου είναι δαπανηρή εργασία (εργατικό δυναμικό, καύσιμα, κεφάλαιο) και πρέπει να αποφεύγονται οπουδήποτε αυτό είναι δυνατόν. Για την ανθράκωση των κορμών μεγάλων διαμέτρων και μικτού μεγέθους ξύλα οι αργοί κύκλοι ανθρακοποίησης είναι οι καταλληλότεροι. Το σύστημα δε των καμινιών είναι βέλτιστο για αυτή την περίπτωση. Εάν όμως χρησιμοποιηθούν κλίβανοι (φούρνοι) για τον αργό κύκλο, τότε καταλληλότεροι είναι αυτοί με μεγάλες διαστάσεις και αποτελούν μια αποδεδειγμένη λύση για την ανθρακοποίηση μεγάλης διαμέτρου (περίπου 0,5 μέτρα) σκληρού ξύλου από τα φυσικά δάση. Το πρόβλημα στην ανθρακοποίηση μπορεί να μειωθεί με την τοποθέτηση των κομματιών μεγάλης διαμέτρου στο κέντρο του φορτίου που μπαίνει στον κλίβανο. Γενικά, οι κλίβανοι μετάλλων χάνουν πολλή θερμότητα μέσω των τοιχωμάτων τους και κρυώνουν έτσι γρήγορα, έτσι είναι ατελέσφοροι στην ανθράκωση μεγάλων κομματιών ξύλου.

3.4 Χαρακτηριστικά των προϊόντων της αργής πυρόλυσης του Ξύλου

Γενικά τα προϊόντα της πυρόλυσης βιομάζας, ανάλογα αν η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η γρήγορη ή αργή (ανθρακοποίηση) πυρόλυση μπορούν να ταξινομηθούν και να παρουσιαστούν διαγραμματικά ως εξής:



Η ανθρακοποίηση (αργή πυρόλυση) των ξύλων οδηγεί σε ένα σύνθετο φάσμα από προϊόντα: στερεά, υγρά και πτητικά. Ο ξυλάνθρακας είναι μακράν το πιο διαδεδομένο και γνωστό προϊόν καθώς επίσης και το πιο οικονομικά συμφέρον. Δεκάδες χημικών ουσιών θα μπορούσαν να ανακτηθούν από το υγρό προϊόν, αλλά λόγω της παραγωγής τους από τις πετροχημικές βιομηχανίες αυτό είναι οικονομικά ασύμφορο. Έτσι, σήμερα, ο κύριος λόγος της ανθρακοποίησης των ξύλων είναι η παραγωγή κάρβουνου. Στην συνέχεια παρατίθεται πίνακας με τα κύρια προϊόντα που παράγονται από την ανθρακοποίηση 100 κιλών μαλακού ξύλου.

Προϊόν	Παραγωγή
Ξυλάνθρακας	32
Πίσσα	10
Οξικό οξύ	1,7
Ακετόνη	0,8
Νέφτι	0,6
Ελαφριά έλαια	0,4
Μεθανόλη	1,0
Μη-συμπυκνούμενα αέρια	22,0

Πίνακας 3.2 Παραγωγή προϊόντων πυρόλυσης από 100 Kg μαλακού ξύλου

Στην συνέχεια θα δοθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια οι ιδιότητες των κυρίων προϊόντων, ο ξυλάνθρακας δε λόγω της σημασίας του αντιμετωπίζεται λεπτομερέστατα.

3.4.1 Ξυλάνθρακας ή Κάρβουνο

Ένα τυπικό δείγμα ξυλάνθρακα λοιπόν περιέχει περίπου 80% άνθρακα, 1-3% στάχτη και 12-15% πτητικά συστατικά. Στις υψηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης, το περιεχόμενο ποσοστό άνθρακα αυξάνεται εντυπωσιακά. Η παραγωγή, το απορροφημένο νερό και το περιεχόμενο υδρογόνο μειώνονται γρήγορα καθώς η θερμοκρασία ανθράκωσης αυξάνεται. Ο ρυθμός παραγωγής δε, είναι τόσο χαμηλός στις υψηλότερες θερμοκρασίες ώστε η παραγωγή του ξυλάνθρακα σε αυτές τις θερμοκρασίες είναι μόνο θεωρητικού ενδιαφέροντος.

Όταν ένα ξύλο ανθρακώνεται έχει την τάση να συρρικνώνεται σε όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό εξηγεί την αντοχή και την αντίσταση του ξυλάνθρακα σε σύνθλιψη και σχηματοποίηση. Οι ανθρακόπλινθοι ξυλάνθρακα που πωλούνται στην αγορά παρασκευάζονται χαρακτηριστικά από σκόνη

κάρβουνου και ένα υλικό πληρώσεως, κυρίως αμυλόκολλας. Τα κομμάτια ξυλάνθρακα μπορούν να παραχθούν από τα μεγάλα κούτσουρα αν πελεκηθούν σε μικρότερα κομμάτια. Γενικά από πέντε τόνους ξύλου παράγεται ένας τόνος ξυλάνθρακα.

Η θερμοκρασία ανάφλεξης του ξυλάνθρακα είναι τόσο πιο υψηλή, όσο πιο υψηλή ήταν θερμοκρασία ανθρακοποίησης των ξύλων.

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την ποιότητα του ξυλάνθρακα έχουν προέρθει από την βιομηχανία του χάλυβα ή την χημική βιομηχανία. Έτσι, όταν ο ξυλάνθρακας εξάγεται οι αγοραστές τείνουν να χρησιμοποιήσουν αυτές τις βιομηχανικές ποιοτικές προδιαγραφές, ακόμα και αν ο βασικός προορισμός του ξυλάνθρακα είναι για ψήσιμο ή μαγείρεμα. Αυτός ο παράγοντας πρέπει να ληφθεί υπόψη μιας και οι οικιακές και οι βιομηχανικές απαιτήσεις και προδιαγραφές δεν είναι πάντα οι ίδιες και συνεπώς μια ευφυής αξιολόγηση των πραγματικών ποιοτικών απαιτήσεων της επικείμενης αγοράς μπορεί να οδηγήσει στο εφοδιασμό του κατάλληλου ξυλάνθρακα σε χαμηλότερη τιμή ή σε μεγαλύτερες ποσότητες, πράγμα που είναι θετικό και για τον αγοραστή και για τον πωλητή.

Η ποιότητα λοιπόν του ξυλάνθρακα καθορίζεται από διάφορες ιδιότητες και αν και όλες συσχετίζονται μέχρι ένα σημείο, η κάθε μία μετρείται και αξιολογείται χωριστά. Οι εν λόγω ιδιότητες παρουσιάζονται παρακάτω.

Περιοεκτικότητα υγρασίας

Ο ξυλάνθρακας φρέσκος από έναν μόλις ανοιγμένο κλίβανο περιέχει πολύ λίγη υγρασία και συνήθως απορροφά λιγότερο από 1% της υγρασίας του αέρα που τον περιβάλλει και αυτό προφανώς είναι και συνάρτηση του χρόνου κατά τον οποίο μένει εκτεθειμένος. Βέβαια ένας άλλος λόγος που μπορεί να αυξηθεί η υγρασία του είναι από το νερό της βροχής, όπου μπορεί να οδηγήσει το ποσοστό υγρασίας στο 5-10% ακόμα και για τον πολύ καλά ξηραμένο προϊόν. Η υγρασία είναι ένας παράγοντας που μειώνει την θερμαντική ικανότητα του ξυλάνθρακα. Σε μερικές περιπτώσεις όμως όπου ο ξυλάνθρακας

πωλείται με το βάρος κρατείται το ποσοστό υγρασίας υψηλό (με βρέξιμο του στην ανέντιμη προσπάθεια εξαπάτησης του αγοραστή). Ο όγκος και η εμφάνιση του προϊόντος όμως δεν μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου από την προσθήκη νερού για αυτό συνήθως προτιμάται να αγοράζεται με βάση τον ακαθάριστο όγκο του.

Οι ποιοτικές προδιαγραφές για τον ξυλάνθρακα περιορίζουν συνήθως την περιεκτικότητα υγρασίας σε περίπου 5-15% του ακαθόριστου βάρους του ξυλάνθρακα. Η περιεχόμενη υγρασία καθορίζεται από ένα ζυγισμένο δείγμα που ξηραίνεται σε φούρνο και εκφράζεται ως ποσοστό του αρχικού υγρού βάρους.

Πτητικά συστατικά εκτός του νερού

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται όλα εκείνα τα υγρά και πηκτώδη υπολείμματα, τα οποία δεν έχουν πλήρως απομακρυνθεί στο στάδιο της ανθρακοποίησης. Αν βέβαια η ανθράκωση παραταθεί και σε υψηλότερες θερμοκρασίες το περιεχόμενο των πτητικών ουσιών μειώνεται κατά πολύ. Το πτητικά σε έναν ξυλάνθρακα μπορούν να ποικίλουν από ένα μέγιστο 40% ή και πιο κάτω σε 5% ή λιγότερο. Μετριέται κατά την θέρμανση στους 900 °C σε περιβάλλον απουσίας αέρα ενός ζυγισμένου δείγματος άνυδρου ξυλάνθρακα. Η απώλεια βάρους που καταγράφεται είναι τα πτητικά. Ξυλάνθρακας με υψηλά ποσοστά πτητικών μπορεί εύκολα να αναφλεγεί αλλά μπορεί να παρουσιάσει και φλόγα όλο καπνό. Αντίθετα ξυλάνθρακας με χαμηλά ποσοστά πτητικών είναι δύσκολο να ανάψει, αλλά καίει πολύ καθαρά. Ένας καλός εμπορικός ξυλάνθρακας πρέπει να έχει καθαρό ποσοστό πτητικών περίπου στο 25-30%.

Σταθερή περιεκτικότητα σε άνθρακα

Το περιεχόμενο άνθρακα των διάφορων τύπων ξυλάνθρακα κυμαίνεται από περίπου 50% το χαμηλότερο έως γύρω στο 95% το μέγιστο. Κατά συνέπεια ο ξυλάνθρακας αποτελείται κυρίως από άνθρακα. Το περιεχόμενο άνθρακα υπολογίζεται συνήθως από μια "διαφορά", δηλαδή, όλα τα άλλα

οι στατικά αφαιρούνται από το 100 ως ποσοστά και το υπόλοιπο υποτίθεται είναι το επί τις % ποσοστό του 'καθαρού' ή 'σταθερού' άνθρακα.

ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΤΈΦΡΑ

Η στάχτη καθορίζεται με θέρμανση ενός ζυγισμένου δείγματος σε κόκκινη φλόγα και παρουσία αέρα ώστε να καεί όλο το καύσιμο υλικό. Το περιεχόμενο τέφρας του ξυλάνθρακα ποικίλλει από περίπου 0.5% έως πάνω από 5% ανάλογα με το είδος του ξύλου, το ποσοστό του φλοιού που έχει ανθρακωθεί μαζί με το ξύλο και το ποσοστό μόλυνσης των ξύλων από χώμα και άμμο. Ο καλός ποιοτικός ξυλάνθρακας έχει περιεκτικότητα σε τέφρα περίπου 3%.

Χαρακτηριστικές αναλύσεις

Προκειμένου να συσταθούν εμπορικοί πίνακες για τον ξυλάνθρακα, που να ορίζουν το εύρος της σύνθεσης του και τις ιδιότητες του λαμβάνονται μετρήσεις από τυχαία δείγματα ξυλάνθρακα, από διάφορα είδη ξύλων και τα οποία έχουν ανθρακωθεί με διάφορους τρόπους. Γενικά, από όλα τα ξύλα και από όλες τις διεργασίες και τεχνικές ανθράκωσης μπορεί να παραχθεί ξυλάνθρακας εμπορικών προδιαγραφών. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με την ανάλυση Ξυλοκάρβουνο προερχόμενο από διάφορες ποικιλίες ξύλου και διαφορετικές μεθόδους ανθρακοποίησης

Wood species	Production Method	Moisture content %	Ash %	Volatile matter - %	Fixed carbon %	Bulk density raw - kg/m ³	Bulk density pulverised kg/m ³	Gross calorific value kJ/kg Oven dry basis	Remarks
Dakama	Earth pit	7.5	1.4	16.9	74.2	314	708	32410	Pulverised fuel for rotary kilns 1/
Wallaba	"	6.9	1.3	14.7	77.1	261	563	35580	1/
Kautaballi	"	6.6	3.0	24.8	65.6	290	596	29990	1/
Mixed Tropical Hardwood	"	5.4	8.9	17.1	68.6				Low grade charcoal fines 1/
"	"	5.4	1.2	23.6	69.8				Domestic charcoal 1/
Wallaba	Earth mound	5.9	1.3	8.5	84.2				Well burned sample 1/
"	"	5.8	0.7	46.0	47.6				Soft burned sample 1/

Oak	Portable steel kiln	3.5	2.1	13.3	81.1			32500	2/
Coconut shells	"	4.0	1.5	13.5	83.0			30140	4/
Eucalyptus Saligna	Retort	5.1	2.6	25.8	66.8				3/

1/= Guyana. 2/= U.K. 3/= Brazil. 4/= Fiji.

Πίνακας 3.3 Τυπική Ανάλυση Ξυλοκάρβουνου (FAO 1)

Σε ένα εργοστάσιο παραγωγής σιδήρου στην Βραζιλία όπου χρησιμοποιείται κάρβουνο σε μορφή μπριγκέτας στον κλίβανο παρατηρήθηκε ότι ετησίως η φυσική και χημική σύσταση του κάρβουνου δεν ήταν σταθερή αλλά είχε διακυμάνσεις όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα. Να σημειωθεί ότι το κάρβουνο προέρχονταν από διάφορες ποικιλίες ξύλου από τα τοπικά δάση και από Ευκάλυπτο φυτρώριου και χρησιμοποιούνταν με αναλογία 60% – 40%.

Chemical and Physical Composition of Charcoal Dry Basis - by weight	Range		Yearly Average	Charcoal considered good to excellent
	Max.	Min.		
Carbon	80%	60%	70%	75 - 80%
Ash	10%	3%	5%	3 - 4%
Volatile matter	26%	15%	25%	20 - 25%
Bulk density - as received (kg/m ³)	330	200	260	250 - 300
Bulk density - dry	270	180	235	230 - 270
Average Size (mm) as received	60	10	35	20 - 50
Fines content - as received (<6.35 mm)	22%	10%	15%	10% max.
Moisture content -as received	25%	5%	10%	10% max.

Πίνακας 3.4 Τυπική Ανάλυση Ξυλάνθρακα από εργοστάσιου σιδήρου (FAO 1)

Φυσικές Ιδιότητες

Οι ιδιότητες που έχουν περιγραφεί έως τώρα αφορούν τις χημικές του ιδιότητες, αλλά οι φυσικές ιδιότητες ειδικά για τον βιομηχανικής χρήσης ξυλάνθρακα είναι εξίσου σημαντικές. Ειδικά για τον ξυλάνθρακα που προορίζεται για την χαλυβουργία οι φυσικές του ιδιότητες είναι ότι σημαντικότερο. Η πιο βασική ιδιότητα που απαιτείται για τους φούρνους έκχυσης στην μεταλλουργία είναι η αντοχή του στην συντριβή και σύνθλιψη. Διάφορα τεστ έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να μετρηθεί η αντίσταση στο 'σπάσιμο', μια μάλλον δύσκολη ιδιότητα για να καθοριστεί με αντικειμενικούς όρους. Όλες αυτές οι δοκιμές στηρίζονται στην μέτρηση της αντίστασης του ξυλάνθρακα στην καταστροφή του ή τον κατακερματισμό του αφήνοντας ένα δείγμα να πέσει από ένα ύψος επάνω σε ένα στερεό χαλύβδινο πάτωμα, έτσι ώστε να καθοριστεί το μέγεθος της αστοχίας μετά από έναν ορισμένο χρόνο. Το αποτέλεσμα εκφράζεται ως το ποσοστό του κρατείται ή περνάει σε κόσκινα διαφόρων διαμετρημάτων.

Δυνατότητα προσρόφησης

Ο ξυλάνθρακας που παράγεται από ξύλα είναι η βασική πρώτη ύλη για την δημιουργία του 'ενεργού' ξυλάνθρακα. Καθώς παράγεται ο κανονικός ξυλάνθρακας από τα ξύλα, δεν είναι ιδιαίτερα ενεργό υλικό ώστε να απορροφά υγρά ή ατμούς γιατί στην τελική δομή του υπάρχουν πηκτώδη υπολείμματα. Άρα, η διαδικασία στο να μετατραπεί σε ενεργός επικεντρώνεται στην προσεκτική αφαίρεση από την δομή του αυτών των υπολειμμάτων. Ο ενεργός ξυλάνθρακας χρησιμοποιείται ως καταλύτης σε διάφορες χημικές διεργασίες. Ακόμα και μετά την ενεργοποίηση του ο ξυλάνθρακας εξετάζεται αν πληροί κάποιες ποιοτικές προδιαγραφές. Καθορίζεται για παράδειγμα η ισχύ του να αποχρωματίσει, με την προσρόφηση, υδατικά διαλύματα, όπως ο ακατέργαστος χυμός ζάχαρης, μούστος, καθώς επίσης και στα έλαια για παράδειγμα τα φυτικά προκειμένου να προσροφηθούν διαλύτες όπως ο αιθυλικός οξικός εστέρας. Στα παραπάνω τεστ μετράται και καθορίζεται η

προσροφητική ικανότητα του. Το ξύλο που παράγει τον καταλληλότερο ξυλάνθρακα ώστε να μετατραπεί σε ενεργός έχει αποδειχτεί ότι είναι του ευκαλύπτου και έχει επίσης βρεθεί ότι ξυλάνθρακας κατάλληλος για προσρόφηση υγρών και αερίων φτιάχνεται από καρύδες καθώς παρουσιάζει ιδιαίτερη αντοχή στην κονιορτοποίηση του.

Χημική σύνθεση

Τα συστατικά στοιχεία του ξυλάνθρακα είναι άνθρακας, πίσσα και τέφρα. Οι σχετικές αναλογίες του καθενός συστατικού απεικονίζουν το περιεχόμενο σε στάχτη του αρχικού ξύλου από το οποίο προήρθε ο ξυλάνθρακας και την θερμοκρασία που η ανθρακοποίηση ολοκληρώθηκε. Οι αναλογίες αυτές είναι δυνατό να ποικίλουν και να διαφέρουν κατά πολύ.

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τα παραπάνω μπορούμε να δούμε τον παρακάτω πίνακα που παρουσιάζει το πτητικό υπόλειμμα και την απόδοση του ξυλάνθρακα στις διάφορες θερμοκρασίες ανθρακοποίησης για τον Αυστραλέζικο ευκάλυπτο αλλά και για ένα μέσο όρο 15 διαφορετικών ειδών

Species		Carbonization Temperature C							
		350	400	450	500	590	700	800	950
Euc camaldulensis									
	% volatiles	39.4	35.8	31	26	16.7	4.4	0	0
	% yield	49.7	46.8	43.6	40.7	36.2	31.5	30.1	30.1
Euc saligna									
	% volatiles	40.4	37.8	30	24.9	15.8	4.1	0	0
	% yield	49.9	47.9	42.6	39.8	35.4	31.1	29.8	29.8
Mean of 15 spp									
	% volatiles	39.8	35.3	29.9	24.6	16.2	4.6	.5	0
	% yield	47.4	44.1	40.7	37.8	34.1	30	28.7	28.5

Πίνακας 3.5 Πτητικό υπόλειμμα και απόδοση ξυλάνθρακα σε διαφορετικές θερμοκρασίες ανθρακοποίησης (FAO 1)

Ενδεικτικά πρέπει να αναφερθεί ότι για την στάχτη και τα υπόλοιπα ανόργανα συστατικά που εμπεριέχονται στο ξυλοκάρβουνο κύρια ευθύνεται ο φλοιός του ξύλου που περιέχει και το μεγαλύτερο ποσό όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί σχεδόν το 10 % του φλοιού έχει στάχτη και 1-2 % έχει χρώμα.

Species	Percentage		parts per million (ppm)										
	% Ash	% Silica	P	Ca	Mg	K	Na	AL	Fe	Mn	Zn	S	Cl
Eucalyptus camaldulensis													
bark	9.65	1.768	385	32150	2765	4185	1060	130	70	415	15	-	2455
sapwood	.49	.004	155	675	220	1858	303	20	38	83	5	-	910
heartwood	.07	trace	14	235	100	53	33	8	18	7	4	-	-
Eucalyptus saligna													
bark	9.19	1.208	185	32030	1700	3250	1955	125	75	330	8	1660	2615
sapwood	.43	.056	100	550	250	900	215	15	50	15	9	660	440
heartwood	.07	.002	5	280	60	100	60	10	25	4	4	340	65

Bark : φλοιός sapwood : εσωτερικό του φλοιού heartwood : καρδιά του ξύλου

Πίνακας 3.5 Περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά «Ευκάλυπος» (FAO1)

Ενδεικτικά παρουσιάζουμε παρακάτω αποτελέσματα μετρήσεων για την σύσταση του τελικού ξυλοκάρβουνου που παρήχθη σε "JMK" kiln.

Θερμοκρασία πυρόλυσης	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Άνθρακας %	52	63	72,5	78
Βιοέλαια %	42	30,5	21	15
Στάχτη %	4,5	5,5	6	6,5
Υγρασία %	1,5	1	0,5	0,5

σχήμα 3.6 Σύσταση ξυλάνθρακα ανάλογα τελικής θερμοκρασίας πυρόλυσης

3.4.2 Οξειδία της πυρόλυσης (Pyrolygneous acid)

Το υγρό συμπύκνωμα που παραμένει στον κλίβανο μετά το τέλος της πυρόλυσης είναι γνωστό ως τα οξειδία της πυρόλυσης. Πίσσα αδιάλυτη σε υγρό συμπυκνώνεται και διαχωρίζεται από την υγρή φάση. Η σύνθεση των εν λόγω οξειδίων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και μόνο στις βασικές ουσίες μπορούμε να αναφερθούμε. Η παραγωγή των οξειδίων είναι σημαντική για τον καθορισμό των οικονομικών της ανάκτησης και ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του ξύλου που ανθρακώνεται. Η ευρωπαϊκή οξιά, το σκληρό ξύλο που διαμόρφωσε τη βάση της αντίστοιχης ευρωπαϊκής βιομηχανίας, έχει υψηλό περιεχόμενο μονοσακχαριτών και αυτό οδηγεί σε υψηλή παραγωγή του πολύτιμου οξικού οξέος. Το ξύλο ευκαλύπτου απ' την άλλη δίνει πολύ χαμηλότερη παραγωγή οξικού οξέος καθώς και άλλων προϊόντων. Ο τύπος της ανθράκωσης που χρησιμοποιείται, όπως έχει αναφερθεί αρκετές φορές, επηρεάζει την παραγωγή και των παραπροϊόντων. Δεν είναι λοιπόν να δοθούν καθορισμένες προβλέψεις για την παραγωγή παραπροϊόντων, πρέπει να γίνουν ακριβείς δοκιμές και πειράματα σε μεγάλο εύρος πριν δοθούν χρήματα για την ανάκτηση και την αποκατάσταση των παραπροϊόντων.

Ο πίνακας που ακολουθεί είναι ενδεικτικός για την παραγωγή οξειδίων που προέρχονται από την ανθράκωση σκληρών ξύλων του βόρειου ημισφαιρίου και αφορά 1000 κιλά στον αέρα στεγνωμένο ξύλου (air dry wood).

Οξικό οξύ	50 Kg
Μεθανόλη	16 Kg
Ακετόνη και μεθυλική ακετόνη	8 Kg
Διαλυτές πίσσες	190 Kg
Αδιάλυτες πίσσες	50 Kg

Πίνακας 3.7 Παραγόμενα οξειδία από ανθρακοποίηση 1000Kg σκληρού ξύλου

Οξικό οξύ

Το οξικό οξύ είναι το πολυτιμότερο από οικονομικής πλευράς προϊόν που μπορεί να ανακτηθεί από τα οξειδία της πυρόλυσης. Αν και η ποσότητα του οξικού οξέως που πωλείται ως παραπροϊόν πυρόλυσης ξύλων είναι σήμερα μάλλον ασήμαντο, ωστόσο μερικές φορές αναζητείται για ορισμένες χρήσεις επειδή είναι αρκετά καθαρό. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση του οξέως από το συμπύκνωμα βασίζεται στην διεργασία της διάλυσης αφού πρώτα έχουν απομακρυνθεί οι διαλυτές πίσσες και η μεθανόλη και η ακετόνη. Καθαρίζεται μέσω απόσταξης. Είναι δυνατό να παραχθούν διάφοροι βαθμοί που ποικίλλουν σε καθαρότητα και οξύτητα.

Μεθανόλη και αιθανόλη

Λόγω των χαμηλών τιμών που έχουν αυτά τα προϊόντα καθώς παράγονται από την πετροχημική βιομηχανία και το υψηλό κόστος που παρουσιάζει η ανάκτηση τους με υψηλή καθαρότητα από τα οξέα της πυρόλυσης συνηθίζεται να ανακτώνται ως μίγμα που περιέχει και την μεθυλική ακετόνη. Το μίγμα πωλείται ως διαλύτης για χρήση στη βιομηχανία χρωμάτων.

Οι πίσσες

Η αδιάλυτη πίσσα είναι ένα χρήσιμο προϊόν στην κτηνιατρική ως αντισηπτικό, επίσης και ως ουσία για την συντήρηση των ξύλων καθώς την χρησιμοποιούν για καλαφάτισμα. Όταν παράγεται από την πυρόλυση μαλακού ξύλου καλείται συνήθως ως πίσσα της Στοκχόλμης. Ανακτάται από το συμπύκνωμα με μετάγγιση εύκολα και σχετικά απλά. Οι αρωματικές ουσίες πολύτιμες στην ιατρική και την αρωματοποιία μπορούν να χωριστούν από την πίσσα με σύνθετες χημικές διαδικασίες.

Η διαλυτή πίσσα είναι δυσκολότερη στην αγορά. Αυτή η ουσία είναι ένα σύνθετο μίγμα ιδιαίτερα συμπυκνωμένων καλά αναμίξιμων συστατικών για τα οποία πολύ λίγες χρήσεις φαίνονται να υπάρχουν. Έτσι, έχει χρησιμοποιηθεί ως

πρόσθετο για την παραγωγή πορωδών υλικών για οικοδομές και φυσικά μπορεί να καεί ως καύσιμο.

Οι πίσσες από την πυρόλυση ξύλων πρέπει να αναγνωριστούν ως ρύποι του περιβάλλοντος και ως εκ τούτου δεν πρέπει να επιτρέπεται να καταλήγουν ως απόβλητα στο περιβάλλον. Εναλλακτικά οι πίσσες και όλο το πτητικό υλικό μπορούν να καούν ως καύσιμα. Από πολλές απόψεις αυτή είναι και η καλύτερη χρήση για το συγκεκριμένο παραπροϊόν παρά να επενδυθούν χρήματα για την ανάκτηση του.

4. Κλίβανοι - Φούρνοι Πυρόλυσης

4.1 Γενικές πληροφορίες

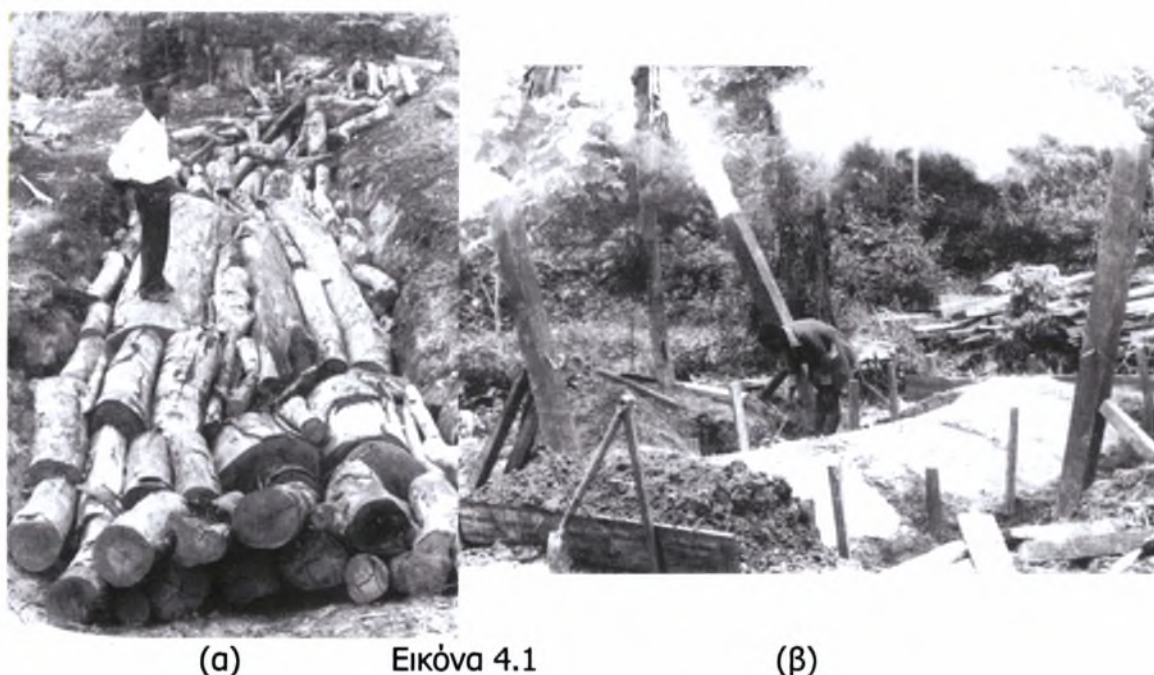
Η πρώτη εμφάνιση παραγωγής και καύσης κάρβουνου συνδέεται στενά με τις αρχές της μεταλλουργίας περίπου πριν από 5000 έτη. Οι προσπάθειες να τηχτούν τα μέταλλα με φωτιά από καύση ξύλου δεν θα μπορούσαν ποτέ να είναι εξ ολοκλήρου επιτυχείς, δεδομένου ότι θα ήταν αδύνατο να επιτευχθούν οι απαιτούμενες αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Όταν το ξύλο καίγεται υπάρχει μια μεγάλη ποσότητα νερού που πρέπει να απομακρυνθεί, ενώ συγχρόνως εμφανίζονται και διάφορες πτητικές ουσίες, γεγονός που περιορίζει τη θερμοκρασία της πυρκαγιάς. Αντιθέτως, καίγοντας κάρβουνο, παράγεται πολύ υψηλότερη θερμοκρασία της φλόγας (αρκετά πάνω από 1000°C), με λίγο καπνό. Οι συνθήκες αυτές είναι ιδανικές για την τήξη και την επεξεργασία των μετάλλων.

Ο ξυλάνθρακας παράγεται στους κλιβάνους από μια μορφή καύσης που ονομάζεται πυρόλυση. Οι αποδοτικότητες είναι γενικά χαμηλές, αλλά ο ξυλάνθρακας έχει τα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα καυσόξυλα την ευκολότερη διανομή και υψηλότερη θερμότητα αναλογικά με το βάρος του. Η παλαιότερη και πιθανώς ακόμα ευρύτετα χρησιμοποιημένη μέθοδος για την παραγωγή ξυλάνθρακα είναι ο γήινος κλίβανος (κλίβανος γήινων κοιλωμάτων, κλίβανος γήινων αναχωμάτων). Διάφοροι άλλοι τύποι κλιβάνων ξυλάνθρακα έχουν αναπτυχθεί, οι οποίοι έχουν γενικά τις υψηλότερες αποδοτικότητες αλλά απαιτούν και υψηλότερες επενδύσεις. Δύο συχνά χρησιμοποιημένοι τύποι είναι οι σταθεροί κλίβανοι φτιαγμένοι από λάσπη, άργιλο και τούβλα, και οι φορητοί κλίβανοι χάλυβα. Παρακάτω θα δούμε αναλυτικότερα τα διάφορα είδη κλιβάνων, στοιχεία που πήραμε από το εγχειρίδιο του FAO "Simple technologies for charcoal making". (FAO2)

4.2 Τύποι Κλιβάνων – Φούρνων

4.2.1 Κλιβανος γήινων κοιλωμάτων (earth pit)

Αυτός ο τύπος φούρνου αποτελείται από μια κοιλότητα στη γη (εικόνα 4.1α) στην οποία στοιβάζονται τα ξύλα και μετά καλύπτονται ώστε να καούν με απουσία οξυγόνου. Η χρησιμοποίηση της γης ως ασπίδα ενάντια στο οξυγόνο και την υπερβολική απώλεια θερμότητας κατά την διάρκεια της ενανθράκωσης (πυρόλυσης) του ξύλου είναι το παλαιότερο σύστημα που χρησιμοποιήθηκε. Ίσως ακόμη και σήμερα να είναι η πιο ευρεία διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής κάρβουνου. Επιβάλλεται επομένως, προσεκτική μελέτη για να ζυγιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Προφανώς, η μέθοδος αυτή κρατά την πρώτη θέση λόγω του χαμηλού κόστους της.



(α) κλιβανος γήινων κοιλωμάτων κατά τη διάρκεια της φάσης φόρτωσης

(β) κλιβανος γήινων κοιλωμάτων κατά τη διάρκεια του καψίματος

Υπάρχουν δύο τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλυφθούν οι κοιλότητες ώστε να αποτραπεί το πλήρες κάψιμο των ξύλων. Ο πρώτος είναι ο εξής: πάνω από το κούλωμα, στο οποίο έχουμε ήδη τοποθετήσει

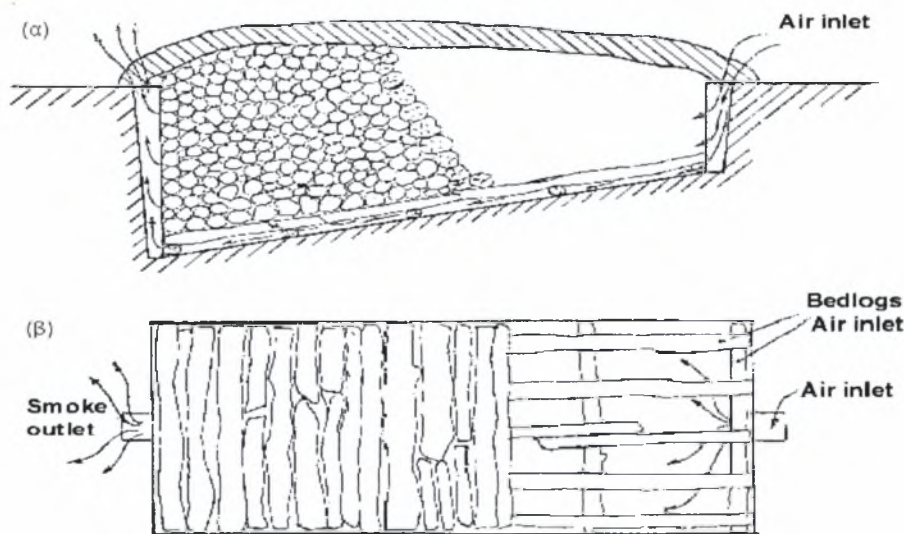
το ξύλο τοποθετούμε το χώμα το οποίο έχουμε από το σκάψιμο της κοιλότητας. Ο άλλος τρόπος είναι να δημιουργηθεί ένα κάλυμμα από έναν σωρό από κλαδιά με πράσινα φύλλα ή από φύλλα μετάλλων. Και οι δύο μέθοδοι, εάν πραγματοποιούνται σωστά, μπορούν να παραγάγουν καλής ποιότητας κάρβουνο, αναλογικά με τους τεχνολογικούς περιορισμούς τους.

Στους φούρνους γήινων κοιλωμάτων ο τρόπος παρασκευής του κάρβουνο είναι ο εξής: τα ξύλα στοιβάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματιστεί μια δίοδος στην άκρη για να απομακρύνονται τα αέρια (καπνοδόχος). Η μορφή που έχει ο σωρός των ξύλων μέσα στην κοιλότητα είναι ημικυκλική. Στη βάση του φούρνου και στην αντίθετη άκρη από την καπνοδόχο σκάβουμε ένα άνοιγμα ώστε να μπορούμε να τροφοδοτούμε αέρα. Επόμενο βήμα είναι να ανάψουμε φωτιά στο κάτω μέρος των ξύλων. Στη συνέχεια καλύπτουμε το κούλωμα με έναν από τους δύο τρόπους που προαναφέρθηκαν. Όταν το ξύλο είναι αναμμένο και η κοιλότητα καλυμμένη, η ένταση της πυρκαγιάς ρυθμίζεται με το άνοιγμα και το κλείσιμο της διόδου αέρα στη βάση. Ο έλεγχος της εισόδου του αέρα εξασφαλίζει ότι το ξύλο σιγοκαίει και κατ' αυτό τον τρόπο μετατρέπεται αργά σε κάρβουνο. Αυτή η διαδικασία διαρκεί μερικές ημέρες. Όταν ανοιχτεί ο φούρνος για να πάρουμε το κάρβουνο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, διότι η επαφή του κάρβουνο, που βρίσκεται σε πολύ μεγάλη θερμοκρασία, με τον αέρα μπορεί να προκαλέσει την ανάφλεξή του.

Ένας άλλος διαχωρισμός των φούρνων γήινων κοιλωμάτων είναι αυτός των μεγάλων και μικρών κοιλωμάτων. Τα μικρά κούλωμα, μέχρι ένα κυβικό μέτρο, είναι χρήσιμα για τα μικρά ποσά ξυλάνθρακα από αρκετά ξηρό ξύλο. Η μέθοδος υιοθετείται στο επίπεδο της ιδιοπαραγωγής και είναι συνήθως πάρα πολύ χαμηλή σε παραγωγικότητα για να παρέχει τα μεγάλα εμπορικά ποσά. Για την παραγωγή του κάρβουνο βάζουμε αρχικά στο κούλωμα τα μικρά, ξηρά ξύλα με τα οποία θα ανάψουμε τη φωτιά που χρειάζεται για να γίνει η πυρόλυση. Επάνω τοποθετείται η υπόλοιπη ποσότητα ξύλου μέχρι να γεμίσει το κούλωμα. Ένα στρώμα φύλλων περίπου 20 εκατοστά παχύ τοποθετείται πάνω από το ξύλο και έπειτα χώμα (και αυτό περίπου 20 εκατοστά παχύ).

Στα μεγάλα κοιλώματα το κάψιμο πραγματοποιείται σταδιακά από το ένα άκρο του φούρνου στο άλλο. Τα μεγαλύτερα κοιλώματα που παράγουν 6 τόνους ή περισσότερο κάρβουνο τη φορά, είναι δυσκολότερο να ελεγχθούν, αλλά είναι αποδοτικότερα στις περιπτώσεις παραγωγής για εμπόριο. Οι κάψες μικρότεροι έχουν καλύτερη ροή αέρα και παράγουν πιο ομοιόμορφο σε ποιότητα κάρβουνο, αλλά υστερούν σε ποσότητα παραγωγής. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ένα μεγάλο κοίλωμα περίπου 30 m³. Το παραγόμενο κάρβουνο θα είναι περίπου 26 m³. Περίπου τέσσερις ημέρες δουλειάς ενός ατόμου απαιτούνται για να σκάφτει το κοίλωμα και να προστεθούν τα κανάλια τον καπνό.

Το κοίλωμα φορτώνεται με κούτσουρα μήκους 2,4m ή μικρότερα. Κατά τη διάρκεια της φόρτωσης, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να καλυφθούν όσο το δυνατόν περισσότερα κενά μεταξύ των κούτσουρων και έτσι να βελτιωθεί η ογκομετρική αποδοτικότητα.



Σχήμα 4.2

(α) κοίλωμα 30m³ - διαμήκης τομή

(β) κοίλωμα 30m³ - κάτοψη - χωρίς την γήινη κάλυψη

Στην περίπτωση ενός φούρνου γήινων κοιλωμάτων, η ποιότητα του κάρβουνου που παίρνομε δεν είναι σταθερή.

Επειδή αρκετή ενέργεια από το ξύλο χάνεται στη διαδικασία ξήρανόσής του, το ξηρό ξύλο παράγει τον καλύτερο κάρβουνο, με υψηλότερη αποδοτικότητα.

4.2.2 Κλίβανος γήινου αναχώματος (earth mounts)

Η εναλλακτική λύση της προηγούμενης ιδέας είναι να συσσωρευτεί το ξύλο επάνω από το έδαφος και να καλυφθεί η στοίβα με χώμα και κλαδιά (εικόνα 4.3). Αυτός ο τύπος κλιβάνου ονομάζεται κλίβανος γήινου αναχώματος.



Εικόνα 4.3 (α) στοίβαγμα ξύλων

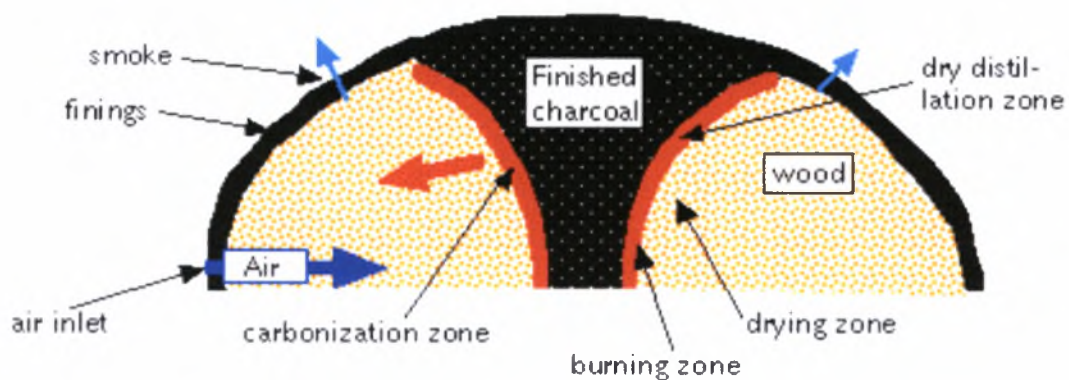
(β) κάλυψή τους με κλαδιά και χώμα

Και αυτή η μέθοδος είναι πολύ παλαιά και χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές χώρες. Μελέτες έχουν γίνει σε μερικές χώρες για να βελτιστοποιήσουν τη διαδικασία και γι' αυτό το λόγο υπάρχουν πολλές παραλλαγές. Ουσιαστικά η διαδικασία είναι ίδια με την περίπτωση του κοιλώματος - το ξύλο που ανθρακώνεται εσωκλείεται κάτω από χώμα. Το γήινο ανάχωμα προτιμάται από το κοίλωμα εκεί που το χώμα είναι σκληρό ή η στάθμη του νερού είναι κοντά στην επιφάνεια της γης. Κλίβανοι αναχώματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν επανειλημμένως, ενώ τα κοιλώματα μετά από μερικές φορές πρέπει να εγκαταλείπονται και να δημιουργούνται καινούργια. Το επαναλαμβανόμενο σκάψιμο των κοιλωμάτων δεν είναι εύκολο σε περιοχές με γεωργικές καλλιέργειες και σε λιβάδια. Τα καυσόξυλα που ανθρακώνονται, σε ένα

ανάχωμα μπορούν επίσης να μαζευτούν στο σημείο του αναχώματος, και να μείνουν εκεί ακόμα και για μια περίοδο μηνών ώστε να στεγνώσουν πριν καλυφτούν για να πυρολυθούν.

Το σύστημα κλιβάνων αναχωμάτων είναι ευπροσάρμοστο. Είναι κατάλληλο τόσο για μικρής κλίμακας παραγωγή κάρβουνου όσο και μεγάλης κλίμακας.

Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου κλιβάνου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.4: Αρχή λειτουργίας κλιβάνου γήινων αναχωμάτων

Ένας ημικυκλικός σωρός ομοιόμορφα διατεταγμένων κούτσουρων συσσωρεύεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μείνει ένα άνοιγμα στο κέντρο, το οποίο θα παίζει το ρόλο της καπνοδόχου. Ο όγκος του σωρού είναι συνήθως 5-8 κυβικά μέτρα για έναν μεσαίου μεγέθους κλίβανο. Η κορυφή του σωρού καλύπτεται με φύλλα και χώμα όπως στα συστήματα κοιλωμάτων. Ένα άνοιγμα στη μια πλευρά αφήνεται για το άναμμα της φωτιάς. Στη βάση του αναχώματος και περιμετρικά αυτού ανοίγονται κάποιοι δίοδοι για την παροχή αέρα. Αυτές οι δίοδοι αέρα ανοίγουν και κλείνουν για να ελέγξουν μέγεθος της φωτιάς ώστε να μην καούν τελειώς τα ξύλα.

Ένα συνηθισμένο ανάχωμα για σχετικά μικρή παραγωγή κάρβουνου έχει διάμετρο βάσης περίπου τέσσερα μέτρα είναι 1 με 1,5 μέτρα ψηλό και έχει ημισφαιρική μορφή. Έχει περίπου έξι έως δέκα κολπίσκους αέρα στη βάση και ένα άνοιγμα στην κορυφή περίπου άνοιγμα με 20 εκατοστά διάμετρο επιτρέπει την έξοδο του καπνού κατά τη διάρκεια του καψίματος.

Εάν είναι απαραίτητο, η γήινη κάλυψη αφήνεται για να στεγνώσει για μια ημέρα περίπου και έπειτα ξεκινάει η διαδικασία. Εμφάνιση πυκνού άσπρου καπνού στην κορυφή δείχνει ότι η πυρκαγιά είναι υπό έλεγχο. Μετά από ένα χρονικό διάστημα μερικών ημερών ο καπνός γίνεται γαλάζιος και τελικά γίνεται διάφανος. Η κόκκινη φλόγα είναι ανεπιθύμητη και δεν πρέπει να εμφανίζεται σε κανένα στάδιο. Ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε υγρασία των ξύλων και από την ελευθερία των αερίων της καύσης να κυκλοφορούν ομοιόμορφα σε όλα τα σημεία του σωρού των ξύλων. Όταν ο χειριστής αισθανθεί στους «τοιχούς» του αναχώματος κρύα ή καυτά σημεία πρέπει να ανοίξει ή να κλείσει τους εξαεριστήρες της βάσης. Όταν κρίνεται ότι η διαδικασία είναι πλήρης, το άνοιγμα στην κορυφή και όλες στους κολπίσκους αέρα της βάσης πρέπει να κλείσουν προσεκτικά με τούβλα ή πέτρες και να σφραγιστούν με άργιλο. Το ανάχωμα θα δροσιστεί σε περίπου δύο ή τρεις ημέρες, εάν είναι μικρό. Όταν ο γήινος κλιβανός είναι δροσερός μπορεί να ανοιχθεί. Για λόγους ασφαλείας περίπου 100 λίτρα νερού πρέπει να είναι διαθέσιμα για αντιμετωπιστεί τυχόν περίπτωση πυρκαγιάς. Το κάρβουνο συλλέγεται και τοποθετείται σε σακιά για να μεταφερθεί προς πώληση. Το ανάχωμα μόλις καθαριστεί πλήρως από το σωρό των κάρβουνων μπορεί ξαναγεμιστεί με ξύλα για μια νέα παραγωγή. Οι παραγωγή κατά βάρος κάρβουνου ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες κατά τη διάρκεια του καψίματος, την ξηρότητα των ξύλων και εξάλειψη των διαρροών στα τοιχώματα του αναχώματος. Η παραγωγή ενός τόνου κάρβουνου από τέσσερις τόνους των ξηρών ξύλων αντιπροσωπεύουν την ορθή πρακτική. Η παραγωγή ενός τόνου από έξι τόνους ξύλων είναι η πιο συνηθισμένη.

Μια πιο αποδοτική παραλλαγή είναι να ανάψουν φωτιές σε αρκετά σημεία ώστε να γίνεται πιο ομοιόμορφα η πυρόλυση. Το σύστημα είναι επιτυχές όταν

δεν υπάρχει καμιά διαρροή αέρα στην κάλυψη. Στην πράξη, η μη ποιοτική παραγωγή του κάρβουνου είναι συνηθισμένη επειδή είναι δύσκολο τα μεγάλα κούτσουρα που κυλιούνται να στοιβαχτούν ομοιόμορφα, και έτσι η κυκλοφορία των αερίων είναι ακανόνιστη και η πυρόλυση ανομοιόμορφη. Επίσης η σωστή κάλυψη των σωρών είναι δύσκολη. Είναι δύσκολο να ανιχνευθούν οι διαρροές στην κάλυψη των πολύ μεγάλων αναχωμάτων, αλλά ακόμα και αν ανιχνευθούν, είναι τόσο δύσκολο όσο και επικίνδυνο να επισκευάσουν κατά την διάρκεια της πυρόλυσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι διαρροές αέρα δεν ελέγχονται και αντί να έχουμε κάρβουνο, το ξύλο καίγεται σε τέφρα σε μερικά μέρη του σωρού προτού να ανθρακωθεί κατάλληλα το υπόλοιπο. Ένα περαιτέρω πρόβλημα είναι ότι οι λειτουργικές δαπάνες πολλές φορές τείνουν να ξεφύγουν από τον έλεγχο και ολόκληρη η λειτουργία γίνεται ασύμφορη. Και αυτό επειδή είναι δύσκολο να συνδυαστεί το υψηλός κόστος για την μεταφορά και σωστή τοποθέτηση τόσο μεγάλων ξύλων με ένα τεχνολογικά πρωτόγονο σύστημα παραγωγής κάρβουνου. Μια τέτοια περίπτωση μπορεί να είναι συνολικά κερδοφόρα μόνο αν η ποιότητα παραγωγής είναι πολύ καλή.

4.2.3 Κλίβανοι τούβλου (brick kilns)

Οι κλίβανοι τούβλου είναι χωρίς αμφιβολία μια από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους παραγωγής κάρβουνου. Έχουν αποδειχθεί κατά τη διάρκεια των δεκαετιών χρήσης ότι είναι χαμηλοί στο κύριο κόστος, μέτριοι στις απαιτήσεις εργασίας και παράγουν κάρβουνο ικανοποιητικής ποιότητας, κατάλληλο για όλες τις βιομηχανικές και όχι μόνο χρήσεις.

Υπάρχουν πολλά σχέδια των κλιβάνων τούβλου σε χρήση σε όλο τον κόσμο και οι περισσότεροι έχουν όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα.

Ο κλίβανος τούβλου πρέπει να πληρεί διάφορες προϋποθέσεις για να είναι επιτυχής. Πρέπει να είναι απλό να κατασκευαστεί, να είναι σχετικά ανθεκτικός από τις θερμικές πιέσεις και αρκετά ισχυρός για να αντισταθεί τις μηχανικές πιέσεις της φόρτωσης και της εκφόρτωσης. Επίσης πρέπει να είναι απρόσβλητος από τη βροχή γενικότερα τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες για πάνω από έξι έως δέκα έτη. Ο κλίβανος πρέπει να επιτρέπει τον έλεγχο της εισόδου του αέρα πάντα, και κατά τη διάρκεια της ψύξης πρέπει να είναι σε θέση να σφραγιστεί ερμητικά για να αποτρέψει την είσοδο του αέρα. Ακόμα πρέπει να είναι ελαφριάς κατασκευής για να επιτρέπει εύκολη κατασκευή του και συγχρόνως να παρέχει την καλή θερμική μόνωση για το ξύλο που υποβάλλεται στην ανθράκωση, διαφορετικά η εμφάνιση κρύων σημείων αποτρέπει το κατάλληλο κάψιμο του ξύλου σε άνθρακα και μπορεί να οδηγήσει στην υπερβολική παραγωγή των μερικώς ανθρακωμένων ξύλινων κομματιών.

Τα σχέδια των παραδοσιακών κλιβάνων τούβλου έχουν αλλάξει πολλές φορές κατά τη διάρκεια των πολλών εκατοντάδων ετών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχουν κάποιοι τύποι κλιβάνων τούβλου σε χρήση τα τελευταία χρόνια οι οποίοι έχουν βελτιωθεί κατά πολύ. Αυτοί είναι οι βραζιλιάνικοι κλίβανοι κυψελών, ο αργεντινικός κλίβανος σχήματος μισού πορτοκαλιού, ο ευρωπαϊκός κλίβανος Schwartz και ο κλίβανος του Μισούρι των Η.Π.Α. Ο πρώτος, δεύτερος και τέταρτος τύπος καίει μέρος των ξύλων που είναι τοποθετημένα προς ανθράκωση μέσα στον κλίβανο, για να ανθρακώσουν το υπόλοιπο. Ο κλίβανος Schwartz χρησιμοποιεί αέρια μιας καύσης που γίνεται έξω από το φούρνο. Τα αέρια μεταφέρονται μέσω σωλήνων, με σκοπό αρχικά την ξήρανση και τη

θέρμανση του ξύλου και μετά την ανθράκωσή του. Ο τέταρτος τύπος κλιβάνου, ο κλιβάνος του Μισούρι βρίσκεται ακόμα στη φάση της ανάπτυξης Ηνωμένες Πολιτείες. Χαρακτηριστικό του είναι ότι έχει τις καπνοδόχους και τις πόρτες φτιαγμένες από χάλυβα. Η διαδικασία παραγωγής κάρβουνου είναι παρόμοια αυτή των αργεντίνικων και βραζιλιάνικων φούρνων. Οι μεγάλες πόρτες χάλυβα επιτρέπουν την εύκολη φόρτωση ξύλου και εκφόρτωση κάρβουνου. Έχει όμως δύο σοβαρά μειονεκτήματα: απαιτεί μεγάλη ποσότητα χάλυβα και τσιμέντου, υλικά δαπανηρά και συνήθως εισαγόμενα, και δεν είναι τόσο εύκολο να δροσιστεί όπως οι άλλοι φούρνοι. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σε πιο δροσερά κλίματα, όπου οι χαμηλές θερμοκρασίες αέρα επιτρέπουν την εύκολη ψύξη.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα των αργεντίνικων και βραζιλιάνικων κλιβάνων, που θα μελετήσουμε αναλυτικότερα αμέσως μετά, είναι τα εξής:

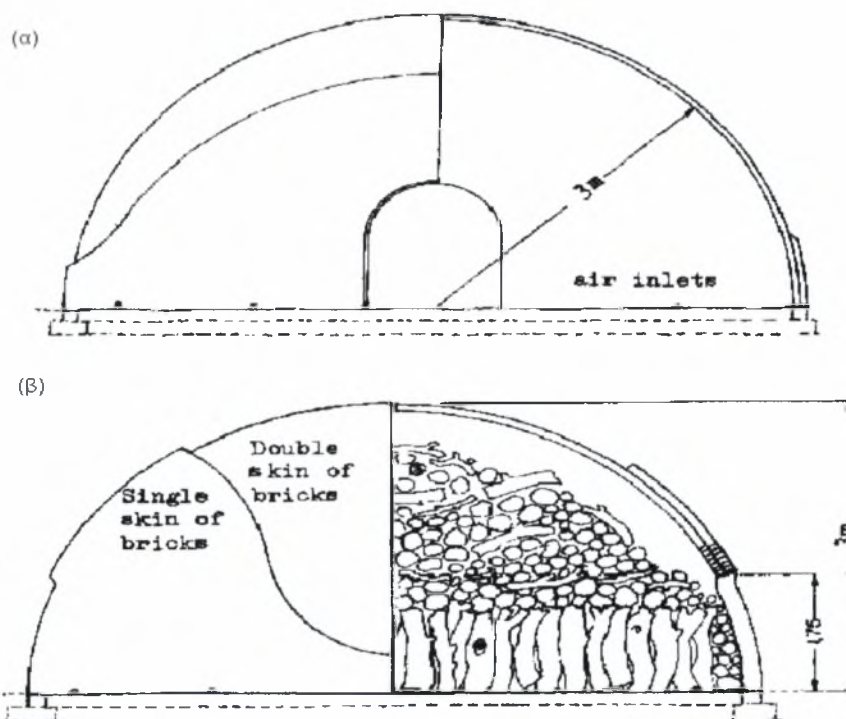
- Μπορούν να χτιστούν στα μεσαία και μεγάλα μεγέθη.
- Χτίζονται εξ ολοκλήρου από υλικά που μπορούν εύκολα να εξασφαλιστούν, όπως τούβλα, άργιλο, άμμο και λάσπη. Δεν χρησιμοποιούν χάλυβα, εκτός από μερικές ράβδους στις πόρτες και ως ενίσχυση στη βάση του θόλου (στην περίπτωση του βραζιλιάνικου φούρνου).
- Είναι γεροί. Δεν μπορούν να διαβρωθούν με την υπερθέρμανση ή τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες και έχουν διάρκεια ζωής από 5 έως 8 έτη.
- Ο έλεγχος του καψίματος είναι σχετικά απλός, ειδικά στην περίπτωση του αργεντίνικου κλιβάνου.
- Οι κλιβάνοι είναι εύκολο να ψυχθούν λόγω της χρήσης του πηλού αργίλου και σφραγίζονται εύκολα κατά τη διάρκεια της ψύξης.
- Τα λειτουργικά συστήματα για τις ομάδες κλιβάνων έχουν τυποποιηθεί έτσι ώστε η αποδοτικότητα να μεγιστοποιείται.
- Το κάρβουνο που παράγεται είναι κατάλληλο για όλες τις χρήσεις.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτών των δύο τύπων κλιβάνων είναι ότι δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν την εμφάνιση πίσσας και των επικίνδυνων

αερίων. Αυτό αυξάνει την ατμοσφαιρική ρύπανση και χαμηλώνει ελαφρώς την πιθανή θερμική αποδοτικότητα. Εντούτοις, πρέπει να προστεθεί ότι δεν υπάρχει κανένας βιομηχανικά αποδεδειγμένος κλιβανός τούβλου που να είναι ικανός να αντιμετωπίσει τα παραπάνω προβλήματα χωρίς την παρουσία τμημάτων χάλυβα, που προσθέτουν πολύ στο κόστος και την πολυπλοκότητα του κλιβάνου.

4.2.3.1 Αργεντινικός κλιβανός σχήματος μισού πορτοκαλιού

Το σχέδιο ενός τέτοιου κλιβάνου εμφανίζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.5: Σχέδιο αργεντινικού κλιβάνου σχήματος μισού πορτοκαλιού.

Ο κλιβανός χτίζεται μόνο με τούβλα, συνήθως χωρίς την υποστήριξη σιδήρου ή χάλυβα σε κανένα σημείο. Η μορφή είναι ημισφαιρική, με διάμετρο περίπου 6m. Το μέγεθος των τούβλων είναι 0,24m x 0,12m x 0,06m. Για να κατασκευαστεί ένας κλιβανός, απαιτούνται 5.500-6.000 τούβλα, λαμβάνοντας υπόψη και όσα καταστρέφονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Ο κλιβανός έχει δύο πόρτες, αντιδιαμετρικά η μία από τη άλλη. Η γραμμή των πόρτων πρέπει να είναι κάθετη στην κατεύθυνση των ανέμων της περιοχής. Το ύψος κάθε πόρτας είναι 1,60-1,70m, το πλάτος στο κατώτατο σημείο είναι 1,10m και στην κορυφή 0,70m. Μια πόρτα χρησιμοποιείται για το γέμισμα του κλιβάνου με ξύλο, ενώ η άλλη χρησιμοποιείται για άδειασμα του κάρβουνου. Οι πόρτες είναι κλειστές με τούβλα και ανοίγουν όταν τελειώσει η διαδικασία ανθράκωσης. Περίπου 100 τούβλα ανά πόρτα απαιτούνται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως ότου αρχίζουν τα τούβλα να σπάνε. Στην κορυφή του κλιβάνου αφήνεται μια τρύπα ("μάτι") με διάμετρο 0,22m-0,25m. Γύρω από τη βάση, στο επίπεδο του εδάφους ανοίγονται δέκα τρύπες που ισαπέχουν μεταξύ τους. Αυτές οι τρύπες είναι δίοδοι αέρα, και το «μάτι» είναι η έξοδος για τον καπνό. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την περίοδο φόρτωσης του κλιβάνου ώστε να μην κλείσουν οι δίοδοι του αέρα.

Τα ξύλα που χρησιμοποιούνται κόβονται σε περίπου 1,00m-1,30m μήκος με ελάχιστη διάμετρο 0,05m και μέγιστη διάμετρο ίση με το πλάτος της πόρτας. Τα ξύλα πρέπει να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην πόρτα φόρτωσης. Περισσότερο από τέσσερις έως πέντε μέρες ξήρανσης συστήνονται. Αυτό εξαρτάται από τις τοπικές καιρικές συνθήκες. Ένας κλιβανός μπορεί να γεμίσει με, κατά προσέγγιση, 30 τόνους ξηρού ξύλου, περιεκτικότητας σε υγρασία 25%, και μέσης πυκνότητας 850kg/m³.

Όπως έχει προαναφερθεί στην πρώτη φάση καψίματος έχουμε λευκό καπνό να βγαίνει από την καπνοδόχο. Αυτή η φάση αντιπροσωπεύει την πρώτη απόσταση και το ξύλο ξηραίνεται. Ο άσπρος καπνός συνεχίζεται για μερικές ημέρες (ανάλογα με την περιεκτικότητα σε νερό) και αρχίζει έπειτα να γίνεται μπλε, σημάδι που δείχνει ότι άρχισε η ανθράκωση. Αυτή η διαδικασία ελέγχεται με το άνοιγμα και το κλείσιμο των κολπίσκων αέρα στη βάση του κλιβάνου. Φλόγα δεν πρέπει να εμφανιστεί μέσω της καπνοδόχου. Όταν η διαδικασία ανθράκωσης ολοκληρώνεται ο καπνός γίνεται σχεδόν τόσο διαφανής όσο και στον καυτό αέρα. Σε αυτό το σημείο τις τρύπες στη βάση πρέπει να κλείσουν με τη λάσπη ή να καλυφθούν με χώμα και άμμο. Αυτή η φάση καλείται "εξαγνισμός". Μετά περνάμε στη φάση ψύξης. Η ψύξη

επιταχύνεται με τη ρίψη λάσπης (που αραιώνεται με νερό) στον κλίβανο. Εκτός από την ψύξη, αυτό βοηθά να καλυφθεί οποιαδήποτε ρωγμή στους τοίχους, αποτρέποντας οποιαδήποτε είσοδο αέρα. Η διαδικασία αυτή, με λάσπη και νερό πρέπει να εφαρμόζεται τρεις φορές τη μέρα.

Το χαρακτηριστικό πρόγραμμα της διαδικασίας είναι το ακόλουθο:

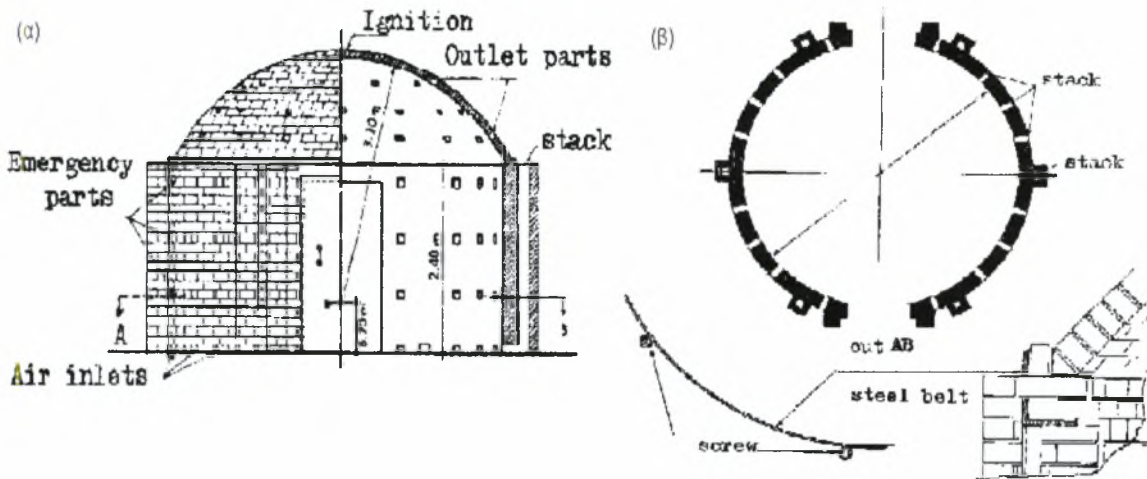
Φόρτωση	6 ώρες
Κάψιμο	6-7 ημέρες
Εξαγνισμός	1-2 ημέρες
Ψύξη	3,4 ημέρες
Εκφόρτωση	3,4 ημέρες

Συνολικά 13-14 ημέρες είναι επαρκείς για να παραγάγουν 9-10 τόνους κάρβουνου σε έναν κλίβανο διαμέτρου 7m.

Ο τύπος τούβλου που χρησιμοποιείται για τους κλιβάνους είναι σημαντικός. Ένα ιδανικό τούβλο είναι πορώδες και έχει καλή αντίσταση στις θερμικές τάσεις ενώ συγχρόνως είναι μονωτής.

4.2.3.2 Βραζιλιάνικος κλίβανος κυψελών

Η βραζιλιάνικη βιομηχανία κάρβουνου είναι μια από τις επιτυχέστερες βιομηχανίες κάρβουνου, στην τεχνολογία κλιβάνων τούβλου, που υπάρχει στον κόσμο σήμερα. Είναι κυκλικοί, η οροφή τους δεν έχει το συνηθισμένο άνοιγμα (καπνοδόχος), και χτίζονται με συνηθισμένα τούβλα. Ο κυκλικός τοίχος είναι συνολικά σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα. Αυτός ο τύπος κλιβάνου, που φαίνεται και στο σχήμα 4.6, αναφέρεται ως «κλίβανος τούβλου κυψελών».



Σχήμα 4.6: Βραζιλιάνικος κλιβανός τύπου κυψελών

Η παραγωγή κάρβουνου σε αυτό τον τύπο κλιβάνων έχει πολύ καλή απόδοση και μπορεί αν φτάσει μέχρι και το 62%. Η κατασκευή του είναι αρκετά εύκολη (δύο άτομα μπορούν να τον κατασκευάσουν σε δύο μέρες). Για την κατασκευή του χρειάζονται περίπου 8.500 τούβλα αργίλου με μόνο μια ζώνη χάλυβα για το θόλο. Ο φούρνος έχει μακρά διάρκεια ζωής (μέχρι 6 έτη στην ίδια περιοχή). Επίσης μπορεί να αποσυναρμολογηθεί χωρίς σημαντική απώλεια τούβλων, και να επανοικοδομηθεί σε ένα άλλο μέρος. Ο χρόνος ανθράκωσης είναι 9 ημέρες για παραγωγή 5 τόνων. Η ανθράκωση είναι ομοιόμορφη και η ψύξη ταχεία, επειδή οι τοίχοι έρχονται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα.

Συνήθως πολλοί κλιβανοί κατασκευάζονται σε μια περιοχή που βρίσκεται κοντά σε μέρος από όπου προμηθεύονται εύκολα τα ξύλα (δάσος). Ο συνολικός αριθμός κλιβάνων σε μια τέτοια περιοχή πρέπει να περιοριστεί σε 35 ή 42 ώστε να μην αυξηθεί πολύ η συγκέντρωση του καπνού που βγαίνουν από τις καπνοδόχους, ο οποίος είναι επιβλαβής τόσο όταν εισπνέεται όσο και όταν έρθει σε επαφή με τα μάτια. Επομένως τέτοιες περιοχές πρέπει να βρίσκονται σε απόσταση τουλάχιστον δύο km από κατοικημένες περιοχές. Η κατεύθυνση του αέρα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη.

Η εσωτερική περιφέρεια ενός συνηθισμένου κλιβάνου τέτοιου τύπου έχει συνήθως διάμετρο 5,00m, ενώ η εξωτερική περιφέρεια διάμετρο 5,40m. Η ονομαστική χωρητικότητα του κλιβάνου είναι $48,94\text{m}^3$ ενώ η πραγματική $45,31\text{m}^3$. Έχει έξι καπνοδόχους και 18 διόδους αέρα στη βάση, ενώ υπάρχουν και άλλες 50 διόδοι αέρα έκτακτης ανάγκης. Τα μεγέθη των διόδων αέρα είναι: πλάτος 0,10m ύψος 0,08m. Οι καπνοδόχοι χτίζονται ταυτόχρονα με τον τοίχο. Οι εσωτερικές διαστάσεις τους είναι: 0,12m x 0,10m. Το συνολικό ύψος του κάθετου τοίχου είναι 1,80m.

4.2.4 Μεταλλικοί κλιβανοί (metal kilns)

Η διαδεδομένη χρήση των κυλινδρικών μεταφερόμενων κλιβάνων μετάλλων για την παραγωγή ξυλάνθρακα ξεκίνησε στην Ευρώπη στη διάρκεια της δεκαετίας του '30. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου, η τεχνική αναπτύχθηκε περαιτέρω, από το ερευνητικό εργαστήριο δασικών προϊόντων της Αγγλίας. Διάφορες εκδόσεις του αρχικού σχεδίου είχαν χρησιμοποιηθεί σε όλο το Ηνωμένο Βασίλειο. Αυτή η τεχνολογία μεταφέρθηκε στις αναπτυσσόμενες χώρες προς το τέλος της δεκαετίας του '60, ειδικότερα από τις δραστηριότητες του τμήματος δασονομίας της Ουγκάντα. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τις διάφορες φάσεις κατασκευής, φόρτωσης και λειτουργίας ενός τέτοιου κλιβάνου.



Εικόνα 4.7: Μεταλλικός κλιβανός (α) Κατασκευή κλιβάνου (β) Τοποθέτηση εύφλεκτων υλικών ανάμεσα από ξύλα για τη δημιουργία τεσσάρων σημείων ανάφλεξης (γ) Γέμισμα του κλιβάνου (δ) φάση ανάφλεξης (ε) λειτουργία(φαίνονται οι πορείες του αέρα και των καυσαερίων) (στ) Μετά το τέλος της πυρόλυσης ο όγκος των κάρβουνων είναι μισός από τον όγκο των ξύλων.

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός τέτοιου τύπου κλιβάνου, όπως τον σχεδίασε το Τροπικό Ίδρυμα Προϊόντων (ΤΡΙ), είναι τα εξής:

- Φύλλα χάλυβα με πάχος 3mm χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του κάτω τμήματος του κλιβάνου ενώ φύλλα χάλυβα 2mm χρησιμοποιούνται για το πάνω τμήμα και την κάλυψη.
- Τα δύο βασικά τμήματα του κλιβάνου είναι κυλινδρικά.
- Σιδερένιες γωνίες 50mm χρησιμοποιούνται για να στηριχθεί το πάνω τμήμα και η κάλυψη.
- Υπάρχουν οκτώ δίοδοι αέρα στη βάση του κλιβάνου σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους.
- Από τέσσερις καπνοδόχους βγαίνουν τα καυσαέρια από τον φούρνο.

Διάφορες αποκλίσεις από τα ανωτέρω χαρακτηριστικά γνωρίσματα παρατηρούνται σε άλλες εκδόσεις των μεταλλικών κλιβάνων. Μερικοί κατασκευαστές κλιβάνων χρησιμοποιούν τα λεπτότερα φύλλα μετάλλων από αυτά που συστήνεται στο σχέδιο ΤΡΙ. Για να εξασφαλίσουν τη μέγιστη οικονομικά ενεργή ζωή ενός κλιβάνου, το πάχος και ο τύπος μετάλλου που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του κλιβάνου είναι πρωταρχικής σπουδαιότητας. Το χαμηλότερο τμήμα του κλιβάνου υποβάλλεται στις μέγιστες πιέσεις θερμότητας και πρέπει να κατασκευαστεί από φύλλα χάλυβα. Η χρήση χάλυβα Corten 'Α' στην κατασκευή του κλιβάνου αντί του απλού χάλυβα βοηθάει στην αύξηση της διάρκειά ζωής του κλιβάνου. Αυτό το ειδικό κράμα έχει μεγάλη αντίσταση στη θερμότητα και τη σκουριά. Το βασικό κόστος του είναι περίπου 10% υψηλότερο από αυτό του απλού χάλυβα.

Οι κλιβανοί μπορεί να κατασκευαστούν από τα πρότυπα τύμπανα πετρελαίου 45 γαλονιών. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς χρησιμοποιώντας τις γρήγορα καιγόμενες πρώτες ύλες όπως η ξυλεία φοινίκων και καρυδών. Εντούτοις, όταν χρησιμοποιείται με τις πυκνές ξυλείες πλατύφυλλων, η πλήρης ανθράκωση είναι δύσκολο να επιτευχθεί και το προκύπτων κάρβουνο είναι πιθανό να έχει ένα υψηλό πτητικό περιεχόμενο.

Εάν το κάρβουνο πρόκειται να παραχθεί για εξαγωγή σε αναπτυγμένες χώρες για βιομηχανική χρήση, η χρήση κατάλληλων κλιβάνων μετάλλων θα παράγει την υψηλή ποιότητα που απαιτείται.

Ένα άτομο μπορεί να λειτουργήσει μια ομάδα μέχρι 10 μονάδων τύμπανων πετρελαίου. Η διαδικασία περιλαμβάνει μια περίοδο ανθράκωσης περίπου δύο έως τριών ωρών, που ακολουθούνται από μια περίοδο ψύξης περίπου τριών ωρών. Ένας πεπειραμένος χειριστής μπορεί να ανακυκλώσει δέκα τύμπανα δύο φορές κάθε ημέρα για να παραγάγει συνολικά μέχρι 30kg κάρβουνο από κάθε τύμπανο.

Έναντι των παραδοσιακών μεθόδων παραγωγής η αποδοτικότητα μετατροπής που λαμβάνεται στους κλιβάνους τύμπανων πετρελαίου είναι συγκριτικά υψηλή. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η πρώτη ύλη πρέπει να έχει λιγότερο από 30cm μήκος, με μια μέγιστη διάμετρο 5cm για να επιτύχει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ένα μη αμελητέο ποσό εργασίας κατά την προετοιμασία της πρώτης ύλης. Επίσης τα τύμπανα πετρελαίου είναι μερικές φορές δύσκολο και ακριβό να εξασφαλισθούν. Τέλος πρέπει να αντικαθίστανται αρκετά συχνά.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των κλιβάνων μετάλλων έναντι της παραδοσιακής μεθόδου γήινων κοιλωμάτων είναι:

- Η πρώτη ύλη και το προϊόν είναι σε ένα σφραγισμένο εμπορευματοκιβώτιο που δίνει το μέγιστο έλεγχο των ροών παροχής αέρα και αερίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανθράκωσης.
- Το ανειδίκευτο προσωπικό μπορεί να εκπαιδευθεί γρήγορα και εύκολα για να δουλέψει σε αυτές τις μονάδες.
- Η επίβλεψη της διαδικασίας δεν είναι αναγκαία, έναντι αντίθετα με την περίπτωση των κοιλωμάτων.
- Οι αποδοτικότητες μετατροπής είναι αρκετά μεγάλες
- Τα κοιλώματα δίνουν ακανόνιστες και συχνά χαμηλότερες παραγωγές.

- Με τις παραδοσιακές μεθόδους (κοιλώματα και αναχώματα) μέρος του κάρβουνου χάνεται στο έδαφος και αυτό που ανακτάται είναι συχνά ανακατεμένο με χώμα και πέτρες.
- Με το μέγιστο έλεγχο της διαδικασίας μια ευρύτερη ποικιλία των πρώτων υλών μπορεί να ανθρακωθεί, όπως π.χ. μαλακό ξύλο.
- Ο κύκλος συνολικής παραγωγής που χρησιμοποιείται στους μεταλλικούς κλιβάνους διαρκεί δύο έως τρεις ημέρες.

Τα μειονεκτήματα της χρησιμοποίησης των κλιβάνων μετάλλων έναντι της παραδοσιακής μεθόδου γήινων κοιλωμάτων είναι:

- Το αρχικό κεφάλαιο για να καλύψει το κόστος της κατασκευής των κλιβάνων πρέπει να ληφθεί υπόψη.
- Για την ευκολία της συσκευασίας και της μέγιστης αποδοτικότητας προσοχή απαιτείται κατά την προετοιμασία της πρώτης ύλης. Το ξύλο πρέπει να κοπεί ή/και να χωριστεί στο επιθυμητό μέγεθος
- Οι κλίβανοι μετάλλων μπορεί να αποδειχθεί δύσκολο να κινηθούν στην πολύ λοφώδη έκταση.
- Η διάρκεια ζωής των κλιβάνων μετάλλων είναι μόνο δύο έως τρία έτη.

4.3 Σύγκριση απόδοσης συστημάτων ανθράκωσης

Σε όλο τον κόσμο το ξύλο μετατρέπεται σε κάρβουνο από μια εκπληκτική ποικιλία μεθόδων. Η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ανθράκωσης είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει κάθε πιθανός παραγωγός κάρβουνου.

Το περισσότερο κάρβουνο γίνεται από τους μικρής κλίμακας παραγωγούς, είτε για κάλυψη των τοπικών αναγκών τους είτε για μια περιορισμένη αγορά. Υπάρχει σχετικά μικρό διεθνές εμπόριο στο κάρβουνο και μετά βίας οποιοσδήποτε ανταγωνισμός μεταξύ των παραγωγών σε μια περιοχή με εκείνους σε άλλη.

Καλύτερη μέθοδος για όλες τις περιπτώσεις δεν υπάρχει. Εξαρτάται κάθε φορά από πολλούς παράγοντες. Ένα κριτήριο που μας δείχνει την καλύτερη μέθοδο, είναι η χρήση για την οποία θέλουμε το κάρβουνο. Επίσης το μέρος, και το είδος του ξύλου που θέλουμε να ανθρακώσουμε παίζουν σημαντικό ρόλο. Για να επιλεγθεί κάθε φορά ο καταλληλότερος κλιβανός πρέπει να διερευνηθούν τα χαρακτηριστικά του καθενός και να επιλεγεί αυτός που μας ικανοποιεί σε ότι θεωρούμε πιο σημαντικό. Γι' αυτό το λόγο θα μελετήσουμε τις διαφορές των διαφόρων τύπων κλιβάνων.

Η πρώτη σημαντική διαφορά είναι μεταξύ των συστημάτων που θερμαίνουν το ξύλο με εξωτερικά μέσα, χρησιμοποιώντας το ξύλο, το πετρέλαιο, το αέριο, κ.λ.π., και των συστημάτων που επιτρέπουν την πλήρη καύση σε μια περιορισμένη κλίμακα και τη χρησιμοποίηση αυτής της θερμότητας για να ξεράνουν και να ανθρακώσουν το υπόλοιπο σορό ξύλων. Η δεύτερη μέθοδος είναι αποδοτικότερη δεδομένου ότι η θερμότητα παράγεται χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το ξύλο που είναι χαμηλότερου κόστους. Στην πράξη όμως, είναι δύσκολο να ελεγχθεί η καύση και καίγεται μεγαλύτερη από την αναγκαία ποσότητα ξύλου, με αποτέλεσμα να χαμηλώνει η παραγωγή. Η έμμεση (εξωτερική) θέρμανση επιτρέπει τον ακριβέστερο έλεγχο και το κάρβουνο μπορεί να ανακτηθούν χωρίς μόλυνση από τα προϊόντα της καύσης. Ακριβής έλεγχος απαιτείται για να εξασφαλίσει ότι το καυτό αέριο είναι χωρίς

οξυγόνο, διαφορετικά μερικά κομμάτια ξύλου θα καούν αντί μόνο να ανθρακωθούν.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν την εσωτερική παραγωγή της θερμότητας μπορούν να διαιρεθούν περαιτέρω ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής τους. Οι τρεις δυνατότητες που υπάρχουν είναι ο γήινος κλίβανος, που είναι η χαμηλότερη στο κόστος μέθοδος, ο κλίβανος από τούβλα του ενδιάμεσου κόστους, και ο κλίβανος από χάλυβα που είναι ο ακριβότερος. Οι κλίβανοι χάλυβα υποδιαιρούνται περαιτέρω στους φορητούς και σταθερούς.

Οι κλίβανοι από χάλυβα έχουν δύο πλεονεκτήματα: μπορούν να κινηθούν εύκολα, και δροσιζονται πολύ πιο γρήγορα, επιτρέποντας τον πιο σύντομο κύκλο παραγωγής. Εντούτοις, το ότι μπορούν να μετακινηθούν εύκολα δεν είναι πάντα αποδοτικό, δεδομένου ότι είναι πιο δύσκολη η οργάνωση και επόπτευση της παραγωγής. Επίσης, οι σταθεροί κλίβανοι τούβλου μπορούν να δροσιστούν αρκετά γρήγορα χρησιμοποιώντας έναν πηλό αργίλου και νερού. Αν και ο κύκλος παραγωγής σε κλιβάνους τούβλων παραμένει μεγάλος (περίπου έξι έως οκτώ ημέρες) έναντι δύο για τους κλιβάνους χάλυβα, η μεγαλύτερη ογκομετρική απόδοσή τους και το πολύ χαμηλότερο κόστος των κλιβάνων τούβλου, τους καταστήστε προτιμητέους, εκτός από τις περιπτώσεις που η φορητότητα είναι ουσιαστική.

Οι γήινοι κλίβανοι ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά, έχουν αργό κάψιμο και ο κύκλος παραγωγής τους μεγαλώνει ακόμα περισσότερο από την πολύ αργή διαδικασία ψύξης ενώ ανακατεύεται το κάρβουνο με χώμα και πέτρες. Εντούτοις, όπου το κεφάλαιο είναι περιορισμένο ή ανύπαρκτο, έχουν μεγάλο προβάδισμα έναντι των άλλων τύπων.

Οι κλίβανοι που θερμαίνονται από μια εξωτερική πηγή θερμότητας υποδιαιρούνται σε εκείνους που θερμαίνονται από καυτά αέρια μέσω των τοιχωμάτων και σε εκείνους που τα καυτά αέρια έρχονται μέσω σωλήνων. Οι περισσότεροι κλίβανοι στην δεύτερη περίπτωση είναι από μέταλλο αλλά υπάρχει μια εξαίρεση, ο προαναφερθής κλίβανος Schwartz, ο οποίος είναι από τούβλο και θερμαίνει το σωρό των ξύλων με την πίεση του καυτού αερίου που έρχεται μέσω σωλήνων από μια φωτιά από ξύλα που βρίσκεται παραπλεύρως

του κλιβάνου. Θεωρητικά η ιδέα είναι πολύ καλή, δεδομένου ότι μπορεί να καίγονται στην βοηθητική φωτιά φλοιός δέντρων και άλλα μέρη τα οποία δεν είναι κατάλληλα να πυρολυθούν. Στην πράξη, ο τύπος αυτός κλιβάνου υστερεί σε σύγκριση με τους άλλους, λόγω των πιο ακριβών υλικών του (τμήματα χυτοσιδήρου και χάλυβα) και λόγω των δυσκολιών που παρουσιάζονται (τόσο στη διαδικασία ανθράκωσης όσο και στην ψύξη), οι οποίες οδηγούν σε διαρροές αέρα και απώλεια κάρβουνου.

Οι κλίβανοι χάλυβα που θερμαίνονται μέσω των τοίχων δεν χρησιμοποιούνται πολύ σήμερα λόγω του υψηλού κόστους και της χαμηλής συνήθως αποδοτικότητας. Βέβαια, μερικοί φορητοί και ημι-φορητοί πειραματικοί κλίβανοι έχουν εμφανιστεί πρόσφατα, όπως π.χ. η πειραματική συσκευή του Constantine και ο τζαμαϊκανός κλίβανος τύμπανων πετρελαίου. Οι παραπάνω κλίβανοι χάλυβα είναι αποδοτικοί, παράγουν κάρβουνο άριστης ποιότητας και επιτρέπουν στο τελικό προϊόν να ανακτηθεί χωρίς προσμίξεις. Εντούτοις, το υψηλό κύριο κόστος τους, τους καθιστά μη ελκυστικούς, εκτός από όπου οι δαπάνες εργασίας των παραδοσιακών συστημάτων αντισταθμίζουν το υψηλό κύριο κόστος. Αυτοί οι φούρνοι εφαρμόζονται σήμερα κυρίως για την παραγωγή του κάρβουνου για μεταλλουργική και χημική χρήση. Πάντως, δεν έχουν σημαντική συμβολή στην παραγωγή κάρβουνου για την εσωτερική χρήση στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Μπορούμε να συγκρίνουμε τους διάφορους τύπους, επίσης, ταξινομώντας τους με βάση κάποια χαρακτηριστικά, όπως η παραγωγή ανά μονάδα όγκου πρώτης ύλης, τον χρόνο για να ολοκληρωθεί ένας πλήρης κύκλος παραγωγής, το κεφάλαιο που επενδύεται, κ.λ.π.. Αυτά τα χαρακτηριστικά ελέγχονται όταν έχει ήδη επιλεχθεί ο κύριος τύπος κλιβάνου, και θέλουμε να επιλέξουμε ανάμεσα στις παραλλαγές της μεθόδου που μπορεί να εμφανίζονται. Στην πράξη, όσον αφορά στον αναπτυσσόμενο κόσμο, οι επιλογές περιορίζονται στην απόφαση μεταξύ των γήινων κλιβάνων κοιλωμάτων και αναχωμάτων, των κλιβάνων τούβλου και των κλιβάνων χάλυβα που θερμαίνονται εσωτερικά. Όπου το κεφάλαιο είναι το περιοριστικό στοιχείο συμπεριφοράς, και το ξύλο είναι διαθέσιμο, οι γήινοι κλίβανοι

προτιμούνται. Όπου κάποιο κεφάλαιο είναι διαθέσιμο και σοβαρή προσπάθεια πρόκειται να καταβληθεί για ποιοτικό κάρβουνο, οι κλίβανοι τούβλου θα προτιμηθούν. Οι κλίβανοι χάλυβα μπορούν να επιλεγούν στις περιπτώσεις όπου τα προτερήματά τους είναι τόσο αναγκαία, που αυτό αντισταθμίζει τις υψηλές δαπάνες κεφαλαίου και επισκευής.

Μέρος 2 Πειραματικό Μέρος

5. Θερμική Ανάλυση

5.1 Θερμική ανάλυση και Θερμιδομετρία

Αρχικά δίνεται ο ορισμός της θερμικής ανάλυσης και της θερμιδομετρίας. Στη συνέχεια καθορίζονται οι διαφορετικές μέθοδοι και τεχνικές μετρήσεων και ταξινομούνται με τη βάση κάποια κριτήρια. Κάποτε με τον όρο θερμική ανάλυση (Thermal Analysis) εννοούνταν η ανάλυση της αλλαγής μίας ιδιότητας ενός δείγματος, η οποία ιδιότητα είχε άμεση εξάρτηση με την αλλαγή της θερμοκρασίας του δείγματος. Αργότερα η διεθνής ομοσπονδία για τη θερμική ανάλυση και τη θερμιδομετρία τροποποίησε τον πιο πάνω ορισμό ως εξής :

Ορισμός :

Θερμική ανάλυση είναι ένα σύνολο τεχνικών με τις οποίες μία ιδιότητα ενός δείγματος παρατηρείται σε σχέση με το χρόνο ή τη θερμοκρασία σε μία διεργασία κατά την οποία προγραμματίζεται μία συγκεκριμένη μεταβολή της θερμοκρασίας κάτω από προκαθορισμένες συνθήκες πίεσης.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του δείγματος της βιομάζας κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές θερμικής ανάλυσης. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη μία αναφορά στις τεχνικές αυτές, στη μεθοδολογία στην οποία βασίζονται και στους σκοπούς που εξυπηρετούν. Στην παρούσα μελέτη έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές θερμικής ανάλυσης DSC και TGA. Ο όρος θερμική ανάλυση και θερμιδομετρία δηλώνει μια ποικιλία από μεθόδους πειραματικών μετρήσεων πάνω σε ένα δείγμα του οποίου η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Αυτές οι μετρήσεις οδηγούν με τη σειρά τους σε μετρήσεις σε σχέση με το χρόνο κάποιων ιδιοτήτων του δείγματος όταν το δείγμα υποβάλλεται σε μια χρονική μεταβολή της θερμοκρασιακής του

κατάστασης. Πολλά θερμοαναλυτικά όργανα και θερμιδόμετρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για ισοθερμικές μετρήσεις.

Κατά τη θερμική ανάλυση μετρούνται συνήθως κάποιες φυσικές ποσότητες για όλο το χρονικό διάστημα που συμβαίνουν οι θερμικές μεταβολές στο δείγμα μας. Τέτοιες φυσικές ποσότητες μπορεί να είναι η μάζα, ο όγκος, η θερμοροή, κ.τ.λ. Οι μεταβολές των ποσοτήτων αυτών κάτω από την επίδραση της θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν ιδιότητες του δείγματος όπως η θερμοχωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα ή μεταβολές σε χημικές ιδιότητες του δείγματος (χημική σύσταση, μοριακές δυνάμεις, κρυσταλλική δομή κ.τ.λ.). Αυτές οι μεταβολές μπορούν να συμβαίνουν είτε η θερμοκρασία του δείγματος διατηρείται σταθερή είτε μεταβάλλεται. Στα σύγχρονα όργανα θερμικής ανάλυσης μεταβολές τέτοιων χημικών ή φυσικών ιδιοτήτων μπορούν να καταγραφούν από ειδικούς αισθητήρες και να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία με κατάλληλη ρύθμιση και κλίμακα ερμηνεύονται και χρησιμοποιούνται κατάλληλα από το χρήστη.

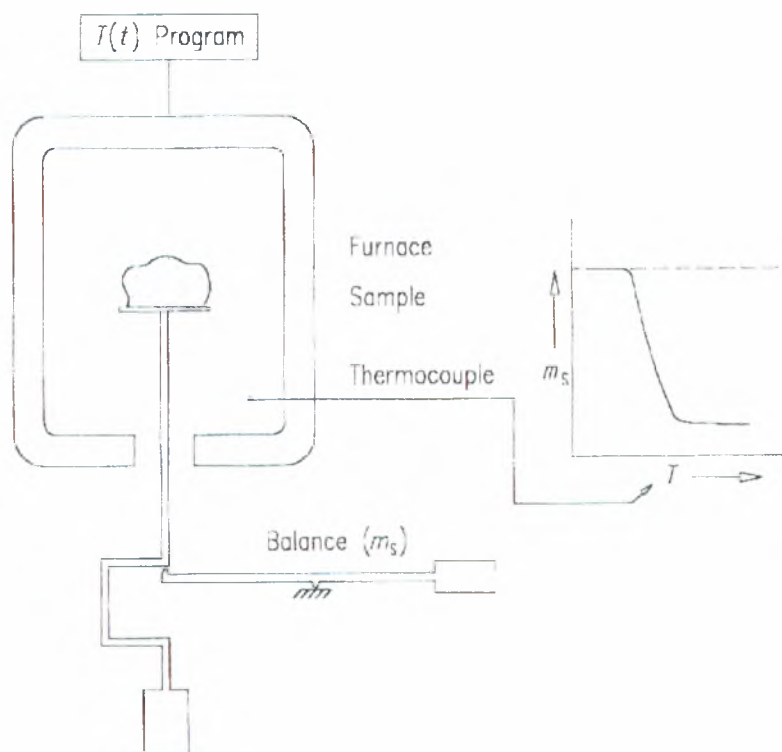
Σε σχέση με τον ορισμό της θερμικής ανάλυσης και την περιγραφή των θερμοαναλυτικών μεθόδων το πρόβλημα που προκύπτει είναι ο σαφής διαχωρισμός τους από το μεγάλο πλήθος μετρητικών μεθόδων. Ο ορισμός της θερμικής ανάλυσης που δόθηκε πιο πάνω είναι τόσο γενικός που σχεδόν μπορεί να συμπεριλάβει όλες τις μεθόδους μέτρησης φυσικών και χημικών ιδιοτήτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πολλές μετρήσιμες ιδιότητες όπως (το ιξώδες, η πυκνότητα, η συγκέντρωση, η σκληρότητα, η ηλεκτρική αντίσταση και η θερμική αγωγιμότητα) επηρεάζονται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Παρά τα παραπάνω η μέτρηση των ιδιοτήτων αυτών δεν ανήκει στα πλαίσια της θερμικής ανάλυσης.

5.2 Τεχνικές Θερμικής Ανάλυσης

5.2.1 Ανάλυση TGA (Thermo gravimetric analysis)

(Θέρμο-βαρομετρική ανάλυση)

Πρόκειται για μία τεχνική θερμικής ανάλυσης κατά την οποία η αλλαγή στη μάζα ενός δείγματος αναλύεται ενώ αυτό υποβάλλεται σε θερμοκρασιακές αλλαγές. Συσκευές τέτοιας ανάλυσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το σύστημα ζύγισης που χρησιμοποιούν.

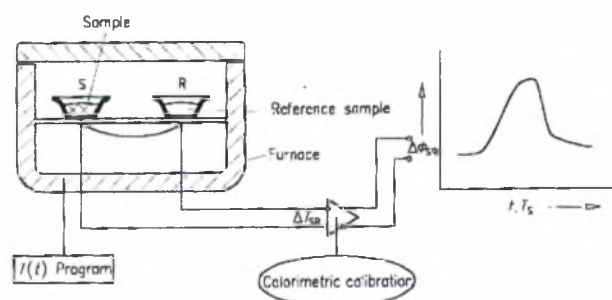


Σχήμα 5.1 Βασικά μέρη του μηχανισμού ζύγισης της θερμο-βαρομετρικής ανάλυσης

5.2.2 Ανάλυση DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Η τεχνική κατά την οποία η διαφορά στο ρυθμό ροής θερμότητας του δείγματος σε σχέση με το δείγμα αναφοράς απεικονίζεται συναρτήσει του χρόνου, ενώ το δείγμα μας εκτίθεται σε μία μεταβολή της θερμοκρασίας. Για τη δική μας θερμική ανάλυση στο χώρο του δείγματος αναφοράς δεν τοποθετήθηκε τίποτα. Στους χώρους όπου βρίσκεται το δείγμα που ενδιαφέρει και το δείγμα αναφοράς τοποθετούνται δύο θερμοστοιχεία. Τα θερμοστοιχεία αυτά βέβαια μπορούν να βρίσκονται και στο κάτω μέρος των χώρων που μπαίνουν τα δείγματα (βάσεις από ποτηράκια), όπως συμβαίνει στο δικό μας όργανο θερμικής ανάλυσης.

Η συσκευή θερμικής ανάλυσης STA-1500 του εργαστηρίου έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης ανάλυσης TGA και DSC.

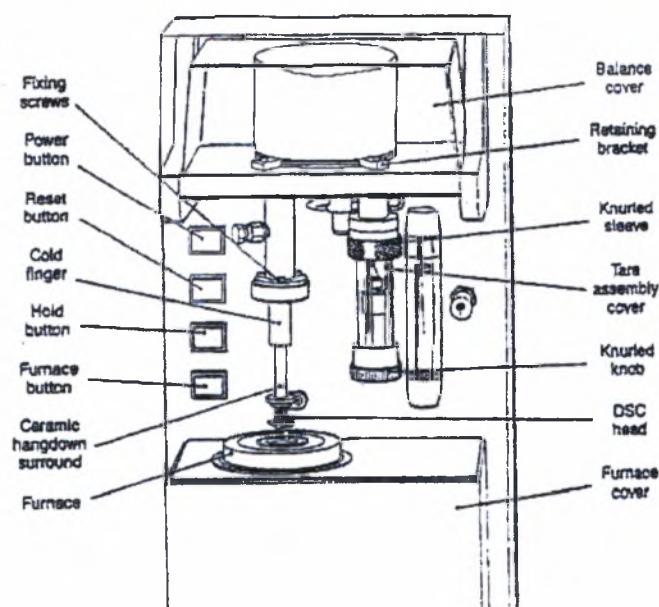


Σχήμα 5.2 Βασικά μέρη του μηχανισμού θερμοδομετρικής ανάλυσης (DSC)

5.3 Περιγραφή Πειραματικής Συσκευής

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της θερμικής ανάλυσης κατά την αντίδραση της πυρόλυσης ήταν το STA-1500, κατασκευασμένο από τη Rheometric Scientific. Στο όργανο αυτό υπάρχει ένας θάλαμος στον οποίο τοποθετείται το δείγμα και με σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας με συνεχή ροή N₂ (50 ml/min) δημιουργούνται οι συνθήκες της πυρόλυσης. Το όργανο λειτουργεί σε συνεργασία με ειδικό πρόγραμμα εγκαταστημένο στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την επεξεργασία τους. Οι συνθήκες του πειράματος και οι μεταβολές της θερμοκρασίας του δείγματος προγραμματίζονται με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Κατά τη διάρκεια του πειράματος υπήρχε η δυνατότητα να παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στην οθόνη σε πραγματικό χρόνο(real time).

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνονται τα βασικά μέρη της πειραματικής συσκευής θερμικής ανάλυσης που υπάρχει στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.



Σχήμα 5.3 Βασικά μέρη πειραματικής συσκευής θερμικής ανάλυσης

Τα βασικά μέρη της πειραματικής συσκευής είναι τα εξής :

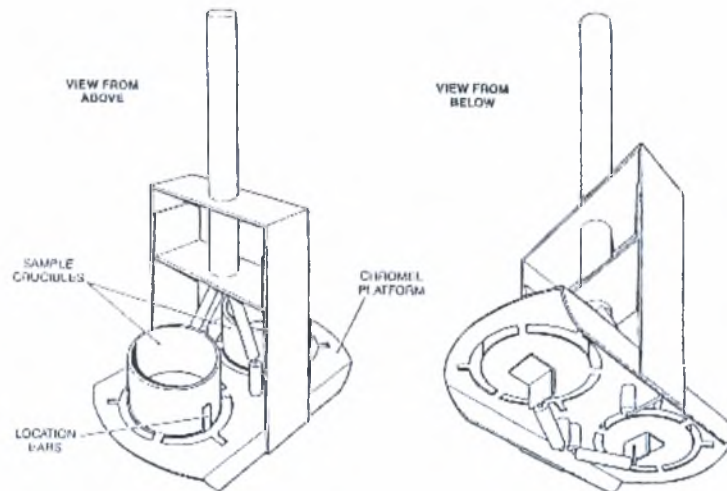
- 1) Ένας ζυγός ακριβείας πάνω στον οποίο τοποθετείται το δείγμα μας μέσα σε ειδικό μεταλλικό ποτηράκι πολύ μικρών διαστάσεων κατασκευασμένο συνήθως από πλατίνα που έχει μεγάλο σημείο τήξης. Η ζύγιση του δείγματος καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος γίνεται έχοντας ως αναφορά ένα άλλο πανομοιότυπο ποτηράκι ίδιου βάρους που βρίσκεται στην άλλη μεριά του ζυγού άδειο, έτσι ώστε να ζυγίζεται η μάζα μόνο του δείγματος που ενδιαφέρει άμεσα και η μεταβολή της στο χρόνο.
- 2) Ένας φούρνος μικρών επίσης διαστάσεων της τάξης του ενός λίτρου μέσα στον οποίο υπάρχει ο προαναφερθείσας ζυγός με το δείγμα και στον οποίο εφαρμόζονται οι συνθήκες της πυρόλυσης.
- 3) Μηχανισμός ανύψωσης των τοιχωμάτων του φούρνου και σύστημα ελέγχου της κίνησης τους
- 4) Ροοστάτης ρύθμισης της επιθυμητής παροχής αερίων στο φούρνο .Είναι προφανές πως η επιλογή των αερίων που εισάγονται κατά τη λειτουργία του φούρνου που θα προγραμματιστεί, γίνονται εξωτερικά με τη συνδεσμολογία πάνω στο όργανο της κατάλληλης φιάλης. Υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης εισαγωγής μέχρι δύο διαφορετικών αερίων στο φούρνο πυρόλυσης.
- 5) Ειδικός μανδύας εξωτερικά του φούρνου στον οποίο κυκλοφορεί νερό ελεγχόμενης παροχής για κατάλληλη ψύξη και προστασία του ζυγού.
- 6) Θερμοστοιχεία τοποθετημένα σε μόνιμη θέση στις ειδικά κατασκευασμένες βάσεις όπου τοποθετούνται τα δύο ποτηράκια για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος σε κάθε χρονική στιγμή.
- 7) Συστήματα προειδοποίησης για ατελή ή λανθασμένη λειτουργία όπως για παράδειγμα για ελλιπής ή μηδενική τροφοδοσία του νερού που κυκλοφορεί στο μανδύα εξωτερικά του φούρνου.
- 8) Σύστημα ελέγχου και ειδικό πρόγραμμα φορτωμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τον προγραμματισμό και έλεγχο της πειραματικής

διαδικασίας αλλά και για την αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Όλος αυτός ο πειραματικός μηχανισμός του πιο πάνω σχήματος είναι συνδεδεμένος με ειδική συσκευή ρύθμισης των παροχών υπολογιστικού τύπου, η οποία είναι με τη σειρά της συνδεδεμένη με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή από τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα του εκάστοτε πειράματος.

Ένα από τα πιο σημαντικά μέρη του οργάνου μας για τη θερμιδομετρική ανάλυση DSC (Differential scanning calorimetry), είναι ο δίσκος πάνω στον οποίο τοποθετούνται τα ποτηράκια που περιέχουν το δείγμα στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις και το δείγμα αναφοράς. Το τμήμα αυτό της πειραματικής συσκευής βρίσκεται μέσα στο χώρο του κλιβάνου πυρόλυσης του οποίου τα τοιχώματα ανεβοκατεβαίνουν. Για όργανα θερμικής ανάλυσης που μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες όπως το STA-1500, το οποίο μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασία 1500 °C, ο δίσκος αυτός είναι κατασκευασμένος από κράματα πλατίνας και ροδίου. Στα σημεία όπου τοποθετούνται τα ποτηράκια υπάρχουν τρία κάθετα ποδαράκια για να είναι βέβαιο πως τα δείγματα προς ανάλυση θα τοποθετούνται πάντα στο ίδιο σημείο. Στο κάτω μέρος του δίσκου και στο σημείο που τοποθετούνται τα ποτηράκια υπάρχουν δύο θερμοστοιχεία για να μπορεί να μετρηθεί η θερμοκρασία. Σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες (>1200°C) είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί ειδικό κεραμικό υλικό που προμηθεύει η κατασκευάστρια εταιρία στα σημεία που τοποθετούνται τα ειδικά ποτηράκια για να μην κολλήσουν πάνω στο δίσκο.

Το τμήμα της πειραματικής συσκευής που περιγράφηκε εκτενέστερα πιο πάνω φαίνεται και στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 5.4 Ζυγός στον οποίο τοποθετούνται τα δείγματα προς θερμική ανάλυση

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στους εξής παράγοντες :

α) Αποφυγή ταλαντωτικών κινήσεων του οργάνου όπου μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις μας κατά κύριο λόγο όσο αφορά τη ζύγιση του δείγματος κατά τη διάρκεια του πειράματος. Για το λόγο αυτό η συσκευή είναι τοποθετημένη σε μέρος που δεν παρουσιάζει ταλαντώσεις και εξωτερικούς θορύβους.

β) Η θερμοκρασία περιβάλλοντος στο χώρο που τοποθετείται η συσκευή πρέπει να κυμαίνεται κατά μέσο όρο στα όρια μεταξύ 18°C και 28°C . Επιπρόσθετα είναι απαραίτητο να αποφεύγουμε την έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία, θερμαντικά σώματα και άλλες μορφές θερμικών επιδράσεων στη συσκευή για να μην επηρεάζεται πιθανότατα η σωστή λειτουργία των θερμοστοιχείων.

Οι συνδέσεις για την κυκλοφορία του νερού γίνονται στο πίσω μέρος της συσκευής. Αν η τροφοδοσία νερού στο όργανο δεν έχει γίνει δεν είναι δυνατή η διακοπή του ειδικού συναγερμού με χρήση του πλήκτρου reset. Η χρήση πολύ μεγάλης πίεσης νερού είναι πιθανό να προκαλέσει αποσύνδεση ή δυσλειτουργία στο εσωτερικό σύστημα σωλήνων. Για το λόγο αυτό υπάρχει ρυθμιστής πίεσης νερού, ο οποίος είναι μόνιμα τοποθετημένος στην τροφοδοσία του νερού. Η πίεση του νερού θα πρέπει να ρυθμίζεται περίπου στο 1 bar. Σημαντικό είναι η συσκευή να μη λειτουργεί για πολλές ώρες χωρίς έλεγχο έτσι ώστε να αποφευχθεί κάποιος πλημμυρισμός από βλάβη αν και κάτι τέτοιο δεν συνηθίζεται.

Τα αέρια που εισάγονται στη συσκευή θα πρέπει να είναι υψηλής καθαρότητας και με πολύ μικρό ποσοστό υγρασίας. Η πίεσή τους και πάλι δε θα πρέπει να ξεπερνά το 1 bar. Οι συνδέσεις για την εισαγωγή των αερίων στο θάλαμο πυρόλυσης γίνονται επίσης στο πίσω μέρος της συσκευής.

5.4 Είδη Πειραματικών Φάσεων και Διαδικασιών

Τέσσερα είναι τα βασικά είδη μεταβολών που μπορούν να προγραμματιστούν για να γίνουν μέσα στο χώρο που εισάγεται το δείγμα (φούρνος).

1. Sample Segment

Προγραμματισμός της συχνότητας μετρήσεων στο δείγμα. Κατά τη διάρκεια ενός μικρού πειράματος πληροφορίες για το δείγμα και τις συνθήκες πρέπει να συλλέγονται με μεγάλη συχνότητα, ενώ για πιο χρονοβόρα πειράματα θερμικής ανάλυσης ο ρυθμός μετρήσεων πάνω στο δείγμα μας είναι καλύτερα να είναι αρκετά μικρότερος. Σημειώνουμε εδώ πως το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της πυρόλυσης είχε τη δυνατότητα 16.000 μετρήσεων πάνω στο δείγμα κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Αυτές οι μετρήσεις βέβαια θεωρούνται πολλές για την πλειοψηφία τέτοιων πειραμάτων. Είναι προφανές πως ο αριθμός τους μειώνεται με αύξηση του χρονικού διαστήματος μεταξύ των μετρήσεων, που προγραμματίζεται κατά την εισαγωγή και των υπόλοιπων $\dot{\omega}$ εδομένων του πειράματος. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιεί η δική μας συσκευή θερμικής ανάλυσης μπορεί να συλλέγει πληροφορίες για το δείγμα μας με ένα ρυθμό 0.25 sec και περισσότερο. Επίσης ο ρυθμός αυτός υπάρχει η δυνατότητα να αλλάζει ανάλογα σε ποια φάση της πειραματικής διαδικασίας είμαστε και σε ποια θερμοκρασιακή κατάσταση. Οι αλλαγές αυτές του ρυθμού πειραματικών μετρήσεων και πάλι προγραμματίζονται κατάλληλα. Η εμπειρία έχει δείξει πως ένας ρυθμός 0.25 sec θα ήταν απαραίτητος σε μία γρήγορη διαδικασία όπως το λιώσιμο μετάλλου, ενώ ρυθμοί μετρήσεων της τάξης των 2 sec είναι καταλληλότεροι σε πιο αργές διεργασίες όπως θα ήταν το λιώσιμο πολυμερών. Για μεγάλης χρονικής διάρκειας ισόθερμα πειράματα όπως αυτό που χρησιμοποιείται στη μέτρηση της θερμοχωρητικότητας υλικών πολύ πιο αργοί ρυθμοί συλλογής αποτελεσμάτων είναι προτιμότεροι.

2. Ramp Segment

Διαδικασία θερμοκρασιακών μεταβολών. Ο ελεγκτής της θερμοκρασίας αν προγραμματιστεί μία τέτοια πειραματική φάση θα ελέγχει τις θερμοκρασιακές

συνθήκες του φούρνου από μία καθορισμένη αρχική θερμοκρασία ως μια τελική με το ρυθμό αύξησης που επίσης προκαθορίζεται.

3.Iso Segment

Διαδικασία ισοθερμοκρασιακών μεταβολών. Όταν προγραμματιστεί μια τέτοια φάση το πρόγραμμα διατηρεί το δείγμα σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες για το χρονικό διάστημα που επιλέγουμε.

4.Trigger Segment

Διαδικασία συλλογής πληροφοριών με εξωτερικό ερέθισμα. Η διαδικασία αυτή είναι μία ιδιαίτερη ισοθερμοκρασιακή διαδικασία. Χρησιμοποιείται για να συγχρονίσει τη συλλογή πειραματικών αποτελεσμάτων σε ένα εξωτερικό ερέθισμα.

5.5 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας - Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Σε όλα τα πειράματα θερμικής ανάλυσης που έγιναν, ακολουθήθηκε σχεδόν η ίδια διαδικασία. Έγιναν διάφορες σειρές πειραμάτων σε πέντε είδη ξύλου (kastanea, fagus, ostria, melega, quercus).

Κατάλληλα δείγματα από τα ξύλα που μας ενδιέφεραν ζυγίστηκαν σε εξωτερικό ζυγό ακριβείας και τοποθετήθηκαν στο ειδικό ποτηράκι της συσκευής θερμικής ανάλυσης στο οποίο αναφερθήκαμε κατά την περιγραφή της συσκευής. Στη συσκευή συνδέθηκε φιάλη αζώτου και η παροχή ρυθμίστηκε σταθερά στα 50 ml/min.

Παράλληλα ο ειδικός μανδύας της συσκευής τροφοδοτείται από την παροχή του νερού με πίεση περίπου 1 bar. Με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή και του ειδικού προγράμματος θερμικής ανάλυσης που είναι φορτωμένο σε αυτόν προγραμματίστηκαν θερμοκρασιακές μεταβολές για το δείγμα μας.

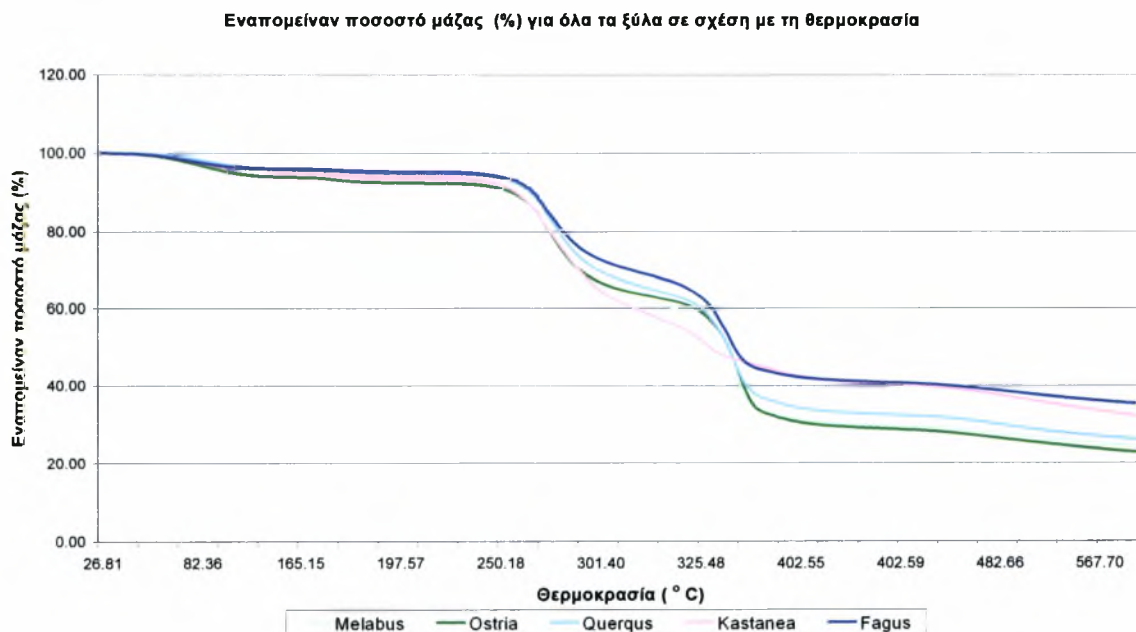
Μετά από αυτά τα αρχικά πειράματα παρατηρήθηκε το εξής: υπήρχαν θερμοκρασίες στις οποίες το δείγμα μας παρουσίαζε πολύ μεγάλους ρυθμούς απώλειας μάζας και ισχυρά εξώθερμη συμπεριφορά. Επιπρόσθετα το τελικό εναπομείναν ποσοστό μάζας από την αρχική ήταν ιδιαίτερα μικρό και η υπολογιζόμενη συνολική θερμότητα που εκλυόταν από το δείγμα αρκετά μεγάλη. Το γεγονός αυτό μας οδήγησε στο συμπέρασμα πως κατά τη διαδικασία του πειράματος είχαμε αντιδράσεις καύσης και συνεπώς τα αποτελέσματά μας δε θα ήταν αξιόπιστα. Επομένως η πιο πιθανή εξήγηση ήταν ότι ο φούρνος πυρόλυσης δεν ήταν αρκετά καθαρός από την παρουσία οξυγόνου ή υπήρχε κάποιο μη στεγανό σημείο και γινόταν καύση λόγω και του δεδομένου πολύ μικρού βάρους του δείγματος (τάξης χιλιοστών του γραμμαρίου) .

Σε συνεργασία με την εταιρία Rheometric Scientific αποφασίστηκε ότι τα μη επιθυμητά φαινόμενα της καύσης που πιθανώς να λάμβαναν χώρα μέσα στον θάλαμο πυρόλυσης θα μπορούσαν να αποφευχθούν αν πριν την

διεξαγωγή οποιουδήποτε πειράματος γινόταν πλύση του θαλάμου 6-7 φορές με άζωτο και τελικά μέσα από μια σύνθετη διαδικασία που περιλάμβανε και χρήση αντλίας κενού τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι στον θάλαμο διεξάγεται μόνο πυρόλυση και όχι καύση.

Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκαν ορισμένες σειρές πειραμάτων για όλα τα ξύλα και σε διάφορες συνθήκες θέρμανσης, αλλά κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν μόνο εκείνα που παρουσίασαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Κατ' αρχήν παρατίθενται ενδεικτικά αποτελέσματα της θερμοσταθμικής ανάλυσης (TGA). Το παρακάτω διάγραμμα αφορά θέρμανση ως την τελική θερμοκρασία 600°C με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας στον φούρνο 10°C/min. Τα αποτελέσματα συγκρίνουν την παραμένουσα μάζα για όλα τα είδη ξύλου που δοκιμάστηκαν ως τώρα. Η παραμένουσα μάζα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας παρέχει τα στοιχεία για την εκτίμηση των εξής μεγεθών: (1) του ποσοστού υγρασίας (που αντιστοιχεί στο πρώτο πλατώ). (2) της πολυπλοκότητας των αντιδράσεων πυρόλυσης (διαφορετικές κλίσεις στο διάγραμμα μάζας-θερμοκρασίας αντιστοιχούν σε διαφορετικές αντιδράσεις). (3) του ποσοστού ξυλάνθρακα που απομένει με το πέρας της θέρμανσης.

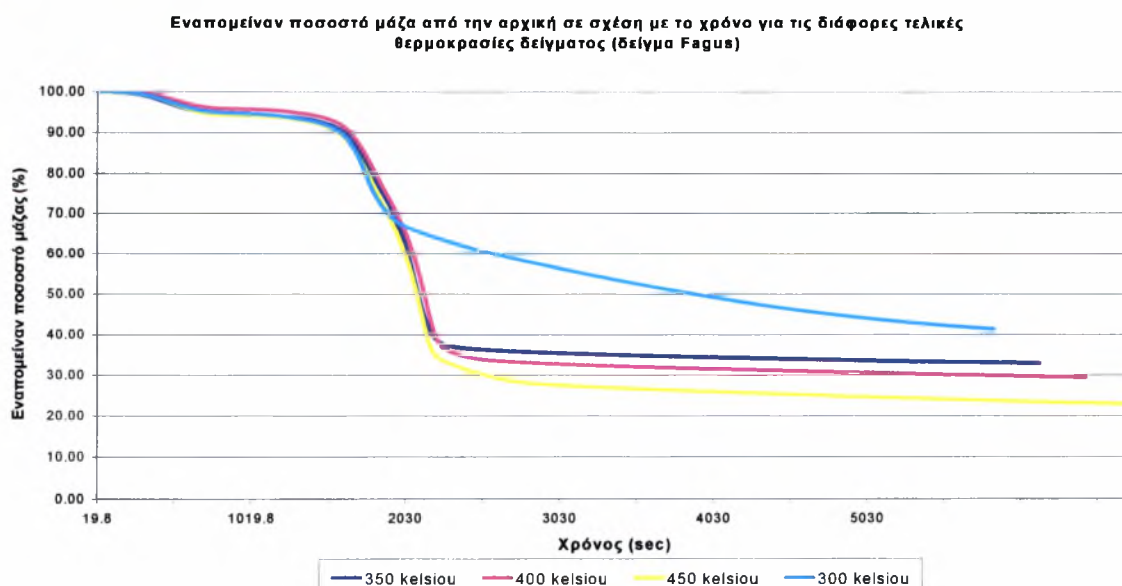


Σχήμα 5.5 Εναπομείναν ποσοστό μάζας κατά την διαδικασία της πυρόλυσης για διαφορετικά είδη ξυλείας σε σχέση με την θερμοκρασία

Μία πρώτη παρατήρηση από το διάγραμμα είναι ότι το ξύλο *Fagus* είναι αυτό που διατηρεί περισσότερη μάζα μετά το τέλος του πειράματος και ίσως να είναι το πλέον ενδεδειγμένο για παραγωγή ξυλάνθρακα σε αντίθεση με το ξύλο *Ostria* το οποίο έχει το μικρότερο ποσοστό μάζας σε σχέση με την αρχική στο τέλος. Το συμπέρασμα αυτό θα οριστικοποιηθεί μετά τη συγκέντρωση περισσότερων αποτελεσμάτων και τη συνεκτίμηση του διαφορετικού ποσοστού υγρασίας σε κάθε είδος ξύλου. (Να σημειωθεί ότι στο διάγραμμα η μάζα που παραμένει αναπαριστάται σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ θα μπορούσε να παρασταθεί και σε σχέση με το χρόνο διεξαγωγής του πειράματος χωρίς να υπάρχει κάποια διαφοροποίηση στα συμπεράσματα).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το σχεδιασμό του βιομηχανικού κλιβάνου παρουσιάζει ο προσδιορισμός της τελικής θερμοκρασίας θέρμανσης του ξύλου. Είναι γνωστό ότι υψηλή θερμοκρασία μειώνει το ποσοστό ξυλάνθρακα που απομένει, ενώ χαμηλή θερμοκρασία οδηγεί σε ατελή ξυλάνθρακα με μεγάλη περιεκτικότητα σε πτητικά.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της τελικής θερμοκρασίας, εκτελέστηκε σειρά πειραμάτων για ένα μόνον είδος ξύλου (*fagus*), με τον ίδιο ρυθμό θέρμανσης, 10°C/min, αλλά διαφορετικές τελικές θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.6 Εναπομένειν ποσοστό μάζας κατά την διαδικασία της πυρόλυσης για διαφορετικές θερμοκρασίες πυρόλυσης σε σχέση με τον χρόνο

Φαίνεται να υπάρχει μία σαφής σχέση ανάμεσα στην θερμοκρασία στην οποία διεξάγουμε την πυρόλυση και στην εναπομείνασα μάζα, δηλαδή υψηλότερη θερμοκρασία πράγματι οδηγεί σε λιγότερο ξυλάνθρακα. Μία ενδιαφέρουσα ειδικότερη παρατήρηση είναι ότι η καμπύλη στη θερμοκρασία των 300°C είναι πολύ διαφορετική από αυτές των 350, 400 και 450°C (που είναι παρόμοιες μεταξύ τους). Ένα πρώτο συμπέρασμα είναι ότι η πυρόλυση σε 300 °C είναι ατελής, ενώ το προϊόν των 350 °C και άνω μπορεί να είναι αποδεκτό. Είναι επίσης εμφανές ότι η παραμονή του προϊόντος στην τελική θερμοκρασία επί παρατεταμένο διάστημα μειώνει σταδιακά το στερεό υπόλειμμα. Άρα έχει και από αυτή την άποψη σημασία η διακοπή της θέρμανσης το συντομότερο δυνατόν μόλις ο πυρήνας του ξύλου καταλήξει στην επιθυμητή τελική θερμοκρασία.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό αποτέλεσμα διαφορικής θερμιδομετρίας σάρωσης (DSC). Επειδή η θερμαντική πλάκα του οργάνου είναι σε άσχημη κατάσταση και σύντομα θα αντικατασταθεί, το αποτέλεσμα δεν θεωρείται ποσοτικά ως απόλυτα αξιόπιστο. Παρέχει όμως ήδη κάποια χρήσιμα ποιοτικά συμπεράσματα.

Ειδικότερα, το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την χρονική εξέλιξη της θερμοροής προς / από το δείγμα (Ostria) και διακρίνει ενδόθερμες και εξώθερμες μεταβολές. Για παράδειγμα, είναι εμφανής η απώλεια της υγρασίας ως μία ισχυρά ενδόθερμη περιοχή (η πρώτη αρνητική κορυφή). Πέρα από μία θερμοκρασία όμως εμφανίζονται εξώθερμες κορυφές, σε συμφωνία με τις βιβλιογραφικές πληροφορίες ότι μετά τους ~270 °C η πυρόλυση εκλύει θερμότητα που μπορεί να συντηρήσει την περαιτέρω μετατροπή. Τέλος, το σχετικά σταθερό ενδόθερμο πλατό στα τελικά στάδια αντικατοπτρίζει την σταδιακή μείωση μάζας του ξυλάνθρακα, καθώς και τη θερμοχωρητικότητα του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα θερμοροής κατά την διάρκεια της πυρόλυσης

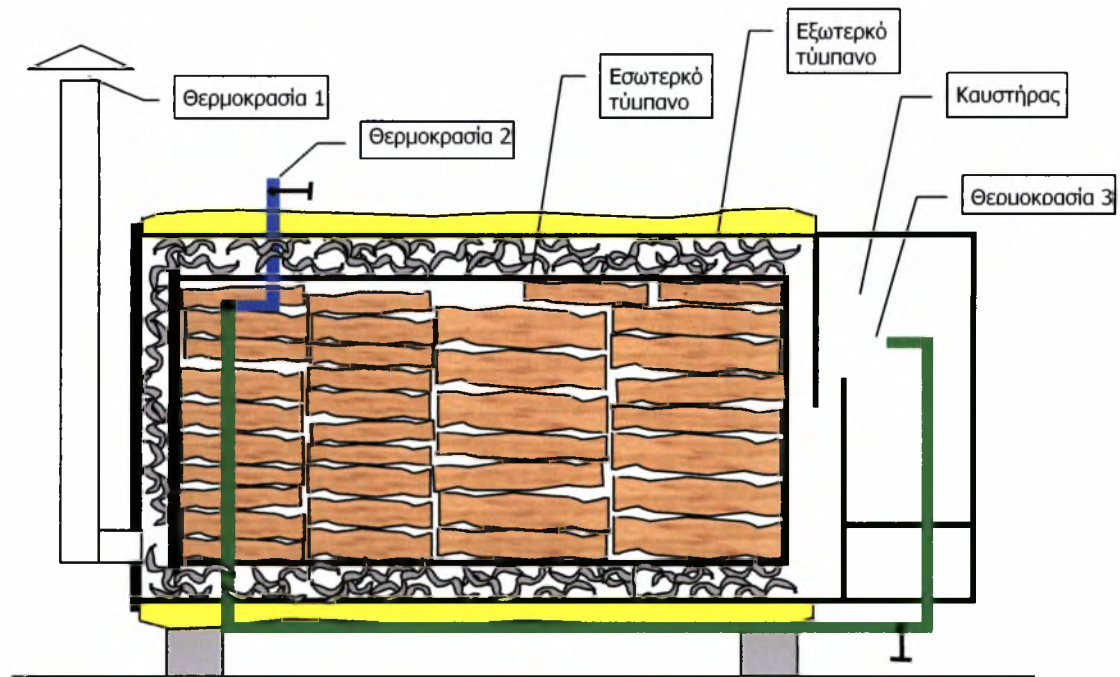
Η συνολική εναλλαγή θερμότητας του δείγματος με το περιβάλλον του φούρνου βρίσκεται εύκολα με αριθμητική ολοκλήρωση της παραπάνω καμπύλης. Το μέγεθος αυτό είναι σημαντικό για τον σχεδιασμό της βιομηχανικής μονάδας γιατί σε συνδυασμό με τις θερμικές απώλειες καθορίζει τη συνολική ενεργειακή απαίτηση από εξωτερικές πηγές.

6. Πείραμα σε μεταλλικό κλίβανο τύπου τύμπανου

6.1 Περιγραφή της συσκευής

Προκειμένου να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα αλλά και να κατανοήσουμε καλύτερη ολόκληρη την διεργασία ανθρακοποίησης που μετατρέπει το ξύλο σε κάρβουνο αποφασίσαμε ότι είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα ανθρακοποίησης σε ένα μεταλλικό κλίβανο τύπου τύμπανου. Ο κλίβανος είναι μια ιδιοκατασκευή του κ. Μιχαλάκη Δημήτριου Δασολόγου ύστερα από χρόνια μελέτης και έρευνας στο αντικείμενο της παραγωγής ξυλοκάρβουνου. Πρόκειται για έναν κλίβανο όπου το ξύλο σφραγίζεται στο εσωτερικό ενός τυμπάνου και με ρεύμα θερμών καυσαερίων εξωτερικά του τυμπάνου επιτυγχάνεται η θέρμανσή του, που οδηγεί τελικά στην θέρμανση και των ξύλων που περιέχει και απουσία αέρα πετυχαίνουμε την ανθρακοποίησή τους. Η φιλοσοφία στην οποία στηρίχθηκε η κατασκευή του κλίβανου είναι απλή και πρακτική αφού ήδη γνωρίζουμε ότι το ξύλο κατά την διαδικασία της πυρόλυσης παράγει βιοέλαια και καύσιμα αέρια τα οποία αν καούν παράγουν μεγάλο ποσό θερμικής ενέργειας ικανό να συντηρήσει και να ολοκληρώσει την διαδικασία της πυρόλυσης. Έτσι λοιπόν ο συγκεκριμένος κλίβανος διαθέτει καυστήρα διπλής ενέργειας δηλαδή για να ξεκινήσει η διεργασία της θέρμανσης των ξύλων και να αποβληθεί η υγρασία τους χρησιμοποιεί ενέργεια από καύση ξύλου και εν συνεχεία, αφού η διαδικασία προχωρήσει στο στάδιο της πυρόλυσης που έχουμε παραγωγή καύσιμων αερίων και βιοελαίων, ο καυστήρας καίει πλέον όλα τα παραπροϊόντα της πυρόλυσης.

Κατασκευαστικά ο κλίβανος αποτελείται από δύο μεταλλικά τύμπανα (βαρέλια) διαφορετικής διαμέτρου τοποθετημένα ομόκεντρα το ένα μέσα στο άλλο, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχέδιο



Σχήμα 6.1 Μεταλλικός Κλιβανός τύπου Τυμπάνου

Το εξωτερικό τύμπανο είναι ένα κλασικό μεταλλικό βαρέλι λαδιού 250 lt διαμέτρου 60 cm και μήκους 90 cm και το εσωτερικό ένα μικρότερο μεταλλικό βαρέλι 50lt με διαστάσεις, διάμετρο 36cm και μήκος 50 cm. Είναι τοποθετημένα ομόκεντρα όπως φαίνεται και στο σχήμα και ενδιάμεσό τους υπάρχουν μεταλλικά ρινίσματα (απόβλητα σιδηρουργείου). Στο αριστερό καπάκι βρίσκετε η καμινάδα η οποία είναι τοποθετημένη στο κάτω μέρος ενώ στο δεξί τμήμα του εξωτερικού τύμπανου βρίσκετε ο καυστήρας διπλής ενεργείας.

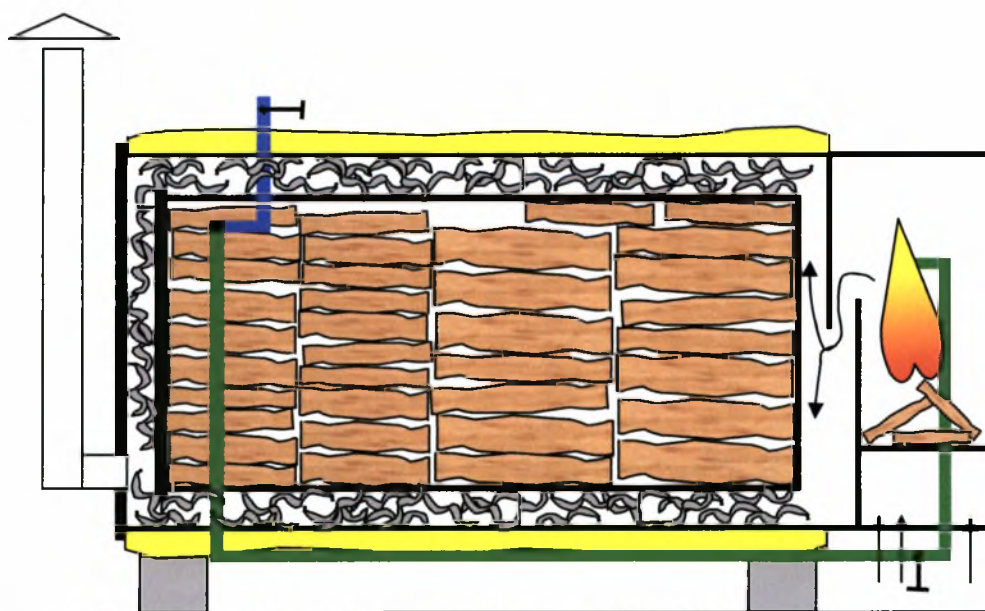
Στο εσωτερικό τύμπανο αριστερά του διαθέτει καπάκι που αποκολλάτε εντελώς για να τοποθετούμε τα ξύλα από τα οποία θέλουμε να παράγουμε ξυλάνθρακα και ασφαρίζει αεροστεγώς με κορδόνι αμιάντου. Επίσης στο πάνω αριστερά μέρος του τύμπανου υπάρχει προσαρμοσμένη σωλήνα 1 ίντσας που χρησιμεύει στην παροχέτευση των αερίων παραπροϊόντων της ανθρακοποίησης. Η παραπάνω σωλήνα με την χρήση βανών μπορεί να οδηγήσει, ή στο περιβάλλον από την μπλε δίοδο ή στον καυστήρα από την

πράσινη δίοδο, τα αέρια που δημιουργούνται κατά την διαδικασία της ανθρακοποίησης.

Το εξωτερικό τύμπανο διαθέτει και αυτό ξεχωριστό καπάκι από την αριστερή πλευρά του, που ασφαλίζει πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένο και το στόμιο της καμινάδας, στο κάτω μέρος του. Στην δεξιά πλευρά του το τύμπανο έχει τον καυστήρα που διαθέτει πορτάκι, σχάρα καθαρισμού στο κάτω μέρος και θυρίδα αερισμού. Ο καυστήρας μπορεί να κάψει ξύλα αλλά και τα αέρια παραπροϊόντα της διεργασίας που πραγματοποιείται στο εσωτερικό τύμπανο. Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη θέρμανση του εσωτερικού τυμπάνου τοποθετήθηκαν ενδιάμεσα στα δύο τύμπανα μεταλλικά ρινίσματα που ουσιαστικά αυξάνουν την επιφάνεια επαφής του εσωτερικού τυμπάνου με τα καυσαέρια επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερη συναγωγή. Επίσης η εξωτερική επιφάνεια του κλιβάνου μονώθηκε με πάπλωμα υαλοβάμβακα προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν το δυνατόν οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον.

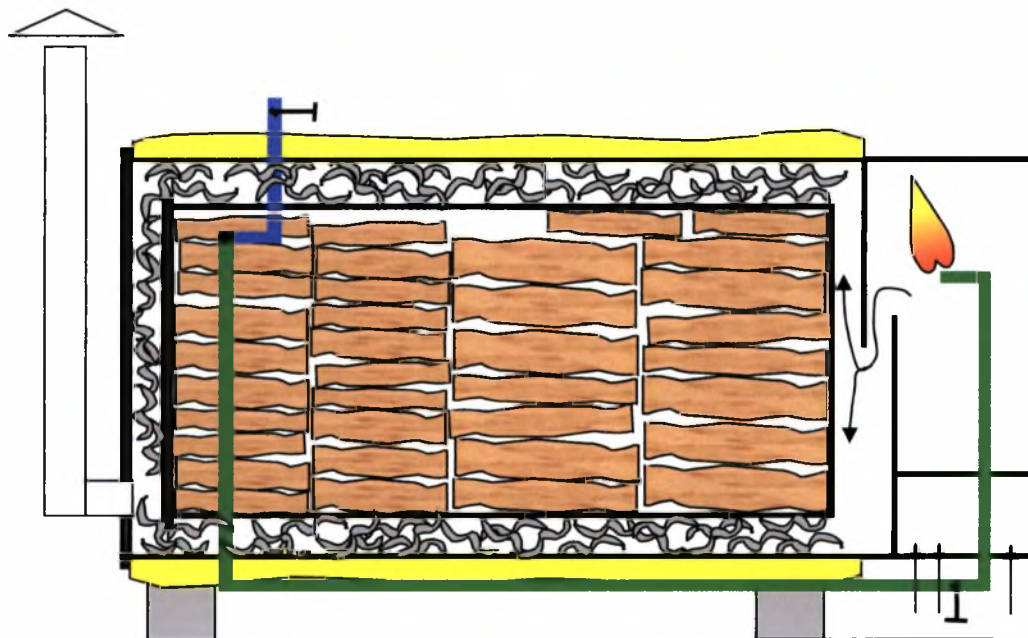
6.2 Παρουσίαση πρώτου πειράματος

Γέμισμα κλιβάνου με ξύλα βάρους 30Kg (Δρυς) και γέμισμα του καυστήρα με ξύλα (σανίδια) από παλέτες που καίγονται εύκολα. Άναμμα του καυστήρα στις 09:30. όπως φαίνετε στο σχήμα 6.2



Σχήμα 6.2 Καυστήρας που λειτουργεί με ξύλα

Προκειμένου να ανάψουν καλά τα ξύλα στον καυστήρα απαιτείται αέρας περισσότερος από αυτόν που μπορεί να μας δώσει η θυρίδα οπότε ανοίγουμε και την σχάρα στο κάτω μέρος. Ο καυστήρας πλέον λειτουργεί πολύ καλά και τα καυσαέρια στην έξοδο της καμινάδας ($\Theta 1$) είναι 113°C μετά από 30 λεπτά λειτουργίας και εμφανίζονται οι πρώτοι υδρατμοί από την μπλε δίοδο που οδεύονται στο περιβάλλον. Μετά από 60 λεπτά λειτουργίας η θερμοκρασία στον καυστήρα ($\Theta 3$) είναι 550°C ενώ των υδρατμών ($\Theta 2$) 145°C και των καυσαερίων στην έξοδο της καμινάδας ($\Theta 3$) 180°C . Μετά από 50 λεπτά ακόμα εμφανίζονται στην μπλε δίοδο πτητικά αέρια παραπροϊόντα της πυρόλυσης και το καταλαβαίνουμε γιατί πλέον το χρώμα των εξερχόμενων αερίων αλλάζει από άσπρο που ήταν λόγω των υδρατμών γίνεται γκρι αλλά επίσης αλλάζει και η υφή των αερίων που πλέον είναι κολλώδη και λιπαρή. Έτσι λοιπόν μετά το πέρας 110 λεπτών αλλάζουμε τις βάνες και οδεύουμε πλέον τα αέρια (θερμοκρασίας ($\Theta 2$) 225°C) του εσωτερικού τυμπάνου στον καυστήρα όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.3 Καυστήρας που λειτουργεί με αέρια παραπροϊόντα

Η θερμοκρασία στον καυστήρα είναι πλέον πολύ υψηλή άνω των 830°C και η θερμοκρασία στην καμινάδα είναι (Θ1) 233°C. Για τα επόμενα 80 λεπτά η θερμοκρασία ανεβαίνει παντού και στα αέρια που παράγει η πυρόλυση αλλά και στα καυσαέρια στην καμινάδα. Ενδεικτικά μετά από 170 λεπτά η θερμοκρασία των καυσαερίων (Θ1) είναι 320°C στην καμινάδα, ενώ των αερίων παραπροϊόντων της πυρόλυσης είναι (Θ2) 447°C και η θερμοκρασία στον καυστήρα παραμένει πολύ υψηλή περίπου 900°C και αποφεύγουμε να την μετρήσουμε μιας και είναι στα όρια του θερμοστοιχείου μας. Μετά από πάροδο 195 λεπτών μετράμε θερμοκρασία στην καμινάδα (Θ1) 360°C και εν συνεχεία την βλέπουμε να πέφτει αργά έως το χρονικό σημείο των 210 λεπτών που πλέον είναι εμφανές ότι έχει μειωθεί αρκετά η παροχή των καυσαερίων (Θ1) 344°C οπότε και κλείνουμε σημαντικά το άνοιγμα της καμινάδας, αλλά έχει μειωθεί και η φλόγα στον καυστήρα που σημαίνει ότι έχει μειωθεί και η παραγωγή αερίων παραπροϊόντων στο εσωτερικό τύμπανο. Για τα επόμενα 20 λεπτά η φλόγα στον καυστήρα από τα αέρια παραπροϊόντα είναι πολύ μικρή ίσα που συντηρείται οπότε εμείς εφοδιάζουμε τον καυστήρα με λίγα ξύλα ακόμη προκειμένου να εξασφαλίσουμε ότι πλέον η διαδικασία της ανθρακοποίησης ολοκληρώθηκε αφού δεν έχουμε επιπλέον παραγωγή αερίων παραπροϊόντων. Μετά πέρας 230 λεπτών σβήνουμε τον καυστήρα και ανοίγουμε το εξωτερικό τύμπανο προκειμένου να ψυχθεί το εσωτερικό τύμπανο. Ενδεικτικά μετράμε στην επιφάνεια του εσωτερικού τυμπάνου και στα ρινίσματα η θερμοκρασία είναι 570°C. Θερμοκρασία υψηλότερη από αυτή που έπρεπε να είχαμε (400°C - 500°C) για να πετύχουμε την μέγιστη απόδοση σε βάρος για τον παραγόμενο ξυλάνθρακα. Αφότου πέρασε μια μέρα άνοιξε το εσωτερικό τύμπανο όπου και διαπιστώσαμε ότι είχε μετατραπεί εξολοκλήρου το ξύλο σε κάρβουνο αρίστης ποιότητας κρίνοντας από το χρώμα του, που είχε μια γυαλάδα καταμαρτυρώντας την χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα. Συνολικά για την υλοποίηση του πειράματος καταναλώσαμε στον καυστήρα ξύλο βάρους περίπου 4Kgr προερχόμενο από σανίδια παλέτας.

Προκειμένου όμως να καταλήξουμε σε αποτελέσματα που θα είναι χρήσιμα δεδομένα στον σχεδιασμό του κλιβάνου θα πρέπει να επαναληφθεί το πείραμα και να πάρουμε μετρήσεις θερμοκρασίας σε περισσότερα σημεία αλλά

και να διατηρήσουμε την θερμοκρασία στον καυστήρα χαμηλότερη ούτως ώστε να είναι χαμηλότερη και η θερμοκρασία στο εσωτερικό τύμπανο που λαμβάνει χώρα η διαδικασία της ανθρακοποίησης, μιας και έχουμε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την απόδοση βάρους όταν η ανθρακοποίηση επιτυγχάνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες όπως έδειξε και η θερμική ανάλυση αλλά και η διεθνή βιβλιογραφία.

Πείραμα 1ο

29/03/2003 ώρα έναρξης 09:32

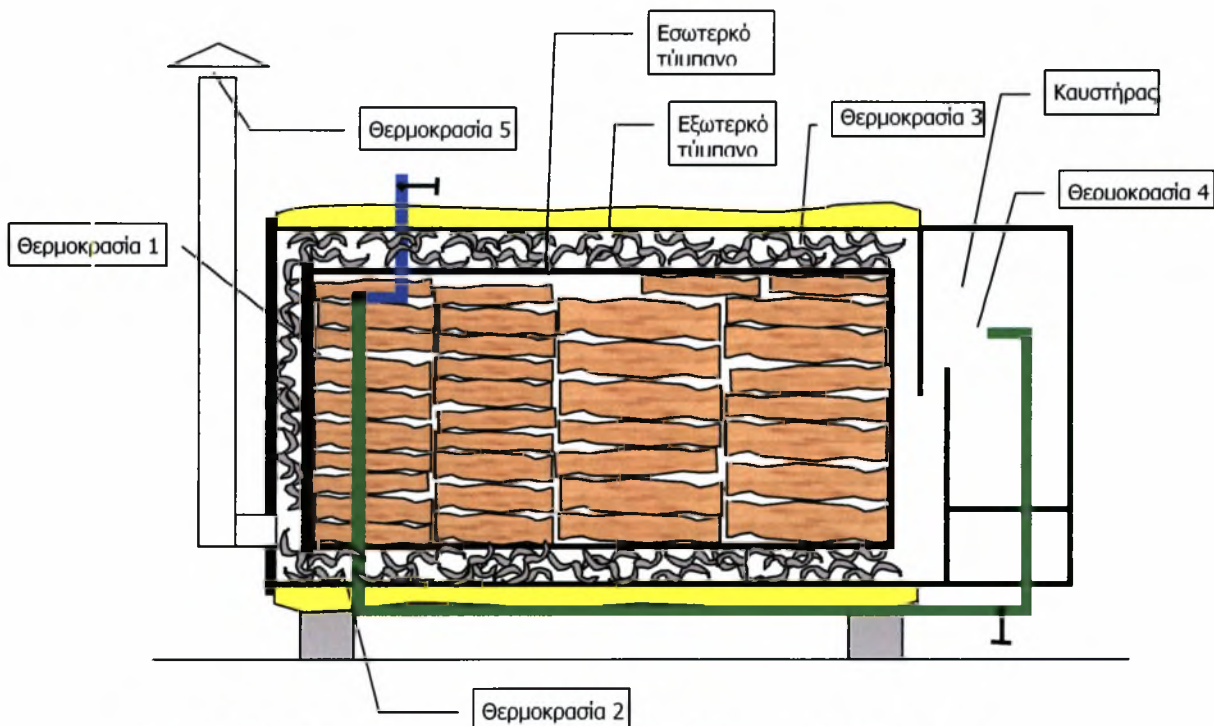
Θερμοκρασία περιβάλλοντος 19°C

χρόνος (min)	Θ1 (°C)	Θ2 (°C)	Θ3 (°C)	παρατηρήσεις
35	113			εμφάνιση υδρατμών
40	127			
48	150			
55		120	550	
65	180	145		
73	187			
78	195	153		
85	205	200	830	
110	225			καύση πτητικών στον καυστήρα
115	233		833	
120	262			
130	281			
145	298			
165	320	433		
170		447		
175		463		
180		466		
185	355	466		
195	360			μείωση φλόγας μείωση παροχής πτητικών
200	353			
210	344			
215	343			παροχή πτητικών ελάχιστη , ξύλα στον καυστήρα
223	333			
228	322			τελευταία ξύλα στον καυστήρα
234	315			
238	300			θερμοκρασία ρινισμάτων 370 °C
Τέλος				

6.3 Παρουσίαση Δεύτερου πειράματος

Σ' αυτό το δεύτερο πείραμα, έχοντας την εμπειρία του προηγούμενου είμαστε σε θέση να το οργανώσουμε καλύτερα προκειμένου να διορθώσουμε λάθη που έγιναν στο προηγούμενο πείραμα αλλά και να λάβουμε μετρήσεις καλύτερες και πιο αξιόπιστες.

Πρωταρχικός μας στόχος είναι να ελέγξουμε την θερμοκρασία στο εσωτερικό τύμπανο να παραμείνει σε χαμηλότερα επίπεδα με μέγιστη όχι άνω των 550°C. Έτσι λοιπόν τοποθετούμε πέντε θερμοστοιχεία σε καίρια σημεία του κλιβάνου. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στα σημεία όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα με σκοπό το (Θ4) να μας δίνει την θερμοκρασία στον καυστήρα το (Θ3) την θερμοκρασία στο διάκενο από όπου διέρχονται τα καυσαέρια σε απόσταση κοντά στον καυστήρα, το (Θ2) πάλι στο διάκενο αλλά μακριά από τον καυστήρα και σε θέση πολύ κοντά στην σύνδεση με την καμινάδα και τέλος (Θ1) ένα θερμοστοιχείο που μετράει την θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο πυρόλυσης στην πλευρά της πόρτας και το (Θ5) που μετράει την θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο της καμινάδας.



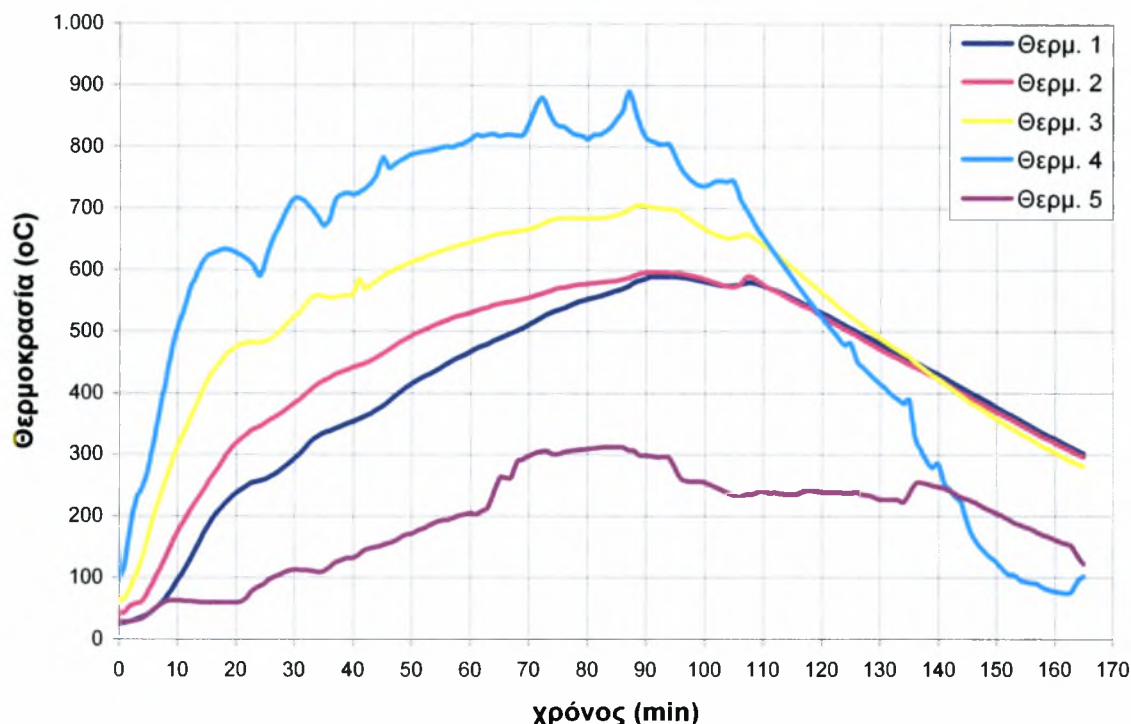
Σχήμα 6.4 Πειραματική διάταξη δεύτερου πειράματος

Για να ελέγξουμε και να συγκρατήσουμε την θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα πρέπει να ρυθμίζουμε την παροχή του αέρα στον καυστήρα από την θυρίδα που υπάρχει στο πίσω μέρος του κλιβάνου να προσέχουμε την ποσότητα των ξύλων που θα κάψουμε αρχικά στον καυστήρα αλλά και να ελέγξουμε την παροχή των πτητικών που διοχετεύουμε στον καυστήρα, γιατί είναι προφανές ότι η παροχή των πτητικών είναι αυξημένη με αποτέλεσμα να έχουμε υψηλή θερμοκρασία άρα σαν λύση έχει επιλεγεί να ρυθμίζουμε την παροχή στο επιθυμητό επίπεδο αφήνοντας παράλληλα μέρος των πτητικών ελεύθερα στην ατμόσφαιρα από την μπλε δίοδο. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι από ένα σημείο και μετά η αντίδραση της πυρόλυσης είναι εξώθερμη οπότε τότε πρέπει προσέξουμε την θερμοκρασία στο θάλαμο πυρόλυσης (εσωτερικό τύμπανο), να μην αυξηθεί πάνω από 580°C γιατί θα μειωθεί η απόδοση σε ξυλοκάρβουνο. Όπως είδαμε και στο πρώτο πείραμα η καπνοδόχος που είχε διάμετρο 100mm ήταν πολύ μεγάλη οπότε και αναγκαστήκαμε να μειώσουμε το άνοιγμα προκειμένου να έχουμε καλύτερη κυκλοφορία των καυσαερίων στο διάκενο των δύο τυμπάνων.

Γεμίζουμε πάλι το εσωτερικό τύμπανο αυτή τη φορά με 18 Kgr ξύλο είδους Δρυς και τον καυστήρα με σανίδια από παλέτα για εύκολη ανάφλεξη. Εκτιμάται ότι τώρα τέλος καλοκαιριού η υγρασία του ξύλου είναι μικρότερη περίπου στο 15% σύμφωνα με την γνώμη του ειδικού Δασολόγου κ. Μιχαλάκη Δημήτρη αφού το ξύλο έχει στεγνώσει αρκετά κατά την περίοδο του καλοκαιριού από την υγρασία που ήταν περίπου 35% στο ίδιο ξύλο κατά το πρώτο πείραμα αρχές καλοκαιριού.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του πειράματος σε κάθε θερμοστοιχείο ξεχωριστά.

Καταγραφή Θερμοκρασιών 2ο πείραμα



σχήμα 6.5 Καταγραφή Θερμοκρασιών πείραμα 2^ο.

Αυτή τη φορά στον καυστήρα τα ξύλα που τοποθετούμε αρχικά είναι πολύ λιγότερα από την προηγούμενη φορά προκειμένου να μπορέσουμε να ελέγξουμε καλύτερα την θερμοκρασία του. Μετά 35 λεπτά από την έναυση του καυστήρα έχουμε την εμφάνιση των πρώτων πτητικών από την μπλε δίοδο, οπότε και τα διοχετεύουμε στον καυστήρα ενώ η θερμοκρασία στον καυστήρα είναι περίπου 670°C. Με την διοχέτευση των πτητικών στον καυστήρα η θερμοκρασία αρχίζει να ανεβαίνει σιγά σιγά. Στο 60στο λεπτό η θερμοκρασία στο (Θ3) πλησιάζει τους 643 °C στο (Θ2) είναι 534 °C ενώ στον καυστήρα είναι 812 °C και στο εσωτερικό τύμπανο (Θ1) είναι 468°C. Παρατηρώντας τις μετρήσεις μέχρι το σημείο εκείνο βλέπουμε ότι η θερμοκρασία στα (Θ1), (Θ2) & (Θ3) συνέχεια ανεβαίνει παράλληλα με τον ίδιο ρυθμό. Φοβούμενοι περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στον καυστήρα που θα οδηγήσει σε υψηλές θερμοκρασίες πυρόλυσης προσπαθούμε να πετύχουμε μείωση της θερμοκρασίας στον καυστήρα. Γνωρίζοντας ότι δεν μπορούμε να μειώσουμε

άλλο την παροχή οξυγόνου στον καυστήρα προσπαθούμε να μειώσουμε την παροχή των πτητικών διώχνοντας ένα μέρος στο περιβάλλον από την μπλε δίοδο και καίγοντάς τα προκειμένου να αποφύγουμε δυσάρεστα ατυχήματα (δηλητηριάσεις, κα). Παρατηρούμε όμως τότε ότι η θερμοκρασία στον καυστήρα ανεβαίνει απότομα και φτάνει τους 885 °C, αυτό σημαίνει ότι η μείωση της παροχής των πτητικών που τώρα είναι πιο πλούσια σε καύσιμα αέρια και φτωχότερα σε υγρασία είναι ιδανική με την παροχή οξυγόνου που έχουμε με αποτέλεσμα η καύση να είναι τέλεια και η θερμοκρασία να αυξάνει. Προσπαθώντας να “κρυώσουμε την φλόγα” αποφασίζουμε ότι πρέπει να ρίξουμε περισσότερα πτητικά στον καυστήρα αφού όταν ανοίγαμε την παροχή του αέρα είχαμε έντονα φαινόμενα με την φλόγα να τείνει να αποκολληθεί. Πράγματι ρίχνοντας όλα τα πτητικά στον θάλαμο καύσης και κρατώντας μειωμένη την παροχή αέρα έχουμε μείωση της θερμοκρασίας. Βλέποντας την θερμοκρασία στον καυστήρα από το 72° λεπτό μέχρι το 80° να πέφτει κατακόρυφα και μέσα σε 8 λεπτά από τους 880 °C να πέφτει στους 810 °C φοβούμενοι περαιτέρω μείωσή της προσπαθούμε πάλι την ελέγξουμε αυξάνοντας το άνοιγμα της καμινάδας προκειμένου να έχουμε καλύτερη “αναπνοή” της φλόγας αλλά πάλι βλέπουμε την θερμοκρασία να ανεβαίνει επικίνδυνα και να πλησιάζει τους 890 °C οπότε μειώνουμε πάλι το άνοιγμα της καμινάδας και αφαιρούμε μέρος της εξωτερικής μόνωσης προκειμένου να αποφύγουμε περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τύμπανο που στο 91° λεπτό είναι ήδη 590 °C . Στη συνέχεια και μετά το 95° λεπτό η παροχή των πτητικών αρχίζει να μειώνεται, δείγμα του ότι η διαδικασία πλησιάζει στο τελευταίο στάδιο της όπου το ξύλο πλέον έχει μετασχηματισθεί σε ξυλάνθρακα και σε αυτό το στάδιο με συνεχιζόμενη θέρμανση σε θερμοκρασίες άνω των 500 °C αφαιρούνται πλέον μόνο πίσσες και αυξάνεται η περιεκτικότητα του ξυλάνθρακα σε άνθρακα και μειώνονται τα βιοέλαια του. Γι’ αυτό το λόγω και το αέριο που παράγεται δεν έχει τόσο μεγάλη θερμογόνο δύναμη αφού οι κύριες ποσότητες των καυσίμων αερίων έχουν ήδη απομακρυνθεί. Ενδεικτικά στο 110° λεπτό η θερμοκρασίες είναι στον θάλαμο καύσης 654 °C στο (Θ3) 642 °C στο (Θ2) 577 °C και στο εσωτερικό τύμπανο 575°C. Ύστερα από 10 λεπτά οι θερμοκρασίες έχουν συγκλίνει ακόμα περισσότερο με αποτέλεσμα να έχουμε

στο (Θ1) στο (Θ2) και στον καυστήρα περίπου 530 °C ενώ στο (Θ3) 560 °C. Από το σημείο αυτό και μετά έχουμε πολύ μικρή παροχή πτητικών, ο καυστήρας σιγοκαίει με μια φλόγα που συνεχώς μικραίνει σε ένταση και οι θερμοκρασίες πλέον μειώνονται σταθερά έχοντας παντού στο διάκενο αλλά και στο εσωτερικό τύμπανο την ίδια θερμοκρασία. Ενδεικτικά στο 130^ο λεπτό οι θερμοκρασίες είναι γύρω στους 480 °C στο 140^ο λεπτό περίπου 430 °C και στο 165 όπου ολοκληρώνεται η διαδικασία μιας και δεν έχουμε περαιτέρω παραγωγή πτητικών οι θερμοκρασίες είναι γύρω στους 320 °C.

Πείραμα 2ο

06/09/2003 ώρα έναρξης 11:20

Θερμοκρασία περιβάλλοντος 27°C

χρόνος (min)	Θερμ. 1	Θερμ. 2	Θερμ. 3	Θερμ. 4	Θερμ. 5
0	27	41	61	94	28
1	27	44	67	122	28
2	92	54	83	182	29
3	32	58	105	226	32
4	36	62	135	247	35
5	41	78	168	280	42
6	48	95	201	323	49
7	56	114	231	374	55
8	66	133	259	419	61
9	79	154	286	467	63
10	94	173	311	504	63
11	111	191	334	535	63
12	127	207	356	568	62
13	145	222	377	588	61
14	163	236	398	609	60
15	180	250	418	622	60
16	195	265	434	627	60
17	209	281	448	632	60
18	220	295	460	634	60
19	230	308	469	632	60
20	238	318	475	628	61
21	244	327	480	623	61
22	250	335	482	617	69
23	255	341	483	607	80
24	258	346	482	591	86
25	261	352	485	616	92
26	265	358	489	645	99
27	271	364	497	664	103
28	278	370	506	685	107
29	285	377	516	703	112
30	294	384	525	716	113

31	303	392	535	716	113
32	313	400	546	708	112
33	323	409	556	698	111
34	330	416	559	685	109
35	335	421	557	672	110
36	338	425	556	683	117
37	342	431	557	715	125
38	347	435	558	723	129
39	351	439	560	725	132
40	354	442	562	723	132
41	358	446	585	726	138
42	363	449	570	732	145
43	367	453	576	740	148
44	373	458	583	755	150
45	379	464	591	782	153
46	387	471	596	765	157
47	395	477	601	772	159
48	402	483	605	778	164
49	409	489	609	784	170
50	415	494	613	788	172
51	421	499	617	790	177
52	427	503	621	793	180
53	432	507	625	794	185
54	437	511	628	795	189
55	442	515	631	798	192
56	448	519	635	801	193
57	453	523	638	800	197
58	458	526	641	804	201
59	463	529	643	807	204
60	468	531	646	812	205
61	473	534	648	820	204
62	477	537	651	818	208
63	481	540	654	820	214
64	485	544	657	821	235
65	489	546	659	818	262
66	494	548	661	820	190
67	498	549	662	820	263
68	502	551	663	818	288
69	506	553	665	820	293
70	512	556	667	838	298
71	517	558	670	861	302
72	523	562	674	880	305
73	528	564	679	865	306
74	532	568	682	844	301
75	535	570	684	835	301
76	539	572	684	833	304
77	543	574	685	825	306
78	547	576	685	819	308
79	550	577	685	817	308
80	553	578	684	812	309
81	555	579	684	820	310
82	557	580	685	820	312
83	560	581	686	824	313
84	563	582	687	832	313

85	567	584	689	847	312
86	570	586	692	861	312
87	574	588	698	891	308
88	580	592	704	864	306
89	584	595	705	833	299
90	587	596	704	814	299
91	590	597	703	809	298
92	590	597	701	805	296
93	589	596	699	804	296
94	590	596	699	803	295
95	590	596	697	783	278
96	588	595	692	765	261
97	587	593	686	753	258
98	586	591	679	744	257
99	584	588	673	738	257
100	581	585	667	736	255
101	579	582	662	740	251
102	577	579	658	745	247
103	576	576	655	745	242
104	575	574	652	744	239
105	575	573	653	745	235
106	577	577	655	716	232
107	580	589	659	700	236
108	580	590	655	684	236
109	578	583	649	668	239
110	575	577	642	654	241
111	571	571	635	641	238
112	567	566	628	627	238
113	563	562	620	613	237
114	559	557	613	600	235
115	554	552	605	587	235
116	550	546	597	574	236
117	545	541	588	561	241
118	540	538	580	549	241
119	536	531	572	536	241
120	531	525	564	523	239
121	526	520	556	511	239
122	521	515	548	500	239
123	516	509	540	488	239
124	511	504	533	478	238
125	505	499	525	482	237
126	500	493	518	452	239
127	495	488	510	443	235
128	490	482	503	434	234
129	485	477	497	424	231
130	480	472	490	416	227
131	475	467	484	408	227
132	471	462	477	398	228
133	466	457	471	391	227
134	461	452	465	384	223
135	456	447	459	390	237
136	451	443	451	328	252
137	446	438	444	309	255
138	441	433	436	292	253

139	436	428	429	280	250
140	431	423	422	286	248
141	425	417	416	254	246
142	420	412	409	244	242
143	415	407	402	232	237
144	410	402	396	222	232
145	404	396	389	191	228
146	399	391	383	167	224
147	394	386	377	152	219
148	388	381	371	143	214
149	383	375	365	134	209
150	378	370	359	126	205
151	372	365	353	116	201
152	367	360	347	107	195
153	362	355	341	104	190
154	356	350	336	97	186
155	351	345	330	94	183
156	346	400	325	91	179
157	341	335	319	90	174
158	336	330	314	85	170
159	331	325	309	80	167
160	326	320	304	78	162
161	321	315	299	77	158
162	316	310	294	75	155
163	311	306	290	78	151
164	307	301	285	95	135
165	302	297	281	102	123

6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Συνοψίζοντας τα δύο πειράματα μπορούμε να κάνουμε τις παρακάτω παρατηρήσεις.

Για το δεύτερο πείραμα, από την εμφάνιση των πτητικών έως το τέλος της διαδικασίας έχουμε συνολικό χρόνο 130 λεπτά, ενώ το κύριο στάδιο της αφύγρανσης διήρκησε μόνο 35 λεπτά. Συγκριτικά με το πρώτο πείραμα είχαμε στάδιο αφύγρανσης 110 λεπτά και στάδιο πυρόλυσης περίπου 110 λεπτά. Καταφέραμε να αυξήσουμε το στάδιο της πυρόλυσης έχοντας χαμηλότερη θερμοκρασία πυρόλυσης στο δεύτερο πείραμα, αφού αφενώς μεν είχαμε 35% λιγότερα αρχικά ξύλα προς ανθρακοποίηση και αφετέρου περισσότερο χρόνο πυρόλυσης της τάξης του 15%. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων συγκεντρωτικά

Συγκεντρωτικός συγκριτικός πίνακας

	πείραμα 1ο	πείραμα 2ο
βάρος ξύλων (kgr)	30	18
βάρος ξυλάνθρακα (kgr)	6.5	6
βάρος ξυρού ξύλου (kgr)	19,5	15,3
αρχική υγρασία (εκτίμηση)	35	15
χρόνος αφύγρανσης (min)	110	35
χρόνος αφύγρανσης/Kgr ξύλου	3,67	1,94
χρόνος πυρόλυσης (min)	110	130
χρόνος πυρόλυσης/Kgr ξύλου	3,67	7,22
χρόνος πυρόλυσης/Kgr ξυρού ξύλου	5,64	8,50
Συνολική διάρκεια διεργασίας (min)	238	165
Συνολική διάρκεια διεργασίας/Kgr ξύλου	7,93	9,17
Συνολική διάρκεια διεργασίας/Kgr ξυρού ξύλου	12,21	10,78
απόδοση	0,33	0,39

Σχήμα 6.5 Συγκεντρωτικός συγκριτικός πίνακας

Γενικά παρατηρούμε ότι μειώνοντας την θερμοκρασία πυρόλυσης αυξάνουμε την απόδοση σε τελικό προϊόν πράγμα που μας είναι ήδη γνωστό από την βιβλιογραφία αλλά αυτό που δεν μπορούμε να ελέγξουμε, λόγω του ότι η συσκευή της Θερμικής ανάλυσης πλέον δεν λειτουργεί, είναι η σύσταση του ξυλοκάρβουνου πράγμα που μας ενδιαφέρει αφού μεγαλύτερη απόδοση σημαίνει περισσότερα βιοέλαια στο τελικό προϊόν και λιγότερος άνθρακας.

Μέρος 3 Μελέτη Ανάπτυξης – Προκαταρκτικός Σχεδιασμός

7. Πρωτογενής Μελέτη - Σχεδιασμός Μεταλλικού Κλιβάνου Πυρόλυσης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι δραστηριότητες πρωτογενής μελέτης που θα οδηγήσουν τελικά στο σημείο όπου πλέον θα μπορούμε να προτείνουμε τα πρώτα σχέδια για την κατασκευή του κλιβάνου ανθρακοποίησης ξύλου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι παράλληλη δηλαδή γίνεται η προκαταρκτική μοντελοποίηση και παράλληλα ο αρχικός σχεδιασμός. Σταδιακά, ο ακριβέστερος προσδιορισμός των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών οδηγεί σε λεπτομερέστερη μοντελοποίηση και συνεπώς σε περισσότερο αξιόπιστη διαστασιολόγηση.

Στην παρούσα φάση γίνονται οι βασικές εκτιμήσεις του απαιτούμενου χρόνου παραμονής του ξύλου στον κλιβανο, της ποσότητας ξυλείας που μπορεί να τροφοδοτηθεί ώστε να εξασφαλίζονται καλές συνθήκες ανακυκλοφορίας των καυσαερίων.

7.1 Μοντελοποίηση της Διεργασίας πυρόλυσης για κλίβανο άμεσης επαφής

Για να βρούμε τον χρόνο που απαιτείται να παραμείνει το ξύλο στον φούρνο έως ότου γίνει κάρβουνο απαιτείται πλήρη γνώση των διαδικασιών και των συνθηκών που επικρατούν κατά την πυρόλυση αλλά και ικανοποιητική γνώση της ροής των θερμών αερίων διαμέσου των ξύλων.

Επειδή τα παραπάνω είναι αδύνατον να τα γνωρίζουμε ή να τα υπολογίσουμε, κάνουμε την παρακάτω παραδοχή, Θεωρούμε ότι για να θερμανθεί ένα κομμάτι ξύλου μέχρι την καρδιά του ότι

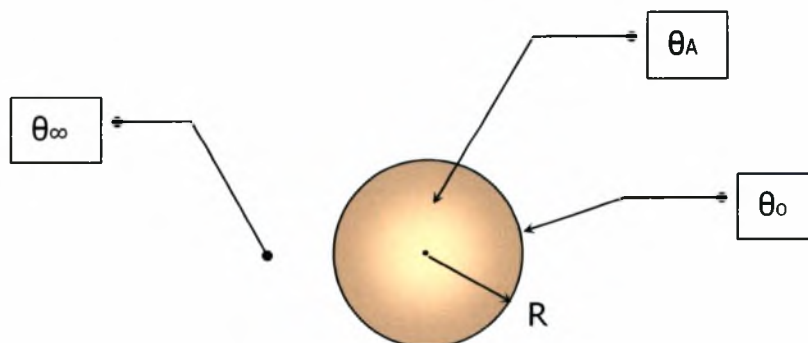
α. πρόκειται για έναν κύλινδρο με διάμετρο την μέση διάμετρο των ξύλων που επιθυμούμε να χρησιμοποιήσουμε για να παράγουμε κάρβουνα.

β. το πρόβλημα της αγωγής το αντιμετωπίζουμε μόνο στην εγκάρσια κατεύθυνση του κυλίνδρου δηλαδή σαν ένα κύλινδρο απείρου μήκους, γιατί αφενός μεν το σφάλμα που κάνουμε δεν είναι σημαντικό, από την άλλη όμως πλευρά απλοποιεί πολύ τους υπολογισμούς μας.

γ. θεωρούμε ότι κατά την μεταφορά θερμότητας σε ένα ξύλο στο εσωτερικό ενός κλιβάνου τον κύριο λόγο στην αντίσταση τον έχει το ίδιο το ξύλο και όχι η συναγωγή αφού ούτε τον συντελεστή συναγωγής τον γνωρίζουμε αλλά η εμπειρία μας δείχνει ότι είναι υψηλός ανάλογα με τον κλίβανο βέβαια (πολύ υψηλός σε έναν κλίβανο άμεσης επαφής του θερμαντικού μέσου με το ξύλο και αρκετά μεγάλος σε έναν κλίβανο έμμεσης επαφής του θερμαντικού μέσου με το ξύλο). Ενδεικτικό είναι ότι σε ένα δωμάτιο ενός σπιτιού όπου υπάρχει πλήρη ηρεμία του αέρα ο συντελεστής συναγωγής είναι $8\text{W/m}^2\text{K}$ (Κανονισμός θερμομόνωσης κτιρίων). Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι από την πειραματική διαδικασία είδαμε ότι η παροχή των παραπροϊόντων της πυρόλυσης ήταν αρκετά μεγάλη, γεγονός ενδεικτικό της κατάστασης που επικρατούσε στο εσωτερικό τύμπανο (υψηλή κινητικότητα των αερίων υψηλή πίεση μεγάλος συντελεστής συναγωγής)

δ. η παραπάνω παρατήρηση μας οδηγεί και στην τελευταία παραδοχή που είναι ότι η θερμοκρασία εντός του κλιβάνου είναι παντού ίδια και η μετάδοση θερμότητας στα ξύλα είναι παντού όμοια. Αυτό κυρίως για τους κλιβάνους έμμεσης επαφής όπου ουσιαστικά το θερμαντικό μέσω θερμαίνει την εξωτερική επιφάνεια του θαλάμου πυρόλυσης δίχως όμως να έρχεται σε άμεση επαφή με το υλικό προς πυρόλυση. Επειδή όμως οι διαστάσεις του κλιβάνου δεν είναι τόσο μεγάλες δεν προβλέπουμε ότι θα έχουμε πρώτα την θέρμανση της στοιβάδας που είναι σε επαφή με τα τοιχώματα του κλιβάνου και στη συνέχεια οι ποιο μέσα στοιβάδες όπως γίνεται στους χωμάτινους φούρνους μεγάλων διαστάσεων.

Εκ των παραπάνω έχουμε ότι η θερμική αντίσταση συναγωγής είναι αμελητέα άρα ο συντελεστής συναγωγής πολύ μεγάλος και η θερμοκρασία στην επιφάνεια είναι ίση με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου (θερμοκρασία θερμών αερίων) άρα $\theta_0 = \theta_\infty$ άρα και ο αριθμός Biot ($=\alpha X/\lambda$) τείνει στο άπειρο $Bi \sim \infty$ (γενικά αν ο αριθμός Bi είναι μεγαλύτερος από το 100 τότε θεωρούμε ότι τείνει στο άπειρο και κύριο λόγω στην μετάδοση θερμότητας έχει η αγωγή). Σχηματικά παρουσιάζεται παρακάτω μια τομή ενός κυλίνδρου (ξύλο) και οι θερμοκρασίες σε κάθε περιοχή. Όπου θ_A η αρχική θερμοκρασία σε όλο το ξύλο, θ_0 η θερμοκρασία στην επιφάνεια (φλούδα του ξύλου) και θ_∞ η θερμοκρασία στο περιβάλλον του ξύλου.



σχήμα 7.1 Περιοχές θερμοκρασιών

Προκειμένου ο παραγόμενος ξυλάνθρακας να είναι εμπορικά αποδεκτός πρέπει να έχει ποσοστό σε άνθρακα από 70% έως 80%. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία για να φτάσουμε σε τέτοια ποσοστά απαιτείται να αφαιρεθεί από το ξύλο μεγάλο ποσοστό των βιοελαίων του. Όπως είναι λογικό κατά την πυρόλυση αρχικά έχουμε την εξάτμιση των πιο ελαφριών (χαμηλού ειδικού βάρους πίσσες) και στη συνέχεια και όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία έχουμε την εξάτμιση και των πιο βαρέων βιοελαίων. Βάση της διεθνούς βιβλιογραφίας έχουμε σαν τελική θερμοκρασία πυρόλυσης 500°C έως 600°C.

Βάση του δεύτερου πειράματος που κάναμε θα ελέγξουμε την μέση θερμοκρασία στον άξονα του ξύλου. Μας ενδιαφέρει μόνο η φάση της πυρόλυσης με θερμοκρασία κλιβάνου άνω των 400°C οπότε και υπολογίζουμε την μέση θερμοκρασία στον κλιβάνο από την χρονική στιγμή που αγγίζει τους 400 °C μέχρι να ξαναφθάσει τους 400°C δηλ. για την χρονική περίοδο από το 48min μέχρι το 146min, και βρίσκουμε μέση θερμοκρασία κλιβάνου 513 °C (θ_{∞}) και χρονική διάρκεια 98 min ($t=98*60=5880s$). Θεωρούμε ότι όταν η θερμοκρασία του κλιβάνου έφτανε τους 400 °C η μέση θερμοκρασία στο ξύλο ήταν 300 °C (θ_A).

Γνωρίζουμε ότι για το ξύλο έχουμε: $\lambda=0,18$ W/mK, $\rho=800$ kg/m³, $c=1800$ J/kgK οπότε υπολογίζουμε τον συντελεστή θερμικής διαχυτότητας α

$$\alpha = \lambda / c \rho = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$$

Σύμφωνα με την θεωρία για χρονικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις θέρμανση ή ψύξης όπου έχουμε μια ακαριαία μεταβολή στις οριακές συνθήκες προκαλή την μετάβαση από μια οριακή κατάσταση ισορροπίας σε μια τελική κατάσταση ισορροπίας. Πιο συγκεκριμένα σε ένα σώμα με ένα σταθερό θερμοκρασιακό πεδίο λόγω απότομης θέρμανσης ή ψύξης εμφανίζεται μια απεριοδική μεταβολή του πεδίου προς μια νέα κατάσταση ισορροπίας. Έτσι λοιπόν θεωρούμε το ξύλο ως ένα κύλινδρο απείρου μήκους αφού το μήκος του είναι σημαντικά μεγαλύτερο της διαμέτρου του με διάμετρο 2R. Στο πείραμά μας τα ξύλα είχαν διαφορετική διάμετρο βέβαια, αλλά σαν μέση τιμή μπορούμε να θεωρήσουμε τα 100mm.

Έχοντας λοιπόν τον αριθμό Biot ($=aX/\lambda$) να τείνει στο άπειρο ($Bi \sim \infty$) σημαίνει πρακτικά ότι και η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ξύλου είναι ίση με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποία βρίσκονται άρα $\theta_0 = \theta_\infty$.

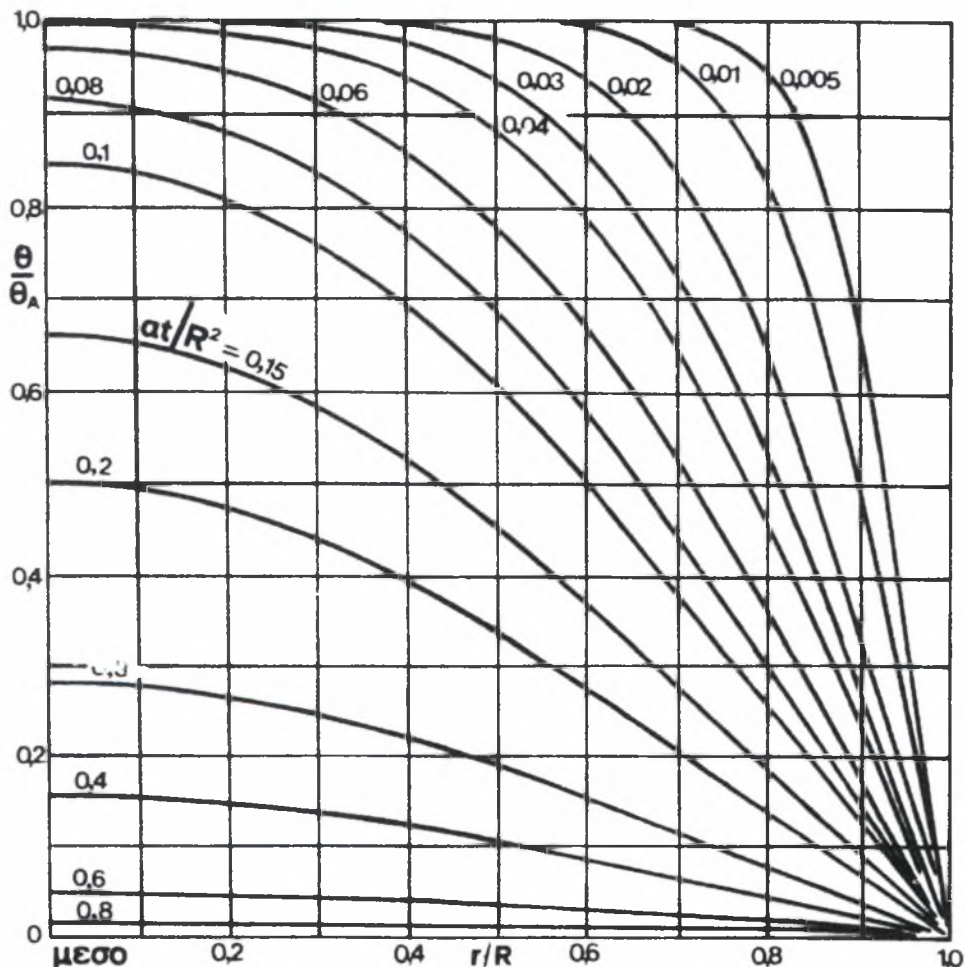
Υπολογίζουμε λοιπόν τον αδιάστατο αριθμό Fourier (Fo)

$$Fo = a t / R^2 = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s} * 5880\text{s} / 0,05^2\text{m} = 0,294$$

Από το διάγραμμα τις σχετικής θεωρίας (Πασπαλάς, Μετάδοση Θερμότητας κεφ. 4, εικ. 4.11) που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα βρίσκουμε ότι για

$$r/R = 0 \text{ (στον άξονα του κυλίνδρου)}$$

$$\theta/\theta_A = 0,287$$



σχήμα 7.2 Μεταβολή της θερμοκρασίας σε κύλινδρο

οπότε αφού $\Theta/\Theta_A = (\theta - \theta_{\infty}) / (\theta_A - \theta_{\infty})$ έχουμε

$$0,287 = (\theta - \theta_{\infty}) / (\theta_A - \theta_{\infty}) \rightarrow 0,287 = (\theta - 513) / (300 - 513)$$

άρα τελικά η μέση θερμοκρασία στον άξονα του ξύλου είναι

$$\theta = 452 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Αν η μέση διάμετρος των ξύλων ήταν 150mm τότε η μέση θερμοκρασία στον άξονά τους για τις ίδιες συνθήκες και παραδοχές θα ήταν πολύ μικρότερη της τάξης των **360 °C**. Αυτό είναι και ενδεικτικό του πόσο μεγάλη σημασία για την διαδικασία της πυρόλυσης έχει η γεωμετρία των ξύλων που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν. Προκειμένου λοιπόν να ολοκληρωθεί η διαδικασία της πυρόλυσης σε ένα ξύλο μεγαλύτερης διαμέτρου θα χρειασθεί περισσότερος χρόνος.

Βάση λοιπόν και των πειραμάτων που έγιναν στη θερμική ανάλυση για θερμοκρασία πυρόλυσης 450°C και χρόνο 5880s το εναπομείναν ποσοστό μάζας όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5 για ξύλο είδους δρυ είναι περίπου 30% ενώ από το σχήμα 5.6 που μας δίνει το εναπομείναν ποσοστό μάζας βάση του χρόνου πυρόλυσης του ρυθμού πυρόλυσης 10 °C/min και της θερμοκρασίας πυρόλυσης βρίσκουμε ότι για θερμοκρασία πυρόλυσης 450 °C και χρόνο πυρόλυσης που υπολογίζουμε στον μισό που διήρκεσε η πειραματική διαδικασία αφού ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας στο πείραμα είναι περίπου 5-6 °C/min έχουμε λοιπόν χρόνο περίπου 3000s βλέπουμε ότι το εναπομείναν ποσοστό μάζας είναι περίπου 28%. (σημείωση αφορά άλλο είδος ξύλου (οξιά) αλλά είναι ενδεικτικό μέγεθος). Σύμφωνα με το πείραμα έχουμε απόδοση δηλαδή

$$\text{μάζα ξυλοκάρβουνου} / \text{αρχική μάζα ξυλείας} = 0,39$$

Αυτό το νούμερο βέβαια δεν είναι άμεσα συγκρίσιμο αλλά είναι ενδεικτικό αφού δεν γνωρίζουμε την αρχική υγρασία του ξύλου αλλά ούτε και είναι σταθερή η τελική θερμοκρασία πυρόλυσης.

Έχοντας υπόψη μας όλα τα παραπάνω, στον κλίβανο που θα σχεδιάσουμε θα θεωρήσουμε ότι

- Θερμοκρασία πυρόλυσης 500 °C
- Θερμοκρασία κλιβάνου $\theta_{\infty} = 560$ °C
- Αρχική Θερμοκρασία ξύλου $\theta_A = 160$ °C (έχει προηγηθεί αφύγρανση)
- Μέση διάμετρο ξύλων $2R = 200$ mm
- Συντελεστή θερμικής διαχυτότητας $a = \lambda / c \rho = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$
- Αριθμός Biot, $Bi \sim \infty$ (βάση των παραδοχών που έχουν προηγηθεί αφού κύριο λόγω στην μετάδοση θερμότητας έχει η αντίσταση στο εσωτερικό του ξύλου και όχι η συναγωγή)

Για να βρούμε το χρόνο που απαιτείται προκειμένου η θερμοκρασία στον άξονα του ξύλου $\theta_{(r=0)}$ να αποκτήσει της επιθυμητή θερμοκρασία που είναι αυτή της πυρόλυσης που ορίσαμε παραπάνω πρέπει να

$$\text{υπολογίσουμε το } \Theta/\Theta_A = (\theta - \theta_{\infty}) / (\theta_A - \theta_{\infty}) = (500-560) / (160-560)=0,15$$

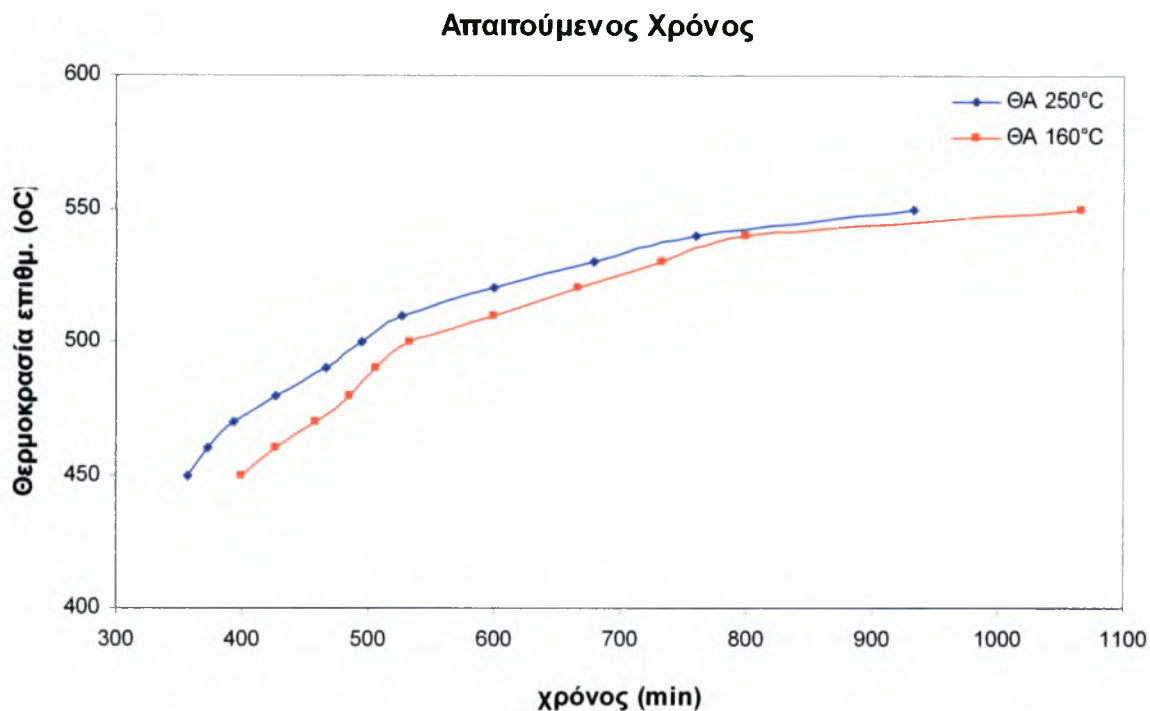
$$\text{άρα } \Theta/\Theta_A = 0,15$$

από το διάγραμμα του σχήματος 7.2 βρίσκουμε στο ($r=0$ δηλ. $r/R=0$) ότι

$$Fo = a t / R^2 = 0,4 \quad \text{άρα} \quad t = 32000\text{s} \quad \text{ή} \quad 533\text{min}$$

Συνοψίζοντας αν έχουμε ένα κομμάτι ξύλου (κυλινδρικό με διάμετρο 20cm) με αρχική θερμοκρασία 160 °C (παντού όμοια) και αυτό βρεθεί απότομα στο εσωτερικό ενός κλιβάνου θερμοκρασίας 560°C, για να θερμανθεί ο άξονάς του στην θερμοκρασία των 500 °C βαθμών χρειάζεται χρόνος 533min ενώ στην εξωτερική του επιφάνεια (φλούδα) η θερμοκρασία θα είναι ίδια με αυτή του κλιβάνου δηλαδή 560°C.

Κάνοντας τους ίδιους υπολογισμούς αλλάζοντας όμως την επιθυμητή θερμοκρασία στον άξονα παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα του σχήματος όπου παρουσιάζεται ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου το ξύλο στον άξονά του, να αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία, έχοντας στη μια περίπτωση αρχική θερμοκρασία 160 °C και στην άλλη 250 °C.



σχήμα 7.3 Διάγραμμα απαιτούμενου χρόνου θέρμανσης άξονα

Επιθυμητή Θερμοκρασία άξονα (°C)	Αρχική θερμοκρασία	
	Θ _A 250°C χρόνος (min)	Θ _A 160°C χρόνος (min)
450	357	400
460	373	427
470	393	459
480	427	485
490	467	507
500	496	533
510	527	600
520	600	667
530	680	733
540	760	800
550	933	1067

σχήμα 7.4 πίνακας απαιτούμενου χρόνου θέρμανσης άξονα

Παρατηρώντας τα παραπάνω βλέπουμε ότι κατορθώνοντας να έχουμε αρχική θερμοκρασία υψηλότερη κατά 90°C βλέπουμε μια μείωση της τάξης του 10 με 15% στο απαιτούμενο χρόνο προκειμένου η θερμοκρασία στον άξονα να γίνει η επιθυμητή σε τιμές κοντά στους 450 - 500 °C που θεωρούμε ότι είναι ιδανικές για την διαδικασία της πυρόλυσης που εξετάζουμε.

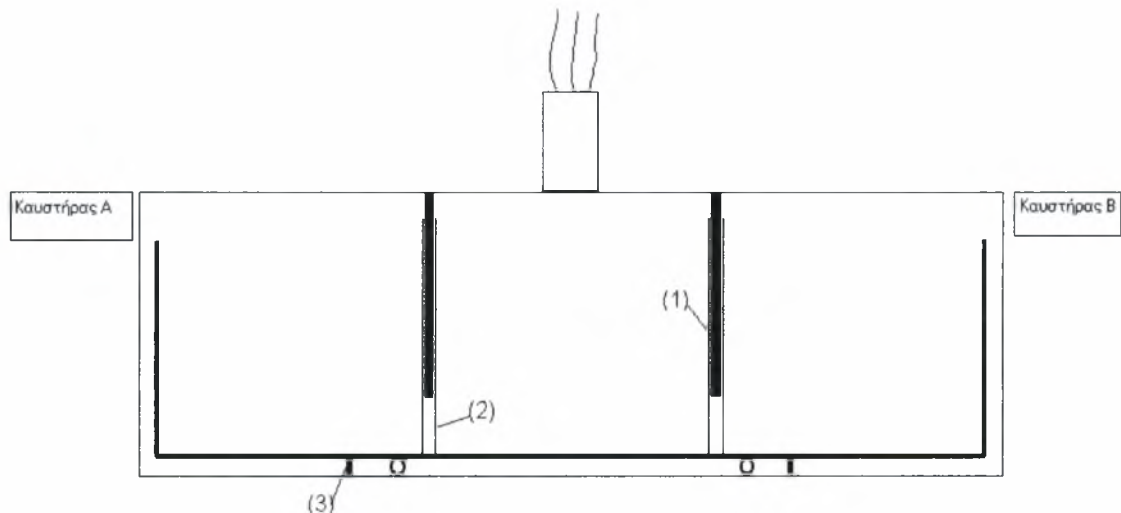
7.2 Σχεδιασμός Κλιβάνου

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τόσο οι προκαταρκτικές ιδέες για τη μορφή και τη λειτουργία του κλιβάνου όσο και μία βελτιωμένη λύση, με βάση την οποία θα γίνουν τα τελικά μηχανολογικά σχέδια.

7.2.1 Αρχικές Ιδέες

Αρχική ιδέα είναι ο κλιβανός να είναι άμεσης επαφής του θερμαντικού μέσου με τα ξύλα προς ανθρακοποίηση οπότε και καταλήγουμε σε ένα πλαίσιο σχεδιασμού του κλιβάνου πυρόλυσης με δυο πιθανές προτάσεις της μορφής και των χαρακτηριστικών του, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο πρώτος προτεινόμενος φούρνος είναι αυτός που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.5. Εξωτερικά φαίνεται να είναι ένα ορθογώνιο κουτί. Οι διαστάσεις του θα είναι 3m x 1m x 1m. Και αυτό γιατί θα κατασκευαστεί ως πρότυπο. Αν κατά τη λειτουργία του πάρουμε τα ζητούμενα αποτελέσματα (άνθρακας καλής ποιότητας) θα είναι εύκολο να γίνει ένας μεγαλύτερος κλιβανός που να ικανοποιεί μεγαλύτερες, βιομηχανικές εφαρμογές.



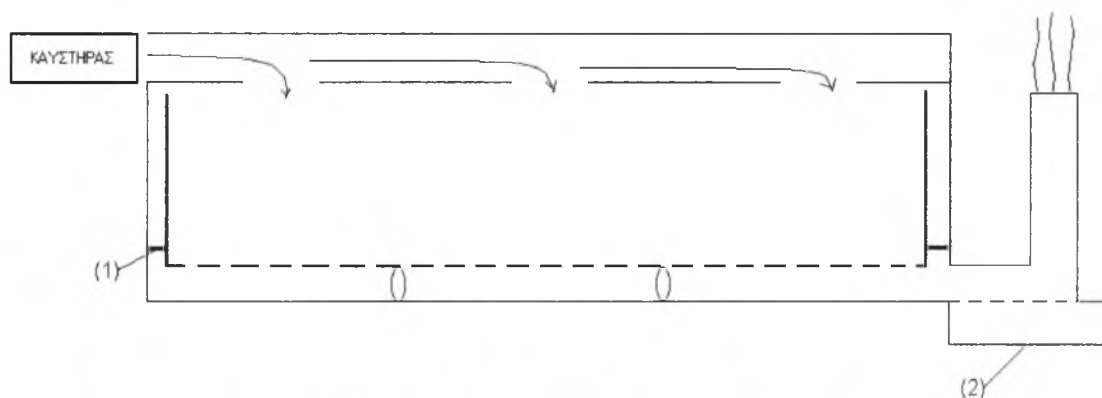
Σχήμα 7.5 Σχεδιάγραμμα Α προτεινόμενου φούρνου πυρόλυσης

Όπως προαναφέρθηκε, ο φούρνος θα έχει τη μορφή ενός ορθογώνιου κουτιού. Το ξύλο θα τοποθετείται σε καρότσι που θα υπάρχει μέσα στο

φούρνο. Το καρότσι θα μπορεί να βγει από τον φούρνο για την φάση της φόρτωσης. Για τον σκοπό αυτό θα υπάρχει πόρτα στο μπροστά μέρος (αυτό που φαίνεται στο σχήμα) η οποία θα ανοίγει προς τα κάτω. Αυτό θα γίνει, πρώτο λόγω χώρου, είναι πολύ πιο βολικό να υπάρχει ένας κενός χώρος μπροστά από τον φούρνο ενός μέτρου από ότι τριών μέτρων και δεύτερον διότι τοποθετώντας ράγες στη μέσα πλευρά της πόρτας θα είναι πιο εύκολη και ασφαλής η έξοδος του καροτσιού από τον φούρνο για την φόρτωση του ξύλου και την εκφόρτωση του κάρβουνου. Δεξιά και αριστερά από το φούρνο έχουμε δυο καυστήρες. Τα αέρια της καύσης στους καυστήρες θα εισέρχονται στον χώρο του φούρνου. Ο χώρος του φούρνου θα χωρίζεται σε τρία μέρη από δύο διαχωριστικά (1) από συμπαγές υλικό, τα οποία θα είναι σταθερά κολλημένα στο πίσω και το πάνω μέρος του φούρνου. Ο λόγος για την ύπαρξη αυτών των διαχωριστικών είναι να μπορέσουμε να οδηγήσουμε τα αέρια ώστε να σαρώνουν όλο τον όγκο των ξύλων για να έχουμε ομοιόμορφη σχετικά πυρόλυση. Ειδικότερα, τα αέρια θα εισέρχονται από τα πλαϊνά, από το πάνω μέρος, θα καλύπτουν όλο το πρώτο διαμέρισμα (και από τις δύο πλευρές) και από τα ανοίγματα που υπάρχουν στο κάτω μέρος των διαχωριστικών θα περνάνε στο κεντρικό διαμέρισμά και θα φεύγουν από την καμινάδα στην κορυφή του. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε ομοιόμορφη, καλή ποιότητα στα δύο ακριανά διαμερίσματα και λίγο κατώτερη στο κεντρικό. Αυτό μπορούμε να το αντιμετωπίσουμε μειώνοντας τον όγκο του κεντρικού διαμερίσματος σε σχέση με τα άλλα δύο, μέχρι βέβαια σημείο στο οποίο δεν θα έχουν μεγαλώσει τα ακριανά τόσο ώστε να μένουν περιοχές ξύλου που δεν θα έρχονται σε επαφή με τα αέρια της καύσης. Αντίστοιχα πάνω στο καρότσι θα υπάρχουν διπλά διαχωριστικά (2) μέσα στα οποία θα περνάνε αυτά του κουτιού ώστε να μην παρουσιάζεται πρόβλημα μετά την φόρτωση του καροτσιού, όπου τα ξύλα θα εμπόδιζαν τα χωρίσματα. Τα διαχωριστικά του καροτσιού θα είναι πλέγμα, με διαστάσεις τρύπας αρκετά μεγάλες, αλλά σαφώς μικρότερες από την ελάχιστη διάμετρο των ξύλων, ώστε να μην δημιουργούν πτώση πίεσης και δυσκολεύουν τα αέρια να περάσουν αλλά και να μην περνάνε και τα ξύλα. Για τη διατήρηση της πορείας των αερίων, το καρότσι θα είναι φτιαγμένο από συμπαγές υλικό. Επίσης, σε δύο σημεία στο κάτω μέρος του

καροτσιού, θα τοποθετήσουμε δύο ελάσματα (3) τα οποία και αυτά θα εμποδίζουν τα αέρια να κινούνται εκτός του καροτσιού.

Στην συνέχεια θα μελετήσουμε μια παραλλαγή του προηγούμενου φούρνου. Παρουσιάζεται στο σχήμα 7.6. Και στη δεύτερη περίπτωση ο κλιβανός θα είναι ένα ορθογώνιο κουτί διαστάσεων 3m x 1m x 1m. Το ξύλο και πάλι θα τοποθετείται σε καρότσι και η ιδέα των ραγών στην πόρτα θα είναι η ίδια. Στην περίπτωση όμως αυτή, θα έχουμε έναν μόνο καυστήρα στο πάνω πλαϊνό μέρος. Τα αέρια της καύσης θα μπαίνουν σε σωλήνα ο οποίος θα



Σχήμα 7.6 Σχεδιάγραμμα Β προτεινόμενου φούρνου πυρόλυσης

έρχεται σε επαφή με το πάνω μέρος του φούρνου. Από τρία ανοίγματα τα καυσαέρια θα μπαίνουν στον κύριο χώρο του κλιβάνου. Θα διαχέονται σε όλο τον όγκο των ξύλων και θα φεύγουν προς την καπνοδόχο από το κάτω μέρος. Για το λόγο αυτό, το καρότσι θα είναι φτιαγμένο από πλέγμα στο κάτω μέρος και από συμπαγές υλικό στα πλάγια. Και σε αυτή την περίπτωση έχουμε τα ελάσματα (1) τα οποία δεν επιτρέπουν στα αέρια να κυκλοφορούν εκτός της περιοχής που θέλουμε. Στην έξοδο των καυσαερίων προς την καπνοδόχο θα υπάρχει ειδικός αγωγός συλλογής και απομάκρυνσης υγρών αποβλήτων της πυρόλυσης (2).

Τέλος, και για τις δύο προτάσεις, υπάρχει η προοπτική να προσαρμοσθεί μετά την καπνοδόχο σύστημα καύσης των καυσαερίων, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας για την αφύγρανση της επόμενης ποσότητας ξυλείας που θα τοποθετηθεί στον φούρνο για ανθράκωση.

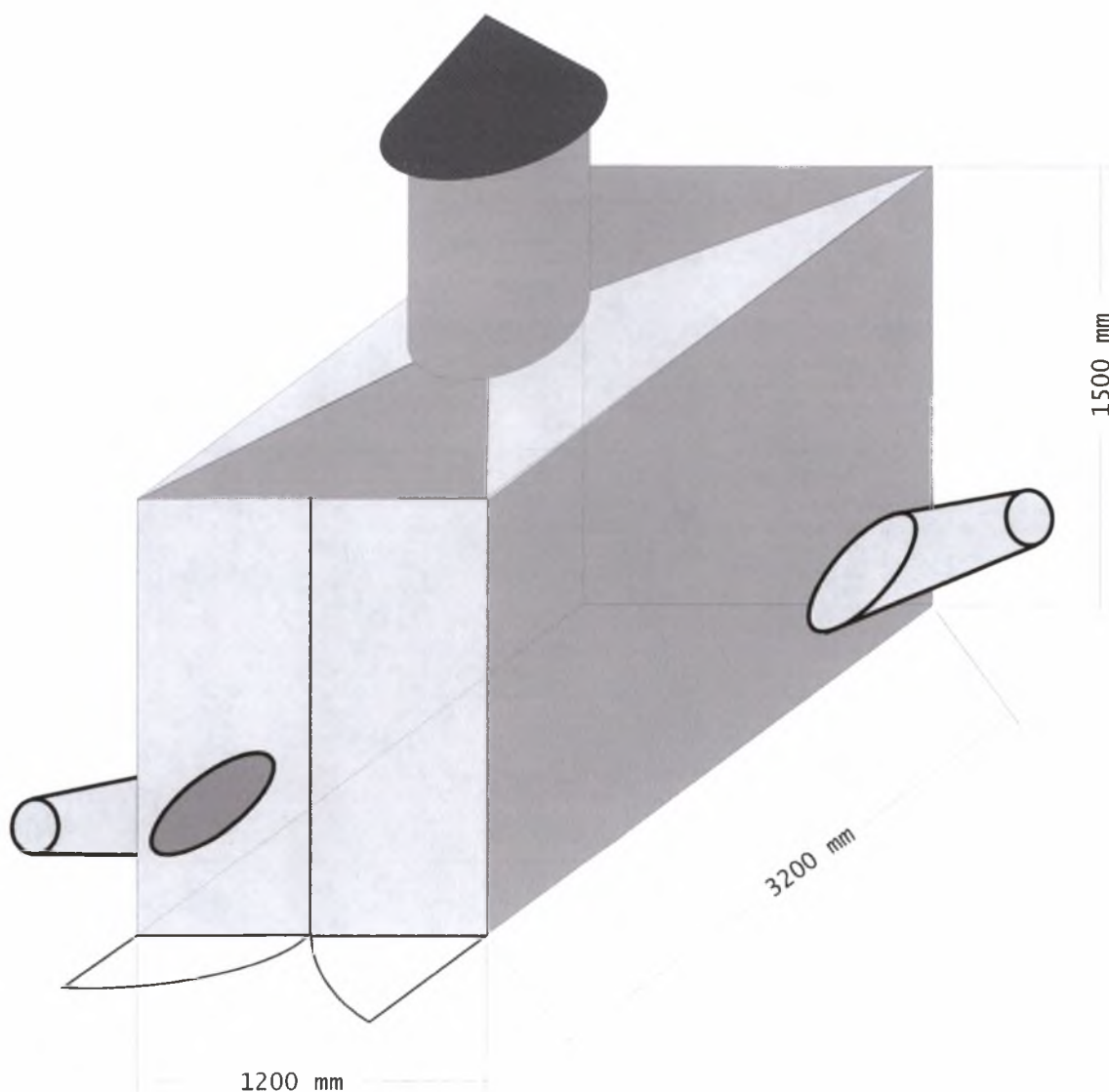
7.2.2 Βελτιωμένη μορφή Κλιβάνου

Σε δεύτερο στάδιο, περνάμε σε μια βελτιστοποιημένη μορφή του κλιβάνου η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην τελική. Η μορφή αυτή φαίνεται στα σχήματα 7.7(όψη) και 7.8 (τομή κάτοψης).

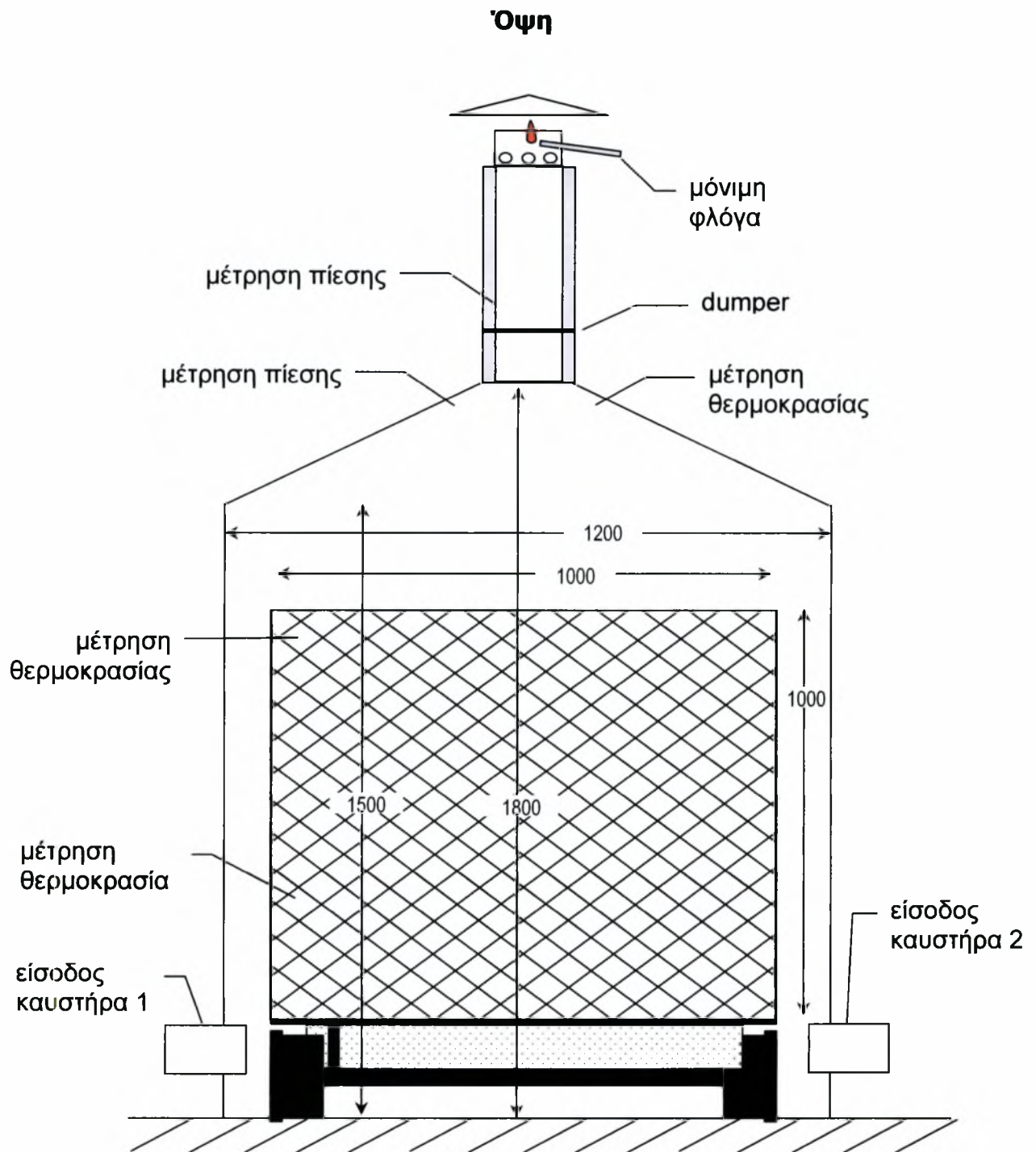
Στα σχήματα παρατηρούμε ότι ο κλιβανος είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο οι διαστάσεις του οποίου δίνονται σε mm. Αποτελείται από το εξωτερικό κέλυφος και ένα καρότσι από μεταλλικό πλέγμα στο οποίο θα τοποθετούνται τα ξύλα και το οποίο θα έχει την δυνατότητα να μετακινείται έξω από το φούρνο. Για τον λόγο αυτό στην μια πλευρά του κλιβάνου (1200x1500mm) θα υπάρχει πόρτα η οποία θα ανοίγει και θα προσαρμόζονται ράγες για την έξοδο του καροτσιού. Στη βάση του φούρνου και σε σημεία αντιδιαμετρικά για την καλύτερη διανομή των καυσαερίων, θα τοποθετηθούν δύο καυστήρες, τα καυσαέρια των οποίων θα οδηγούνται μέσω φλογοσωληνών στο εσωτερικό του φούρνου και θα έρχονται σε άμεση επαφή με τα ξύλα. Στο πάνω μέρος και στο κέντρο του φούρνου θα υπάρχει καμινάδα για να απομακρύνονται τα καυσαέρια. Στην καμινάδα θα προσαρμοσθεί dumpreg το οποίο θα ανοίγει και θα κλείνει ανάλογα με την διαφορά πίεσης στο εσωτερικό του κλιβάνου και τη βάση της καμινάδας. Για τον λόγο αυτό θα τοποθετηθούν μανόμετρα τόσο στο εσωτερικό του κλιβάνου όσο και στην καμινάδα. Επίσης για τον καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας κρίνεται αναγκαία και η τοποθέτηση θερμομέτρων σε διάφορα σημεία του κυρίως χώρου του κλιβάνου καθώς και στους φλογοσωλήνες.

Σε έναν μελλοντικό σχεδιασμό προβλέπεται η δημιουργία ενός θαλάμου ξήρανσης που θα λειτουργεί με τα καύσιμα παραπροϊόντα, μειώνοντας αισθητά τις ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας. Αυτό θα γίνει οδεύοντας τα καυσαέρια σε έναν καυστήρα και καίγοντάς τα αφού όπως είδαμε και στην πειραματική διαδικασία είναι σημαντική η ποσότητα των πτητικών παραπροϊόντων ης ανθρακοποίησης και μπορούν να μας δώσουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Βέβαια η καύση όλου του όγκου των καυσαερίων επειδή περιέχει και αρκετή ποσότητα CO₂ που είναι ανενεργό θα μειώσει την απόδοση των πτητικών αλλά αυτό μένει να εξετασθεί προκειμένου να προχωρήσουμε

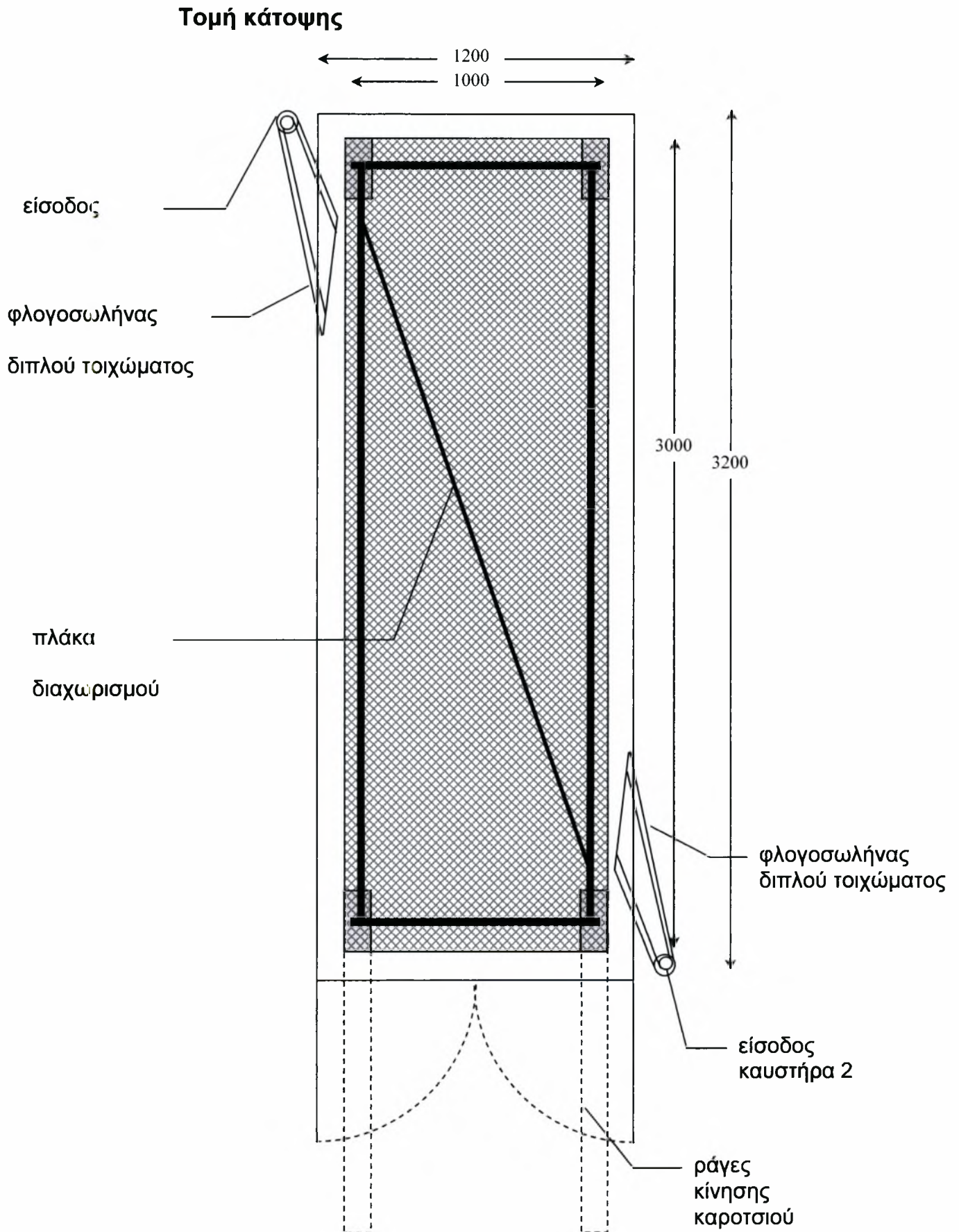
στην κατασκευή κλιβάνου έμμεσης επαφή όπου πλέον είναι πολύ εύκολο να συλλέξουμε και να κάψουμε μόνο τα πτητικά παραπροϊόντα της διαδικασίας. Σε περίπτωση που τα καυσαέρια μαζί με τα πτητικά παραπροϊόντα της πυρόλυσης αποφασισθεί σε πρώτη φάση να αφεθούν ελεύθερα στο περιβάλλον τότε είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας φλόγας στην άκρη της καμινάδας που θα καίει όλα τα δηλητηριώδη αέρια παραπροϊόντα της ανθρακοποίησης όπως πχ το CO κα.



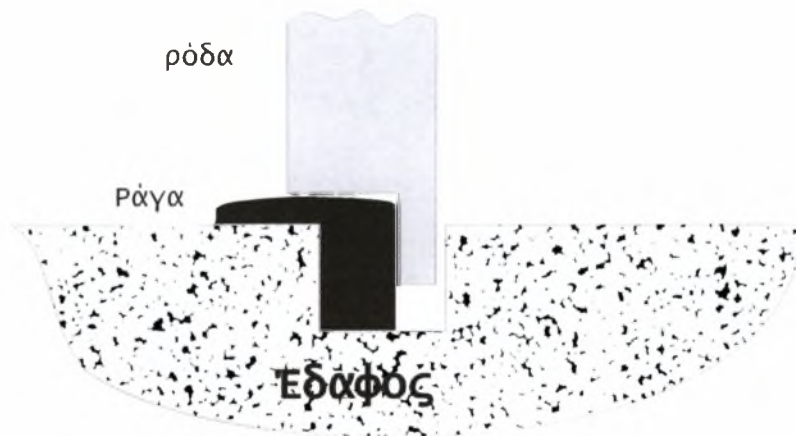
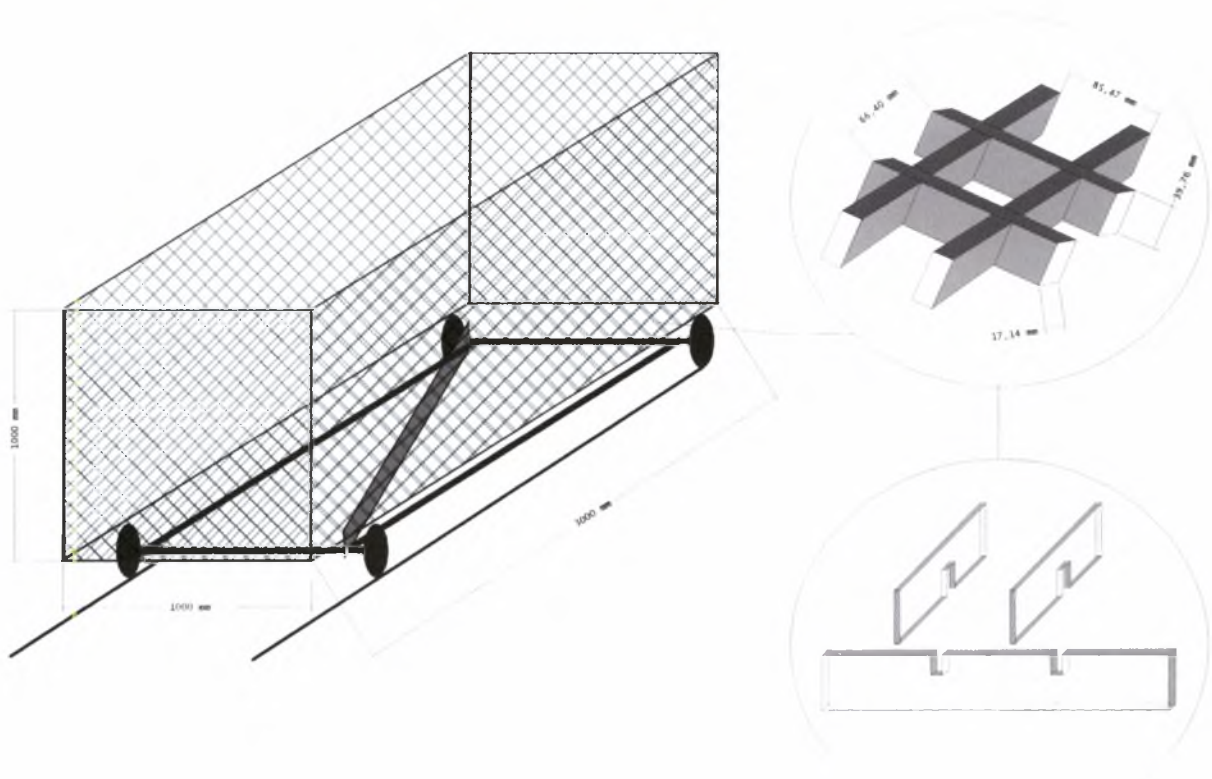
Σχήμα 7.7 Γενική εξωτερική άποψη κλιβάνου



Σχήμα 7.8 Όψη του βελτιωμένου κλιβάνου άμεσης επαφής



Σχήμα 7.9 Τομή κάτοψης



Σχήμα 7.10 Σχεδιαστικές λεπτομέρειες Καλαθιού & ράγας

Στη συνέχεια δίνονται κάποιες κατασκευαστικές λεπτομέρειες του κλιβάνου, απόρροια της μοντελοποίησης που έγινε.

Το υλικό κατασκευής του κλιβάνου θα είναι ανοξειδωτος χάλυβας, πυράντοχος για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 800°C, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα αλλοίωσης του εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που θα αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης.

Επίσης, όλες οι συγκολλήσεις θα γίνουν από πιστοποιημένο συγκολλητή και θα είναι είτε αυτογενείς είτε με ηλεκτρόδιο. Στην δεύτερη περίπτωση, απαραίτητη προϋπόθεση είναι το ηλεκτρόδιο να είναι από το ίδιο ακριβώς υλικό με την υπόλοιπη κατασκευή. Σε αντίθετη περίπτωση τα φορτία που θα αναπτύσσονται λόγω των διαφορετικών θερμικών διαστολών είναι πιθανό να οδηγήσουν σε αστοχία της κατασκευής.

Συγχρόνως, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στον υπολογισμό των τροχών του καρτσιού αλλά και των εδράνων. Λόγω του αυξημένου βάρους της κατασκευής αλλά και των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, τα φορτία που θα δέχονται τόσο οι τροχοί όσο και τα έδρανα θα είναι πολύ μεγάλα. Για το σκοπό αυτό, ο σχεδιασμός τους, πρέπει εκτός από τη μεγάλη διάρκεια ζωής να προβλέπει και την εύκολη αντικατάστασή τους. Ένα άλλο μέρος της κλιβάνου το οποίο θα δέχεται πολύ μεγάλα φορτία λόγω και της κατασκευής του (μεταλλικό πλέγμα), είναι το σασί του καρτσιού. Και αυτό λοιπόν πρέπει να υπολογιστεί έτσι ώστε να αντέχει στις θερμοκρασιακές αλλαγές δίχως να κάμπτεται μόνιμα.

Ένα άλλο θέμα το οποίο πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα είναι η στεγανότητα του κλιβάνου στο σημείο που θα κλείνει η πόρτα. Για αυτό το λόγο πρέπει οι ράγες στις οποίες θα κινείται το καρότσι να μην εμποδίζουν το κλείσιμο της πόρτας ακόμα και όταν έχουν διασταλεί λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Στην αντίθετη περίπτωση θα έχουμε εισροή αέρα γεγονός το οποίο θα επιφέρει το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα της καύσης του ξύλου.

Για μόνωση θα χρησιμοποιηθεί κάποιο πάπλωμα πετροβάμβακα ή κεραμοβάμβακα υψηλής πυκνότητας με δεδομένου ότι απαιτούμαι χαμηλό συντελεστή συναγωγής (πάχους 50mm και $\lambda = 0,15\text{W/mK}$). Όλη η μόνωση θα

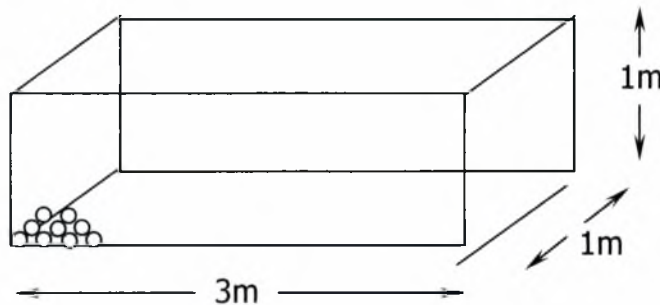
πρέπει να είναι εύκολο να τοποθετηθεί και να απομακρυνθεί από τον κλίβανο. Έτσι κατά την διάρκεια της πυρόλυσης θα εφαρμόζεται στο φούρνο με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας, ενώ και κατά την διαδικασία της ψύξης να αφαιρείται προκειμένου να πετύχουμε ταχύτερη ψύξη.

Όσο αφορά την κατασκευή της καμινάδας, πρέπει να είναι διπλού τοιχώματος, με μόνωση ενδιάμεσα ώστε να μην αποτελεί ούτε αυτή δίοδο θερμικών απωλειών, κατασκευασμένη και αυτή από πυράντοχο χάλυβα αφού τα καυσαέρια που θα περνάνε θα είναι σε εξίσου υψηλές θερμοκρασίες. Ιδιαίτερη προσοχή επίσης πρέπει να δοθεί και στην κατασκευή του dumper που θα πρέπει να λειτουργεί εύρυθμα με σερβομηχανισμό σε υψηλές θερμοκρασίες ίσως και άνω των 600°C

Επειδή η φλόγα των καυστήρων έχει κάποιο μήκος και υπάρχει πιθανότητα να πάρουν φωτιά και τα ξύλα, προβλέπεται να μην τοποθετηθούν οι καυστήρες κατευθείαν επάνω στον φούρνο αλλά να παρεμβαίνει ένας φλογοσωλήνας ικανού μήκους μέσα στον οποίο θα συντηρείται η φλόγα. Ο φλογοσωλήνας αυτός θα έχει διπλό τοίχωμα και θα είναι και αυτός κατασκευασμένος από πυράντοχο χάλυβα με την προοπτική ότι θα φθείρεται μόνο το εσωτερικό τοίχωμα (μάλλον διάτρητο) του οποίου η αντικατάσταση θα πρέπει να είναι εύκολα εφικτή.

7.2.3 Υπολογισμός ποσότητας Ξυλείας

Το καλάθι που θα τοποθετούνται τα ξύλα έχει διαστάσεις 3m x 1m x 1m όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Υπολογίζεται ότι τα ξύλα έχουν μέση διάμετρο 200mm άρα τοποθετημένα με ένα κενό ανάμεσά τους θα έχουμε σε μια σειρά 13 τεμάχια και στην αμέσως επόμενη 12 τεμάχια στο ύψος θα τοποθετηθούν 6 σειρές και αν θεωρήσουμε ότι τα ξύλα έχουν μέσο μήκος 300mm τότε θα έχουμε συνολικά τρία ξύλα σε κάθε θέση. Συνοψίζοντας τα παραπάνω έχουμε 75 θέσεις με τρία (3) ξύλα μέσου μήκους 300mm. Άρα ο όγκος της ξυλείας που θα τοποθετείτε σε κάθε παρτίδα υπολογίζεται στα:

$$V = 75 \cdot 3 \cdot 0,3 \cdot \pi \cdot 0,1^2 = 2,12 \text{ m}^3.$$

Άρα στα 3 m³ που έχει όγκο το καλάθι έχουμε τοποθετήσει 2,12 m³ δηλαδή κάλυψη του χώρου κατά 71% επομένως το διάκενο για την κίνηση των καυσαερίων είναι το υπόλοιπο 29% του χώρου νούμερο αρκετά ικανοποιητικό.

7.2.4 Εναλλακτική πρόταση – Κλίβανος έμμεσης επαφής

Το σημαντικότερο μειονέκτημα του κλιβάνου άμεσης επαφής είναι η αδυναμία να εκμεταλλευτούμε με τον βέλτιστο τρόπο τα παραπροϊόντα της πυρόλυσης, τα οποία όπως μας απέδειξαν τα πειράματά μας είναι σημαντική πηγή ενέργειας. Τα πτητικά παραπροϊόντα είναι πλούσια αρχικά σε καύσιμα αέρια όπως CO και στη συνέχεια οι πίσσες ελαφριές αλλά και βαριές είναι πλούσιες σε θερμογόνα δύναμη αρκετή όχι μόνο να ολοκληρώσει την διαδικασία της πυρόλυσης αλλά και να βοηθήσει στην αφύγρανση της επόμενης ποσότητας ξυλείας που θα εισέλθει στον κλίβανο ανθρακοποίησης. Και στα δύο πειράματα είδαμε ότι η καύση των πτητικών από ένα σημείο και μετά όχι μόνο συντηρούσε αλλά αύξανε την θερμοκρασία στην συσκευή κατά πολύ που αναγκαστήκαμε να αφήσουμε κάποια ποσότητα των παραγόμενων πτητικών ελεύθερη στο περιβάλλον ή να την ρίξουμε άκαυστη στον κλίβανο. Όλα τα παραπάνω συνάγουν στο συμπέρασμα θα πρέπει να ερευνήσουμε περαιτέρω και το θέμα δημιουργίας κλιβάνου έμμεσης επαφής.

Όσον αφορά τον υπολογισμό των θερμοκρασιών και των χρόνων τα δεδομένα που μέχρι τώρα επεξεργαστήκαμε και παρουσιάσαμε ισχύουν αφού κατά την μεταφορά θερμότητας σε ένα ξύλο στο εσωτερικό ενός κλιβάνου τον κύριο λόγο στην αντίσταση τον έχει το ίδιο το ξύλο και όχι η συναγωγή αφού ο συντελεστής συναγωγής "δείχνει" ότι είναι υψηλός ανάλογα με τον κλίβανο βέβαια (πολύ υψηλός σε έναν κλίβανο άμεσης επαφής του θερμαντικού μέσου με το ξύλο και αρκετά μεγάλος σε έναν κλίβανο έμμεσης επαφής του θερμαντικού μέσου με το ξύλο). Να σημειωθεί ότι από την πειραματική διαδικασία είδαμε ότι η παροχή των παραπροϊόντων της πυρόλυσης ήταν αρκετά μεγάλη, και είχαν υψηλή θερμοκρασία γεγονός ενδεικτικό της κατάστασης που επικρατούσε στο εσωτερικό τύμπανο (υψηλή κινητικότητα των αερίων, υψηλή πίεση, μεγάλος συντελεστής συναγωγής). Η παραπάνω παρατήρηση μας οδηγεί και στην τελευταία επισήμανση ότι η θερμοκρασία εντός του κλιβάνου είναι παντού ίδια και η μετάδοση θερμότητας στα ξύλα είναι παντού όμοια. Ενώ λοιπόν ουσιαστικά το θερμαντικό μέσω

θερμαίνει την εξωτερική επιφάνεια του θαλάμου πυρόλυσης δίχως όμως να έρχεται σε άμεση επαφή με το υλικό προς πυρόλυση, τα αέρια παραπροϊόντα όμως της πυρόλυσης που συγκεντρώνονται στον εσωτερικό κλιβανο θερμαίνονται από τα τοιχώματα και λόγω της υψηλής θερμοκρασία έχουν μεγάλη κινητικότητα άρα μεγάλο συντελεστή συναγωγής οδηγώντας μας στο συμπέρασμα ότι πρακτικά η θερμοκρασία στο διάκενο των ξύλων όπου και υπάρχουν τα αέρια είναι παντού ίδια. Αν οι διαστάσεις του κλιβάνου λοιπόν δεν είναι απαγορευτικά μεγάλες μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι δεν θα έχουμε πρώτα την θέρμανση της στοιβάδας που είναι σε επαφή με τα τοιχώματα του κλιβάνου και στη συνέχεια οι ποιο μέσα στοιβάδες όπως γίνεται στους χωμάτινους φούρνους μεγάλων διαστάσεων. Ουσιαστικά η διαφορά των δύο κλιβάνων θα είναι ότι το αέριο περιβάλλον των ξύλων προς πυρόλυση στην περίπτωση του κλιβάνου άμεσης επαφής αποκτά σχεδόν αμέσως την θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου, των καυσαερίων που παράγουν οι καυστήρες αφού ουσιαστικά αντικαθιστούν τα καυσαέρια τον αέρα που προϋπήρχε, ενώ στην περίπτωση του κλιβάνου έμμεσης επαφής θα χρειασθεί ένα χρονικό διάστημα για να θερμάνει το θερμαντικό μέσω τα τοιχώματα του κλιβάνου και εν συνεχεία αυτά να μεταδώσουν της θερμότητα στο εσωτερικό περιβάλλον. Προκειμένου όμως να πετύχουμε μείωση αυτού του χρόνου πρέπει να αφενός μεν να επιλέξουμε το υλικό του εσωτερικού κλιβάνου να έχει υψηλό συντελεστή αγωγής (που τα μέταλλα έχουν) και αφετέρου να ενισχύσουμε την συναγωγή στο εξωτερικό και εσωτερικό των τοιχωμάτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την διαμόρφωση κατάλληλων πτερυγίων εσωτερικών και εξωτερικών (όπως οι ψήκτρες των αερόψυκτων κινητήρων). Το γεγονός ότι δεν έχουμε άμεση επαφή του θερμαντικού μέσου με το προϊόν προς πυρόλυση μας δίνει το πλεονέκτημα επιπροσθέτως ότι μπορούμε τον εσωτερικό κλιβανο να τον σφραγίζουμε αεροστεγώς με συνέπεια να μπορούμε να τον φέρουμε σε άμεση επαφή με το περιβάλλον ή με ένα ψυχρό ρεύμα αέρα προκειμένου να τον ψύξουμε μετά την πυρόλυση και έτσι να μειώσουμε ουσιαστικά και τον χρονικό κύκλο όλης της διαδικασίας, δίχως συνάμα να χρειασθεί να ψύξουμε και τον εξωτερικό θάλαμο αλλά πολύ απλά εξαγοντας τον εσωτερικό κλιβανο και εισάγοντας στη θέση του έναν άλλο για να συνεχίσουμε την διαδικασία.

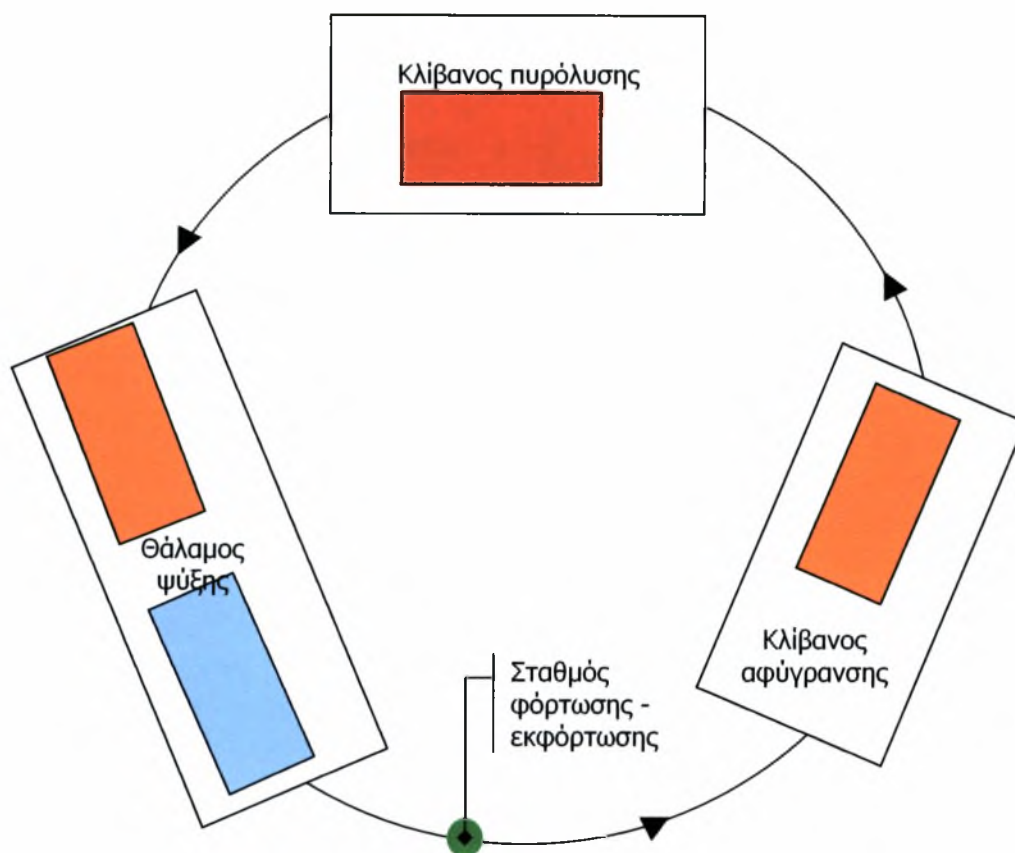
Έτσι λοιπόν η διαδικασία θα γίνεται σε τρία στάδια.

α. στάδιο αφύγρανσης σε κλίβανο θερμοκρασίας όχι υψηλότερης των 350°C

β. στάδιο πυρόλυσης σε κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας περίπου 600°C

γ. στάδιο ψύξης σε θάλαμο με ατμοσφαιρική θερμοκρασία

Αναλυτικά στο α' στάδιο για την αφύγρανση θα χρησιμοποιούνται τα καυσαέρια αλλά και παράλληλα η περίσσεια των πτητικών που θα καίγονται προκειμένου να θερμάνουν τα ξύλα σε θερμοκρασία άνω των 250 °C για γιεύχουμε τέλεια αφύγρανση. Στο δεύτερο στάδιο η διαδικασία της πυρόλυσης απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες που αρχικά θα επιτυγχάνονται με την καύση φυσικού αερίου και στην συνέχεια αφού θα αρχίζει η παραγωγή των πτητικών μέρος αυτά θα καίγονται προκειμένου να συνεχισθεί και να ολοκληρωθεί η διαδικασία στο θερμοκρασιακό εύρος που υπολογίσαμε αρχικά. Στο τρίτο στάδιο της ψύξης, ο εσωτερικός κλίβανος θα εξέρχεται του κλιβάνου πυρόλυσης και θα εισέρχεται σε θάλαμο όπου με την χρήση ατμοσφαιρικού αέρα θα επιτυγχάνεται η ψύξη του. Πρακτικά θα υπάρχουν μεγάλες φτερωτές που θα ωθούν μεγάλες ποσότητες ατμοσφαιρικού αέρα στον κλίβανο για να ψυχθεί. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κυκλική διαδικασία της πυρόλυσης σε κλίβανο έμμεσης επαφής.



σχήμα 7.11 σχηματικά η κυκλική διαδικασία πυρόλυσης σε κλίβανο έμμεσης επαφής

Πρακτικά λοιπόν θα έχουμε τρεις θαλάμους διαφορετικών θερμοκρασιών και τρεις κινητούς θαλάμους που στο εσωτερικό τους θα τοποθετούνται τα ξύλα που θέλουμε να πυρολύσουμε και θα ασφαλίζουν αεροστεγώς. Και τα τρία στάδια θα δουλεύουν συγχρόνως με αποτέλεσμα ο κύκλος της διαδικασίας να έχει διάρκεια ίση με την διάρκεια του αργότερου από τα τρία στάδια. Σημαντικό σημείο εδώ είναι να δούμε στην πράξη πιο στάδιο αργεί περισσότερο με σκοπό να επιτύχουμε το βραδύτερο στάδιο να μην είναι αυτό της ψύξης γιατί τότε θα έχουμε πτώση στη θερμοκρασία του θαλάμου πυρόλυσης που και είναι ο σημαντικότερος θάλαμος μιας και η θερμοκρασία του είναι η υψηλότερη. Από τα πειράματα είδαμε πως το στάδιο της πυρόλυσης έχει μεγαλύτερη διάρκεια από αυτό της αφύγρανσης άρα δεν είναι δυνατόν να καθυστερεί η διαδικασία της αφύγρανσης περισσότερο από την πυρόλυση. Πιο συγκεκριμένα όσο ο λόγος

$$\Theta / \Theta_A = (\theta - \theta_{\infty}) / (\theta_A - \theta_{\infty})$$

μεγαλώνει, τόσο μειώνεται ο αριθμός $Fo (= at/R^2)$ και άρα ο απαιτούμενος χρόνος εφόσον τα a και R παραμένουν σταθερά.

Άρα για το στάδιο της αφύγρανσης έχουμε $\theta_A = 20^\circ\text{C}$, $\theta_{\infty} = 300^\circ\text{C}$ (θαλάμου) και επιθυμητή θερμοκρασία ξύλων προκειμένου να επιτύχουμε την αφύγρανσή τους $\theta = 250^\circ\text{C}$ άρα

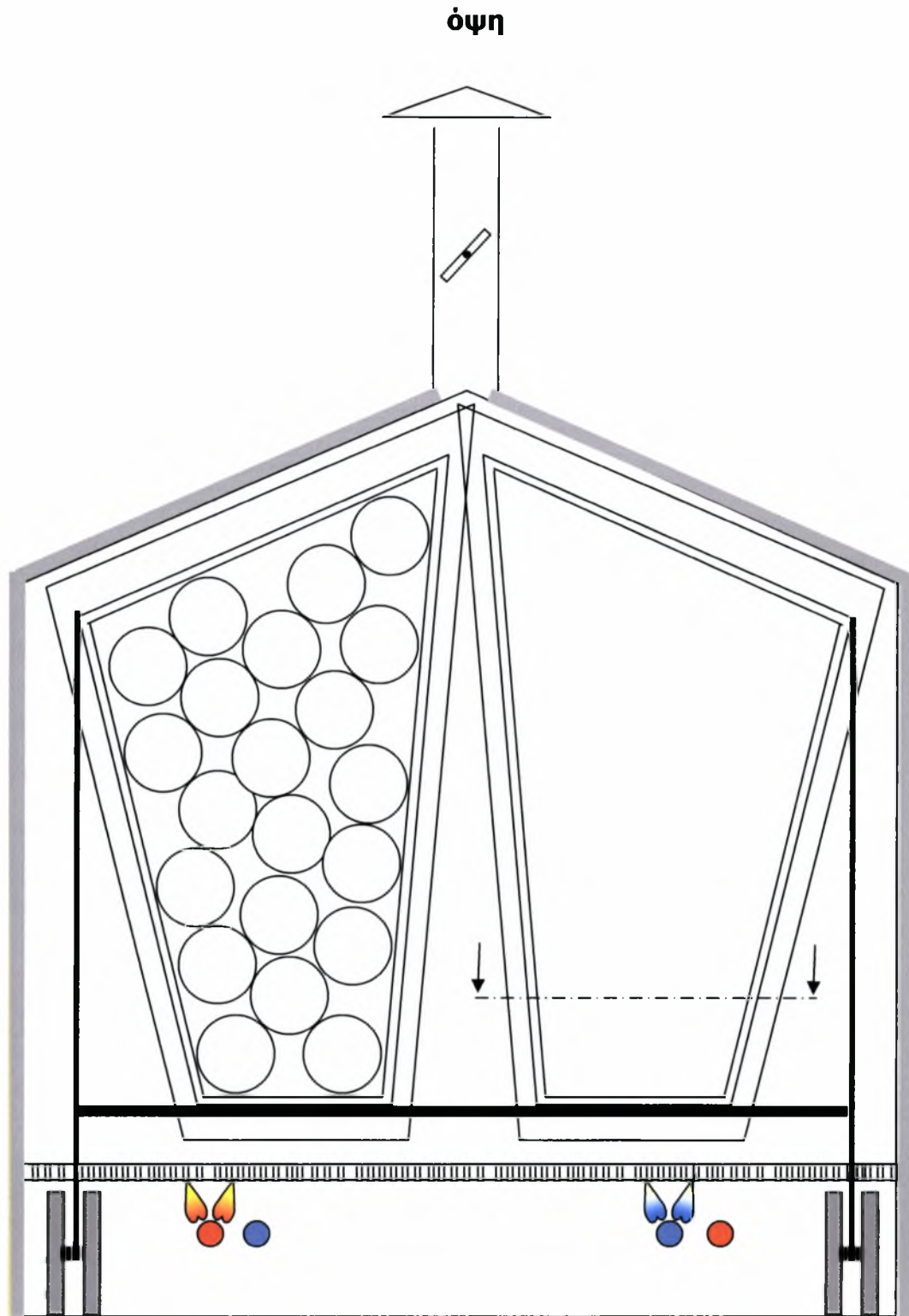
$$\Theta / \Theta_A = 0,178$$

Ενώ για το στάδιο της πυρόλυσης έχουμε $\theta_A = 250^\circ\text{C}$, $\theta_{\infty} = 560^\circ\text{C}$ (θαλάμου) και επιθυμητή θερμοκρασία ξύλων προκειμένου να επιτύχουμε την πυρόλυσή τους $\theta = 520^\circ\text{C}$ άρα


$$\Theta / \Theta_A = 0,129$$

Το στάδιο της ψύξης όμως έχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά από 520°C πρέπει να πέσουμε στους 40°C διαφορά πολύ σημαντική που σίγουρα θα απαιτήσει χρονική διάρκεια μεγαλύτερη από τα άλλα δύο στάδια και επιπροσθέτως ο συντελεστής συναγωγής στον θάλαμο των ξυλοκάρβουνων θα είναι μικρότερος κατά την ψύξη από αυτόν της θέρμανσης αφού πλέον δεν έχουμε παραγωγή αερίων παραπροϊόντων οπότε δεν έχουμε μεγάλη πίεση στον θάλαμο άρα συμπεραίνουμε ότι και εσωτερικός συντελεστής συναγωγής θα είναι μικρότερος. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να έχουμε μεγάλη καθυστέρηση ολόκληρου του κύκλου στο σημείο της ψύξης. Η λύση στο πρόβλημα μπορεί να έλθει εάν στην όλη διαδικασία προσθέσουμε άλλον έναν κλίβανο πυρόλυσης και διπλασιάσουμε τον χώρο του θαλάμου ψύξης προκειμένου να χωράει δύο θαλάμους με σκοπό ο κάθε κινητός θάλαμος πυρόλυσης να έχει χρόνο παραμονής στο θάλαμο ψύξης διπλάσιο του χρονικού κύκλου της διαδικασίας. (βλ. σχήμα 7.11)

Στα παρακάτω σχέδια παρουσιάζονται τα προσχέδια του θαλάμου πυρόλυσης καθώς και του κινητού θαλάμου με τη διαμόρφωση των πτερυγίων.

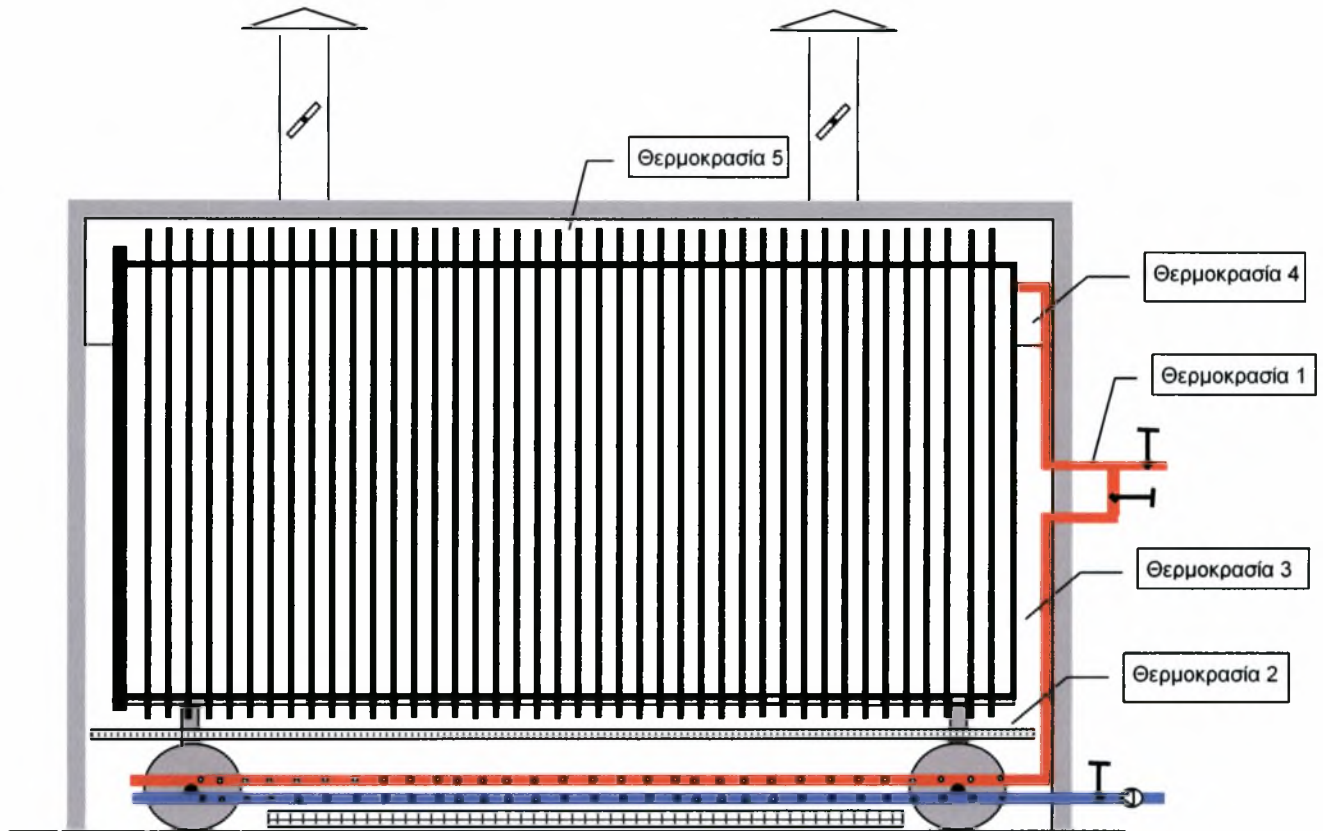


σχήμα 7.12 Νέος κλιβανός έμμεσης επαφής με διπλό εσωτ. θάλαμο (όψη)

καίει φυσικό αέριο 

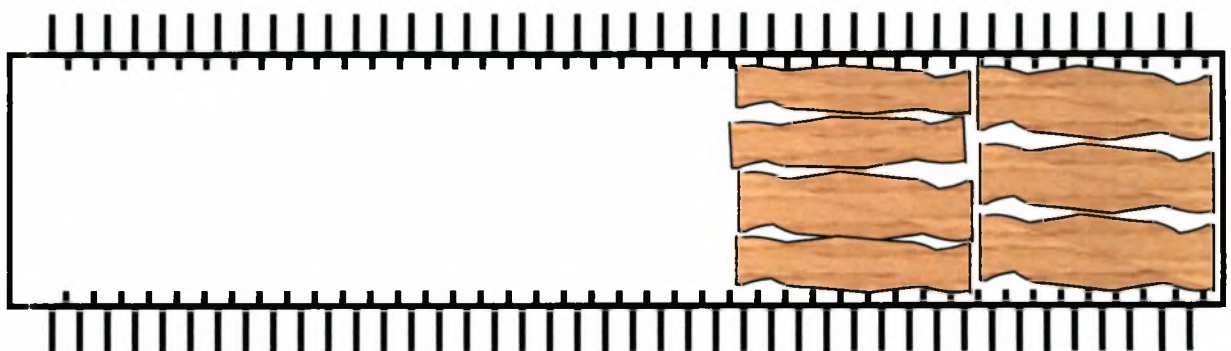
και αέρια παραπροϊόντα πυρόλυσης 

πλάγια όψη

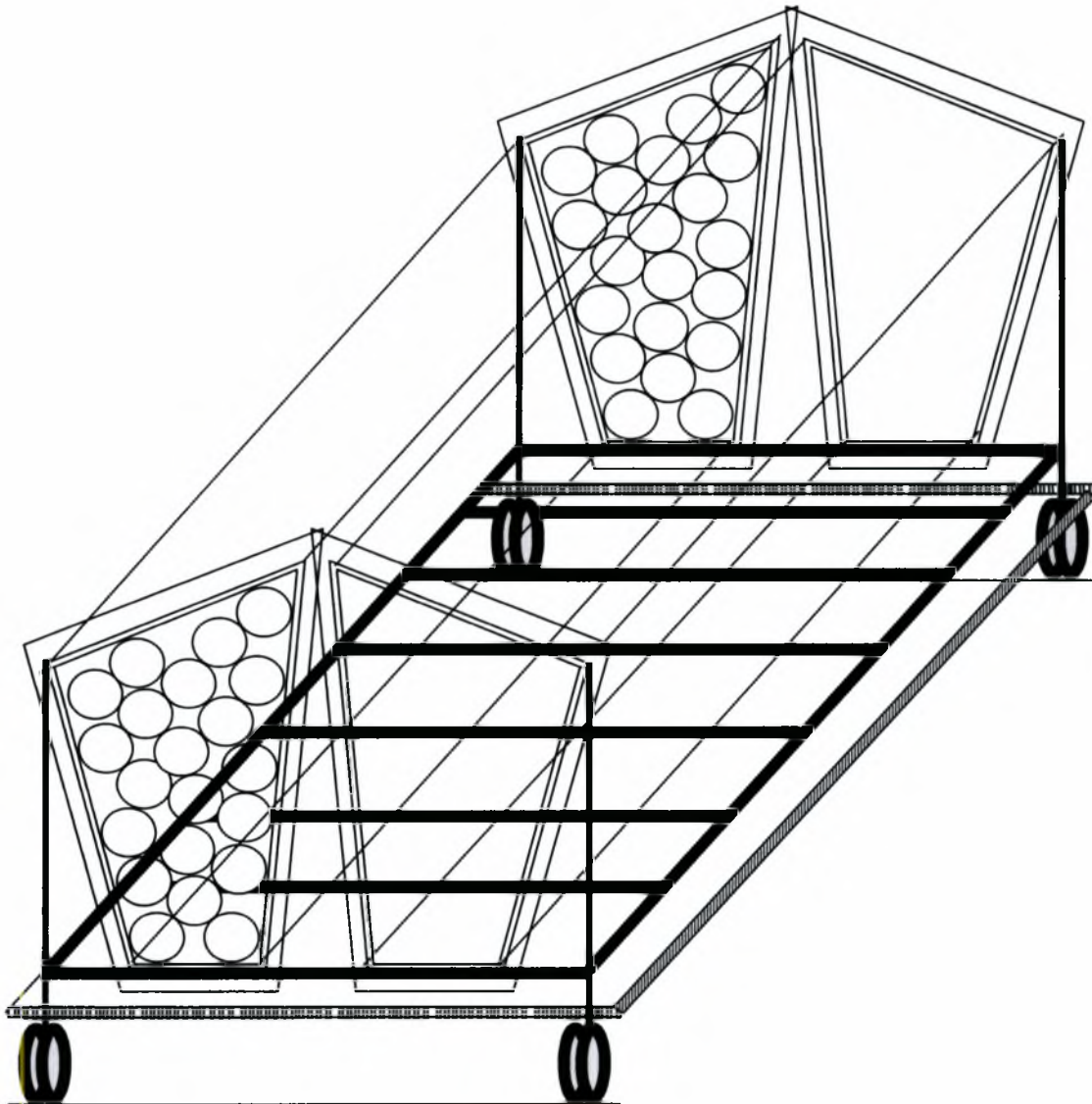


Τομή εσωτερικού θαλάμου

Η γεωμετρία των πτερυγίων εσωτερικά και εξωτερικά του εσωτερικού θαλάμου.



σχήμα 7.13 Νέος κλίβανος έμμεσης επαφής (πλάγια όψη) και τομή του εσωτερικού θαλάμου



σχήμα 7.14 Προοπτικό σχέδιο διπλού κινητού θαλάμου ξύλων

8. Συμπεράσματα

- Ανάλογα της τελικής Θερμοκρασίας Πυρόλυσης έχουμε και διαφορετική σύσταση στο παραγόμενο ξυλοκάρβουνο, υψηλή τελική θερμοκρασία μας δίνει ξυλοκάρβουνο με μεγάλο ποσοστό C και χαμηλό ποσοστό βιοελαίων και το αντίθετο.
- Από τα πειράματα στην Θερμική Ανάλυση συμπεραίνουμε ότι στους 270°C έχουμε την απομάκρυνση των αερίων από την δομή του ξύλου ενώ μετά τους 350 °C αρχίζουν να εξατμίζονται τα πρώτα και πιο "ελαφριά" βιοέλαια. Με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε την εξάτμιση και των υπολοίπων πιο "βαρέων" βιοελαίων.
- Από τα πειράματα στην ιδιοκατασκευασμένη συσκευή ανθρακοποίησης διπλού τυμπάνου είδαμε ότι τελικά τα παραγόμενα "παραπροϊόντα" της πυρόλυσης (καύσιμα αέρια και βιοέλαια) μετά το στάδιο της αφύγρανσης, είναι περισσότερα από αυτά που απαιτούνται για να συντηρηθεί και να ολοκληρωθεί η διαδικασία της ανθρακοποίησης.
- Το χαμηλό ποσοστό υγρασίας στα ξύλα αρχικά, μειώνει την συνολική διάρκεια της διαδικασίας και αυξάνει την απόδοση της διαδικασίας
- Ιδανικότερος τρόπος παραγωγής ξυλάνθρακα είναι η διαδικασία των τριών σταδίων σε κλίβανο έμμεσης επαφής. Πλεονεκτήματα ο μειωμένος χρόνος ολοκλήρωσης του κύκλου της διαδικασίας και η βέλτιστη εκμετάλλευση της ενέργειας των καυσαερίων αλλά και των πτητικών παραπροϊόντων της πυρόλυσης.
- Κλειδί στην διαδικασία της ανθρακοποίησης είναι ο επαρκής και ορθός έλεγχος της τελικής θερμοκρασίας πυρόλυσης πράγμα που σημαίνει ότι στην συσκευή που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε πρέπει μπορούμε να μετρήσουμε και να ελέγξουμε με ικανοποιητική ακρίβεια την τελική θερμοκρασία πυρόλυσης.

Παρατήρηση

Τα πειραματικά αποτελέσματα θα είχαν μέγιστη αξία εάν μπορούσαμε να μετρήσουμε και την χημική σύσταση του ξυλάνθρακα σε C, βιοέλαια, υγρασία, στάχτη κ.α. συστατικά του, πράγμα όμως που δεν ήταν εφικτό αφού η συσκευή της θερμικής ανάλυσης χάλασε και δεν είναι δυνατή η επισκευή της. Γνωρίζοντας την σύσταση του παραγόμενου ξυλάνθρακα θα μπορούσαμε να πειραματισθούμε με την τελική θερμοκρασία πυρόλυσης και να βρούμε την ιδανική θερμοκρασία που θα μας έδινε τον καλύτερο από άποψη ποιότητας αλλά και απόδοσης ξυλάνθρακα.

9. Βιβλιογραφία

F.A.O.[1] Industrial charcoal making, 1985

F.A.O.[2] Simple technologies for charcoal making, 1983

Κων/νος Πασπαλάς, Μετάδοση Θερμότητας, 1993

Κων/νος Πασπαλάς, Καυστήρες – Λέβητες, 2001

VDI – Warmeatlas. 4. 1984

Khalik M. Sabil and Shiraz M Aris(Universiti Teknologi Petronas) & Jalal A. Aziz and Mashitah M. Don(Engineering Campus, Universiti Sains Malaysia),
Temperature Profiles in the Carbonisation Chamber of JMK Kiln, Paper #722

Kazuhiro Mochidzuki, Lloyd S. Paredes, and Michael J. Antal, Jr., Hawaii
Natural Energy Institute, School of Ocean and Earth Science and Technology,
University of Hawaii at Manoa, Flash Carbonization of Biomass, 2002

Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal
making in Kenya and Brazil, 2001, by

David M. Pennise & Kirk R. Smith, Environmental Health Sciences, University
of California, Berkeley, California, USA.

Jacob P. Kithinji, Department of Chemistry, University of Nairobi, Nairobi,
Kenya.

Maria Emilia Rezende, Biocarbo Industria e Comércio Ltd., Belo Horizonte,
Brazil.

Tulio Jardim Raad, Departamento de Engenharia Mecanica, Universidade
Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.

Junfeng Zhang, Environmental and Occupational Health Sciences Institute,
Piscataway, New Jersey, USA.

and Chengwei Fan, Graduate Program in Environmental Sciences, Rutgers
University, New Brunswick, New Jersey, USA.

