

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΣΕΡΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΤΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ»

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΤΣΑΝΕΒΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΜΠΙΝΙΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΣΕΡΡΕΣ 2006

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται η έννοια της βιομάζας, ακόμα αναφέρονται οι πηγές βιομάζας και το ενεργειακό περιεχόμενο της. Επίσης γίνεται σύγκριση μερικών τυπικών χαρακτηριστικών καυσίμων βιομάζας με πετρέλαιο και άνθρακα ακόμα, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομάζας καθώς και οι μέθοδοι μετατροπής της. Επίσης γίνεται διερέυνηση βιομάζας στην περιοχή της κεντρικής Μακεδονίας ώστε να προκύψει η παραγώμενη βιομάζα φυτικής σύνθεσης ανά νόμο και είδος στο χρονικό διάστημα 2000 έως 2004. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι τύποι εστιών καύσης που χρησιμοποιούνται για διαφορετικές βιομάζες, επίσης περιγράφεται η διαδικασία του θερμοδυναμικού υπολογισμού για έναν λέβητα με στόχο τον προσδιορισμό της σύστασης του καυσαερίου και την ένυρεση των επιφανειών του λέβητα. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία του υπολογισμού αντοχής των στοιχείων του λέβητα ατμού υπερπίεσης ώστε τελικά να προσδιορισθούν τα πάχη των διάφορων στοιχείων του. Τέλος στο τέταρτο κέφαλαιο γίνεται η εφαρμογή του θερμοδυναμικού υπολογισμού και του υπολογισμού αντοχής για έναν λέβητα ατμού υπερπίεσης χρησιμοποιώντας ως καύσιμο βιομάζα.

Περιεχόμενα

| | |
|--|------------|
| Κεφάλαιο 1 | 3 |
| Εισαγωγή | 3 |
| Διερέυνηση της παραγόμενης βιομάζας στην Κεντρική Μακεδονία | 3 |
| Κεφάλαιο 2 | 11 |
| Καύση | 11 |
| Θερμοδυναμικός υπολογισμός | 19 |
| 2.1 Υπολογισμός της παροχής του καυσίμου | 19 |
| 2.2 Υπολογισμός της παροχής του αέρα καύσης | 20 |
| 2.3 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων | 21 |
| 2.4 Υπολογισμός της παροχής των καυσαερίων | 23 |
| 2.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον φλογοθάλαμο | 23 |
| 2.6 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στον φλογοθάλαμο | 28 |
| 2.7 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στις δέσμες αυλών | 35 |
| 2.8 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών του ατμολέβητα | 40 |
| Κεφάλαιο 3 | 41 |
| Υπολογισμός αντοχής στοιχείων ατμολέβητα | 41 |
| 3.1 Θερμοκρασία υπολογισμού | 41 |
| 3.2 Υπολογισμός πάχους κυλινδρικού περιβλήματος | 41 |
| 3.3 Υπολογισμός πάχους σωλήνων που υπόκεινται σε εξωτερική υπερτίεση | 43 |
| 3.5. Υπολογισμός πάχους θυρίδας επιθεώρησης που υπόκειται σε εξωτερική υπερτίεση | 45 |
| 3.6 Υπολογισμός πάχους κυκλικών καλυμμάτων | 46 |
| 3.8 Υπολογισμός ανοιγμάτων στο κυλινδρικό περίβλημα | 47 |
| 3.9 Υπολογισμός εμβαδού ορθογωνικής διατομής αντιστηρίξεων | 53 |
| 3.10 Υπολογισμός διαμέτρου αμφιδετών | 54 |
| Κεφάλαιο 4 | 55 |
| Εφαρμογή | 55 |
| 4.1 Υπολογισμός της παροχής του καυσίμου | 55 |
| 4.2 Υπολογισμός της παροχής του αέρα καύσης | 56 |
| 4.3 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων | 56 |
| 4.4 Υπολογισμός της παροχής των καυσαερίων | 59 |
| 4.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον φλογοθάλαμο | 59 |
| 4.6 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στην πρώτη δέσμη σωλήνων | 62 |
| 4.7 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στην δεύτερη δέσμη σωλήνων | 67 |
| 4.8 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών του ατμολέβητα | 72 |
| 4.9 Θερμοκρασία υπολογισμού | 73 |
| 4.10 Υπολογισμός πάχους κυλινδρικού περιβλήματος | 73 |
| 4.11 Υπολογισμός πάχους σωλήνων που υπόκεινται σε εξωτερική υπερτίεση | 74 |
| 4.12 Υπολογισμός πάχους κυκλικών καλυμμάτων | 75 |
| 4.13 Υπολογισμός ανοιγμάτων στο κυλινδρικό περίβλημα | 76 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 | 83 |
| Χαρακτηριστικές στοιχειομετρίες για συγκεκριμένους τύπους βιομάζας | 83 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 | 102 |
| Ορισμοί – Εννοιες – Συμβολισμοί | 102 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3 | 104 |
| Σχέδια ατμολέβητα | 104 |
| Βιβλιογραφία | 109 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο όρος βιομάζα ή βιόμαζα δεν είναι ακριβής χημικός όρος. Πρόκειται για υλικά φυτικής ή ζωικής προέλευσης που αντιμετωπίζονται σαν ενεργειακοί πόροι. Η βιομάζα δεν είναι νέα πηγή ενέργειας. Είναι ο πρώτος ενεργειακός πόρος που χρησιμοποιήσε ο άνθρωπος και ίσως ο σημαντικότερος μέχρι την βιομηχανική επανάσταση. Μια σημαντική ιδιομορφία της βιομάζας είναι ότι οι περισσότερες μορφές της είναι κατάλοιπα παραπροϊόντα, απόβλητα της εν γένει δραστηριότητας του ανθρώπου και η αντιμετώπιση τους σαν ενεργειακός πόρος εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πεδίο και από πολλές πλευρές σημαντικότερο από αυτό της προστασίας του περιβάλλοντος. Η βιομάζα γίνεται συνεχώς πιο επίκαιρη για τη χρήση της ως καύσιμο λόγω της ουδετερότητας της σε σχέση με την παραγώγη CO₂. Η αξιοποίηση της βιομάζας είναι ένα ζήτημα πολυυσύνθετο. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων με χρήση βιομάζας ως καύσιμο για την παραγωγή ατμού. Στην εργασία αυτή γίνεται βιβλιογραφική έρευνα για τα είδη βιομάζας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμη ύλη στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας. Επίσης, γίνεται βιβλιογραφική έρευνα για τα είδη εστιών καύσης και την επιλογή του κατάλληλου τύπου εστίας καύσης για τον εκάστοτε τύπο βιομάζας. Στη συνέχεια γίνεται θερμοδυναμικός υπολογισμός ενός λέβητα κορεσμένου ατμού. Τέλος, εφαρμόζεται ο Ευρωπαϊκός κανονισμός (EUROPEAN STANDARD EN 12953-3) για τον υπολογισμό αντοχής του συγκεκριμένου λέβητα κορεσμένου ατμού.

Διερέυνηση της παραγόμενης βιομάζας στην Κεντρική Μακεδονία

Τα στοιχεία που προέκυψαν από τη διερέυνηση βιομάζας αφορούν το χρονικό διάστημα 5 ετών 2000 έως 2004, αφορούν τα είδη βιομάζας που ενδιαφέρουν στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας που είναι οι καλλιέργειες αραβόσιτου, ρυζιού, βαμβακιού, ζαχαρότευτλων, ροδάκινων και ελιών ελαιοποιήσεως. Οι καλλιέργειες αυτές αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή βιομάζας καθώς αποτελούν το κυριότερο τμήμα των αγροτικών δραστηριοτήτων της Κεντρικής Μακεδονίας (Νομοί Ημαθίας, Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Πέλλας, Πιερίας, Σερρών, Χαλκιδικής,). Τα στοιχεία που παρουσιάζονται έχουν προκύψει τόσο από βιβλιογραφική έρευνα (επιστημονικά κείμενα, πρακτικά συνεδρίων, ιστοσελίδες κλπ), όσο και από τηλεφωνική επικοινωνία. Τα στοιχεία αφορούν τις μέσες ποσότητες ανά έτος και είδος, όπως επίσης και τις κατανομές για κάθε είδος ανά νομό. Ακόμα, παρουσιάζονται χαρακτηριστικές στοιχειομετρίες βιομάζας που αξιοποιείται ως καύσιμη ύλη (βλ. παράρτημα 1). Πρέπει να επισημανθεί ότι η βιομάζα προκύπτει τόσο κατά τη διαδικασία συλλογής των κύριων προϊόντων από τις καλλιέργειες (στελέχη, άχυρα και κλαδέματα), όσο και κατά την αντίστοιχη παραγωγική διαδικασία για παράδειγμα εκκοκκισμός βαμβακιού, επεξεργασία ρυζιού, κονσερβοποίηση ροδάκινων, παραγωγή ελαιόλαδου.

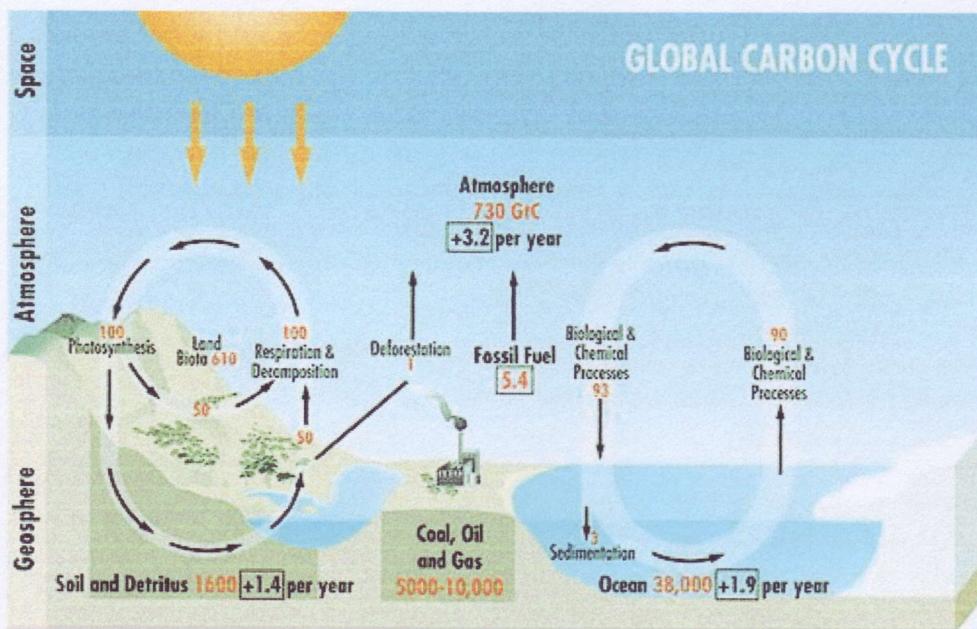
Τι είναι βιομάζα;

Η βιομάζα αναφέρεται γενικά στην οργανική ουσία που προέρχεται από τα φυτά και παράγεται μέσω της φωτοσύνθεσης. Η βιομάζα όχι μόνο παρέχει τα τρόφιμα αλλά και τα δομικά υλικά, τις ίνες, τα φάρμακα και την ενέργεια. Ειδικότερα, η βιομάζα μπορεί να αναφερθεί ως ηλιακή ενέργεια που αποθηκεύεται στους χημικούς δεσμούς του οργανικού υλικού.

Από που προέρχεται η βιομάζα;

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) από την ατμόσφαιρα και το νερό που απορροφάται από τις ρίζες φυτών συνδυάζονται κατά τη φωτοσυνθετική διαδικασία για να παραγάγουν τους υδατάνθρακες (ή τα σάκχαρα) που διαμορφώνουν τη βιομάζα. Η ηλιακή ενέργεια δηλαδή, κατά τη φωτοσύνθεση μετατρέπεται σε χημική ενέργεια που αποθηκεύεται με τη μορφή σακχάρων στα δομικά τμήματα της βιομάζας. Κατά τη διάρκεια της καύσης βιομάζας, το οξυγόνο από την ατμόσφαιρα ενώνεται με τον άνθρακα της βιομάζας και παραγάγεται CO_2 και νερό. Η διαδικασία είναι επομένως κυκλική, επειδή το διοξείδιο του άνθρακα είναι έπειτα διαθέσιμο για παραγωγή νέας βιομάζας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η βιοενέργεια θεωρείται ενδεχομένως ουδέτερη ως προς τον άνθρακα, αν και μερικές εκπομπές του CO_2 εμφανίζονται λόγω της χρήσης των απολιθωμένων καυσίμων κατά τη διάρκεια της παραγωγής και της μεταφοράς των βιολογικών καυσίμων.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει: τα αποθέματα άνθρακα σε ($1\text{GtC} = 10^{12}\text{ kg}$), τις ετήσιες ροές και τα ποσοστά συσσώρευσης σε $\text{GtC}/\text{έτος}$. Οι υπολογισμοί έγιναν κατά τη διάρκεια της περιόδου 1990 - 1999.



EIKONA 1: Κύκλος του άνθρακα Πηγή: [2]

Πηγές βιομάζας

Οι πηγές βιομάζας μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τα αποθέματα ανά τομέα, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

| Αποθέματα τομέα | Τύπος | Παράδειγμα |
|-----------------|--|--|
| Δασοκομία | Καταγεγραμμένη δασοκομία | Κοντές φυτείες (π.χ. ιτιά, λεύκα, ευκάλυπτος) |
| | Υποπροϊόντα δασοκομίας | Κομμάτια ξύλου, μικρά κομμάτια ξύλου από εκλεπτύνσεις |
| Γεωργία | Ενεργειακές συγκομιδές από ξηρή λιγνοκυτταρίνη | Ποώδεις συγκομιδές (π.χ. miscanthus, κάλαμος canarygrass, γιγαντιαίος κάλαμος) |
| | Ενεργειακές συγκομιδές ελαίου, σακχάρων και αμύλου | Λινόσποροι για μεθυλένιο (π.χ. ηλίανθος) |
| | | Συγκομιδές ζάχαρης για την αιθανόλη (π.χ. ζαχαρότευτλο, γλυκό ζαχαρόχορτο) |
| | | Συγκομιδές αμύλου για την αιθανόλη (π.χ. αραβόσιτος, σιτάρι) |
| | Γεωργικά υπολείμματα | Άχυρα, περικοπές από τους αμπελώνες και οπωρωφόρα δέντρα |
| | Ζωικά απόβλητα | Υγρό και ξηρό λίπασμα |
| Βιομηχανία | Βιομηχανικά υπολείμματα | Απόβλητα βιομηχανιών ξυλείας, πριονίδι από τα πριονιστήρια |
| | | Ινώδη φυτικά απόβλητα από τις βιομηχανίες χαρτιού |
| Απόβλητα | Ξηρή λιγνοκυτταρίνη | Υπολείμματα από τα πάρκα και τους κήπους (π.χ.. κλαδιά, χλόη) |
| | Μολυσμένα απόβλητα | Άχρηστα ξύλα |
| | | Οργανικό μέρος των δημοτικών στερεών αποβλήτων |
| | | Βιοδιάσπαση με υγειονομική ταφή σκουπιδιών, βιοαέριο |
| | | Λάσπη βιοθρολυμάτων |



Σμίλευση των δασικών
υπολειμμάτων
Εικόνα2 Πηγή: [2]



Δέματα αχύρου



Αγρός

Σύνθεση φυτικής βιομάζας

Η χημική σύνθεση φυτικής βιομάζας ποικίλλει μεταξύ των ειδών. Γενικά, τα φυτά αποτελούνται από λιγνίνη¹ περίπου 25% και από υδατάνθρακες ή σάκχαρα 75%. Το μέρος των υδατανθράκων αποτελείται από πολλά μόρια σάκχαρων που συνδέονται με μακριές αλυσίδες από πολυμερή. Διακρίνονται δύο κατηγορίες: η κυτταρίνη² και η ημικυτταρίνη. Το μέρος της λιγνίνης αποτελείται από μη σακχαρούχα μόρια που ενεργούν σαν σύνδεσμοι οι οποίοι διατηρούν τη συνοχή ανάμεσα στις ίνες της κυτταρίνης.

Χαρακτηριστικές τιμές για τη σύνθεση του αχύρου, των μαλακών ξύλων και των σκληρών ξύλων

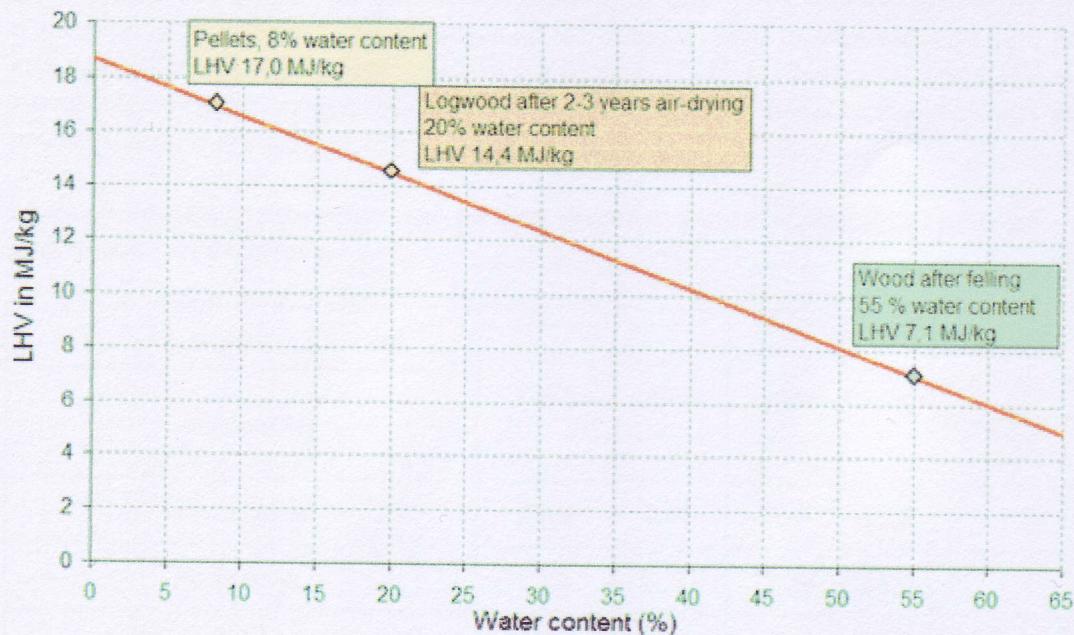
| | Κυτταρίνη | Ημικυτταρίνη | Λιγνίνη |
|---------------|-----------|--------------|---------|
| Μαλακό ξύλο | 45 | 25 | 30 |
| Σκληρό ξύλο | 42 | 38 | 20 |
| Μίσχοι αχύρου | 40 | 45 | 15 |

Ενεργειακό περιεχόμενο βιομάζας

Η θερμαντική αξία των καυσίμων εκφράζεται συνήθως ως ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV) ή κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV). Η διαφορά προέρχεται από τη θερμότητα της εξάτμισης των υδρατμών που διαμορφώνονται από το υδρογόνο. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών θερμογόνου δύναμης εξαρτάται από τη χημική σύνθεση των καυσίμων. Η HHV αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της πλήρους οξείδωσης ανά κιλό καυσίμου. Περιλαμβάνει τη θερμική ενέργεια που ανακτάται εκ νέου με τη συμπύκνωση και την ψύξη όλων των προϊόντων της καύσης. Η LHV δημιουργήθηκε προς το τέλος του 19^{ου} αιώνα όταν έγινε προφανές ότι η συμπύκνωση των υδρατμών στα καυσαέρια οδηγεί στη διάβρωση και την καταστροφή των συστημάτων εξάτμισης.

Η σημαντικότερη ιδιότητα της βιομάζας όσον αφορά την καύση – και τις άλλες θερμοχημικές διαδικασίες - είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία, η οποία επηρεάζει το ενεργειακό περιεχόμενο των καυσίμων.

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την εξέλιξη της κατώτερης θερμογόνου δύναμης (LHV, σε MJ/kg) του ξύλου σε συνάρτηση της περιεκτικότητας του σε υγρασία.



Κατώτερη θερμογόνος δύναμη συναρτήση της περιεκτικότητας σε υγρασία για διάφορους τύπους βιομάζας.

Σχήμα 1 Πηγή: [2]

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει περιεκτικότητες υγρασίας για συγκεκριμένη βιομάζα.

| Πηγή βιομάζας | Περιεκτικότητα υγρασίας |
|---|-------------------------|
| Βιομηχανικά φρέσκα κομμάτια ξύλου και πριονίδια | 40-60 wt. % (wb) |
| Βιομηχανικά ξηρά κομμάτια ξύλου και πριονίδια | 10-20 wt. % (wb) |
| Κομμάτια από ξύλο δάσους | 40-60 wt. % (wb) |
| Κομμάτια ξύλου αποθηκευμένα και στεγνωμένα με ατμοσφαιρικό αέρα | 30-40 wt. % (wb) |
| Απόβλητα ξύλων | 10-30 wt. % (wb) |
| Ξηρά άχυρα | 15 wt. % (wb) |

Οι πηγές βιομάζας περιλαμβάνουν μια ευρεία ποικιλία υλικών που διαφοροποιούνται ως προς τις φυσικές και χημικές ιδιότητες. Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, αυτές οι παραλλαγές μπορούν να είναι κρίσιμες για την τελική απόδοση του συστήματος. Ειδικότερα, μερικές προηγμένες εφαρμογές απαιτούν αρκετά αυστηρές προδιαγραφές για

την υγρασία και την περιεκτικότητα και σύνθεση της τέφρας. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά ποικίλουν σημαντικά ανάμεσα στις διαφορές πρώτες ύλες της βιομάζας. Επίσης, οι πρώτες ύλες βιομάζας είναι πιο ομοιόμορφες για κάποιες ιδιότητες τους συγκρινόμενες με πρώτες ύλες άνθρακα ή πετρέλαιου. Για παράδειγμα, η θερμική αξία του άνθρακα κυμαίνεται από 20 μέχρι 30 GJ/tonne. Όμως, τα περισσότερα είδη βιομάζας που προορίζονται για καύση κυμαίνονται μεταξύ 15-19 GJ/tonne για την LHV. Οι τιμές για τα περισσότερα δασικά υλικά είναι 18-19 GJ/tonne, ενώ για τα περισσότερα γεωργικά υπολείμματα, η θερμική αξία κυμαίνεται μεταξύ 15-17 GJ/tonne.

Μερικά τυπικά χαρακτηριστικά από τα καύσιμα βιομάζας συγκρινόμενα με πετρέλαιο και άνθρακα.

| Τυπικά χαρακτηριστικά | GJ/t | toe/t | kg/m ³ | GJ/m ³ | Όγκος ισοδύναμου πετρελαίου (m ³) {1} |
|---|------|-------|-------------------|-------------------|---|
| Καύσιμα | | | | | |
| Πετρέλαιο | 41,9 | 1,00 | 950 | 39,8 | 1,0 |
| Άνθρακας | 25,0 | 0,60 | 1000 | 25,0 | 1,6 |
| σβόλοι 8% υγρασία | 17,5 | 0,42 | 650 | 11,4 | 3,5 |
| Σωρός ξύλων συγκεντρωμένος, 50% | 9,5 | 0,23 | 600 | 5,7 | 7,0 |
| Βιομηχανικά μαλακά κομάτια ξύλου 50% υγρασία | 9,5 | 0,23 | 320 | 3,0 | 13,1 |
| Βιομηχανικά κομάτια μαλακού ξύλου 20% υγρασία | 15,2 | 0,36 | 210 | 3,2 | 12,5 |
| Δασικά κομάτια μαλακού ξύλου 30% υγρασία | 13,3 | 0,32 | 250 | 3,3 | 12,0 |
| Δασικά κομάτια σλκηρού ξύλου 30% υγρασία | 13,3 | 0,32 | 320 | 4,3 | 9,3 |
| Άχυρο τεμαχισμένο 15% υγρασία | 14,5 | 0,35 | 60 | 0,9 | 45,9 |
| Δέματα αχύρου 15% υγρασία | 14,5 | 0,35 | 140 | 2,0 | 19,7 |

Πηγή: [2]

{1} Είναι ο όγκος ισοδύναμου πετρελαίου ώστε να ανακτηθεί η ισοδύναμη κατώτερη θερμογόνος δύναμη για τους διάφορους τύπους βιομάζας.

Προμήθεια βιομάζας

Μια βασική διαφορά μεταξύ της βιοενέργειας και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (υδροενέργεια, αιολική, ηλιακή) είναι ότι, η πρώτη ύλη πρέπει να παραχθεί και να συλλεχθεί, με το αντίστοιχο κόστος, ενώ για τις άλλες Α.Π.Ε., τα "καύσιμα" (νερό, αέρας, ηλιακή ακτινοβολία) είναι διαθέσιμα χωρίς κόστος.

Το μεγαλύτερο μέρος του ξύλου για τη βιοενέργεια προέρχεται αυτήν την περίοδο από τα βιομηχανικά ξύλινα υπολείμματα (όπως απόβλητα ποτών από βιομηχανίες πολτοποιήσεως και αποφλοίωσης, πριονίδι και άλλα απορρίμματα ξύλου από πριονιστήρια και μύλους χαρτιού). Όμως, μεσοπρόθεσμα, όταν αυτές οι πηγές εξαντληθούν, τα στερεά βιολογικά καύσιμα θα πρέπει να βασιστούν στην αποκατάσταση των δασικών υπολειμμάτων καθώς επίσης και στην γεωργική παραγωγή.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της βιομάζας.

Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι ανανεούμενη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη με μορφή χημική. Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων, με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας. Επίσης στα πλεονεκτήματα της καταλογίζεται και το ότι κατά την παραγωγή και την μετατροπή της δεν δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα. Από την άλλη σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο (σε σύγκριση με πετρέλαιο, κάρβουνο) λόγω χαμηλής πυκνότητας και/ή υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ., ιδιότητες που συνεπάγονται δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση της. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε μορφές ενέργειας πιο κατάλληλες για εύκολη και πλατειά χρησιμοποίηση παραμένει αρκετά υψηλό.

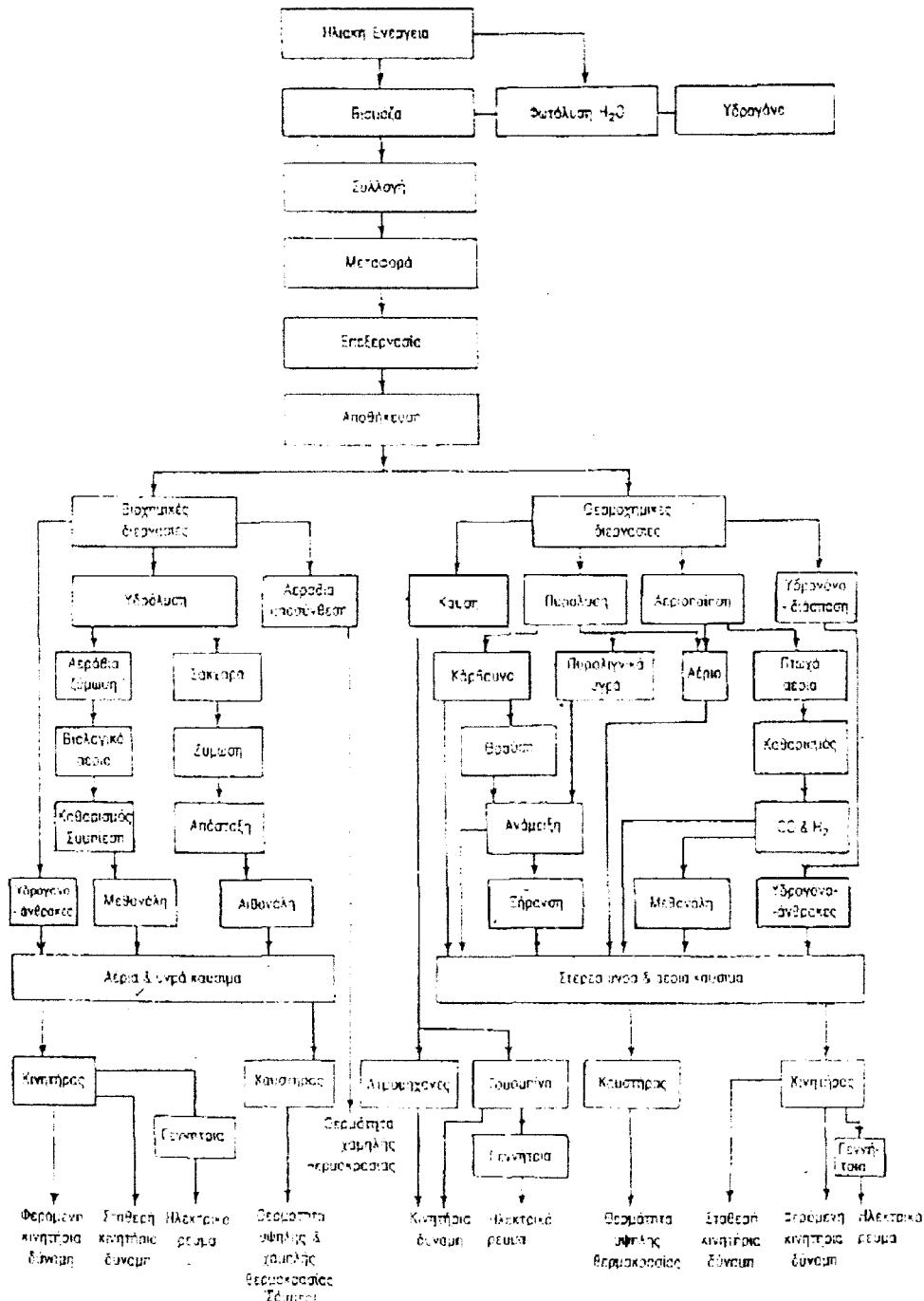
Τεχνολογία

Η βιομάζα για να αξιοποιηθεί σαν πηγή ενέργειας πρέπει συνήθως να μετατραπεί σε μορφή κατάλληλη για την τελική χρήση. Οι μέθοδοι μετατροπής διακρίνονται σε θερμοχημικές (ξηρές) και βιοχημικές, (υγρές). Η επιλογή της μεθόδου μετατροπής προσδιορίζεται από τα βασικά στοιχεία και την περιεχόμενη υγρασία των υπολειμμάτων την ώρα της συλλογής. Οι θερμοχημικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για τα είδη της βιομάζας σε σχέση με την υγρασία <50%, δηλαδή για τα προϊόντα και τα υπολείμματα της κυτταρίνης. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται:

- α) Η πυρόλυση.
- β) Η απευθείας καύση.
- γ) Η αεριοποίηση.
- δ) Η υδρογονοδιάσπαση.

Οι βιοχημικές διεργασίες ονομάζονται έτσι επειδή είναι αποτέλεσμα μικροβιακής δράσης. Χρησιμοποιούνται για είδη της βιομάζας σε σχέση με την υγρασία >50%, δηλαδή για προϊόντα και υπολείμματα κυρίως λαχανικών, κτηνοτροφικά απόβλητα, κλπ. Στις βιοχημικές διεργασίες περιλαμβάνονται:

- α) Η αερόβια ζύμωση
- β) Η αναερόβια ζύμωση
- γ) Η αλκοολική ζύμωση



Εικόνα 3: Μέθοδοι μετατροπής βιομάζας Πηγή: [4]

Κεφάλαιο 2

Καύση

Η καύση του ξύλου και άλλης στερεάς βιομάζας είναι η παλαιότερη ενεργειακή τεχνολογία που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο. Η τεχνολογία της καύσης είναι εμπορικά καθιερωμένη καθώς εφαρμόζεται στις περισσότερο βιομηχανικές και αναπτυσσόμενες χώρες. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής συγκεντρώνεται στην επίλυση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, βελτιώνοντας τη γενική απόδοση με λειτουργία πολλαπλών καυσίμων και αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης της ισχύος και όσο το δυνατόν τους κύκλους θερμότητας.

Επισκόπηση συσκευών:

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την άμεση καύση των στερεών καυσίμων βιομάζας κυμαίνονται από τις μικρές εσωτερικές σόμπες (1 εώς 10 KW) μέχρι τους μεγαλύτερους λέβητες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ενέργειας και στις CHP εγκαταστάσεις (>5 MW). Οι ενδιάμεσες συσκευές είναι μικροί λέβητες (10 εώς 50 KW) χρησιμοποιούμενοι στην κεντρική θέρμανση οικογενειακών σπιτιών, μεσαίου μεγέθους λέβητες (50 εώς 150 KW) χρησιμοποιούμενοι για θέρμανση οικοδομών και μεγάλοι λέβητες (από 150 μέχρι και μεγαλύτεροι από 1 MW) χρησιμοποιούνται για θέρμανση ολόκληρων περιοχών. Τέλος υπάρχουν και οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί οι οποίοι χρησιμοποιούν ως καύσιμο άνθρακα οι οποίοι αποδίδουν ισχύ >100 MW που όμως δεν είναι εφαρμόσιμοι για καύση βιομάζας λόγω της περιορισμένης τοπικής διαθεσιμότητας βιομάζας.

Οι συχνότερα χρησιμόποιούμενοι κλίβανοι για καύση βιομάζας

| Τροφοδοσία | Μονάδα καύσης | ισχύς | Καύσιμα | Τέφρα | Περιεκτικότητα σε υγρασία (%) |
|-------------|-----------------------------|----------------|--|-------|-------------------------------|
| Χειροκίνητα | σόμπες ξύλου | 2 kW – 10 kW | Ξηρά ξύλα | <2% | 5%-20% |
| | Λέβητες ξύλου | 5 kW – 50 kW | υπολείμματα πολύ υγρών ξύλων | <2% | 5%-30% |
| Σβόλοι | Λέβητες σβόλων | 2 kW – 25 kW | ξύλινοι σβόλοι | <2% | 8%-10% |
| Αυτόματα | Κλίβανοι Unterstoker | 20 kW – 2.5 MW | ξύλινα κομμάτια, ξύλινα υπολείμματα | <2% | 5%-50% |
| | Κλίβανοι με κινούμενη σχάρα | 150 kW – 15 MW | όλα τα ξύλινα καύσιμα, περισσότερο βιομάζα | <50% | 5%-60% |

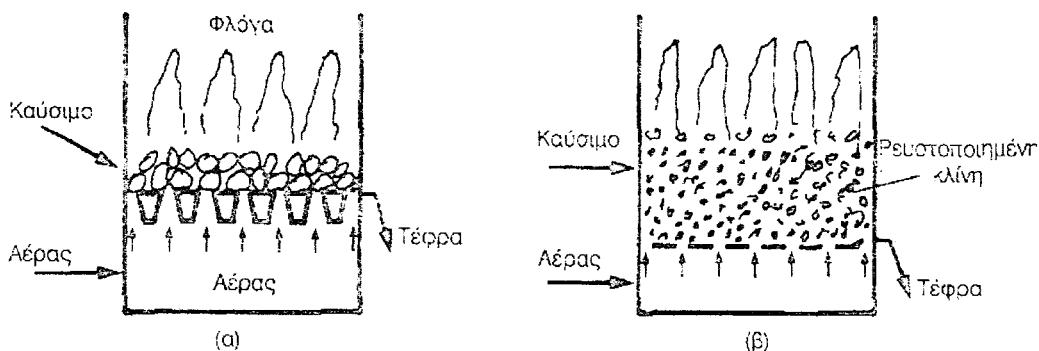
| | | | | | |
|----------------|---|----------------------|---------------------------------|------|---------|
| | Προθερμαντήρες με σχάρα | 20 kW – 1.5 MW | ξηρό ξύλο υπόλειμματα | <5% | 5%-35% |
| | Κλίβανοι με περιστρεφόμενη σχάρα | 2 MW – 5 MW | Κομάτια ξύλου, υψηλή υγρασία | <50% | 40%-65% |
| | Καυστήρας αχύρων | 3 MW – 5 MW | δέματα αχύρου | <5% | 20% |
| | Κλίβανοι ολόκληρων δεμάτων | 3 MW – 5 MW | ολόκληρα δέματα | <5% | 20% |
| | Κλίβανοι αχύρου | 100 kW – 5 MW | Δέματα αχύρου κομμένα | <5% | 20% |
| | Αμετακίνητη ρευστοποιημένη κλίνη | 5 MW – 15 MW | Διάφορες βιομάζες, d < 10 mm | <50% | 5%-60% |
| | Ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας | 15 MW – 100 MW | Διάφορες βιομάζες, d < 10 mm | <50% | 5%-60% |
| | Θάλαμος καύσης σκόνης, παρασυρόμενη ροή | 5 MW – 10 MW | Διάφορες βιομάζες, d < 5 mm | <5% | <20% |
| *Καύση άνθρακα | Αμετακίνητη ρευστοποιημένη κλίνη | total 50 MW – 150 MW | Διάφορες βιομάζες, d < 10 mm | <50% | 5%-60% |
| | Ρευστοποιημένη κλίνη ανακυκλοφορίας | total 100 – 300 MW | Διάφορες βιομάζες, d < 10 mm | <50% | 5%-60% |
| | Καυστήρας αχύρων σκόνης | 5 MW – 20 MW | δέματα αχύρου | <5% | 20% |
| | Θάλαμος καύσης άνθρακα | total 100 MW – 1 GW | Διάφορες βιομάζες, d < 2 – 5 mm | <5% | <20% |

* η βιομάζα καλύπτει χαρακτηριστικά λιγότερο από 10% της εισαγωγής καυσίμων
Πηγή: [2]

Εστίες καύσης

Γενικά:

Ως εστία καύσης χαρακτηρίζουμε την διάταξη, όπου πραγματοποιείται η μετατροπή της χημικής ενέργειας των οργανικών καυσίμων σε ενθαλπία των καυσαερίων. Η μετατροπή αυτή γίνεται με την αντίδραση καύσης. Καύση σημαίνει ταχεία οξείδωση του καυσίμου. Το βάρος του ορισμού βρίσκεται στην λέξη ταχεία. Οταν η οξείδωση είναι ταχεία, η θερμοκρασία των ουσιών που παίρνουν μέρος στην αντίδραση ανέρχεται γρήγορα γιατί οι μηχανισμοί της μετάδοσης θερμότητας (αγωγιμότητα, συναγωγή, ακτινοβολία) δεν προφταίνουν να απάγουν την παραγόμενη θερμότητα προς το περιβάλλον. Επειδή τα οργανικά καύσιμα περιέχουν άνθρακα, μέσω των μηχανισμών της καύσης παράγονται μικροσκοπικοί κόκκοι αιθάλης, οι οποίοι πυρακτώνονται και έτσι η περιοχή όπου γίνεται η κυρίως αντίδραση της καύσης ακτινοβολεί έντονα και εμφανίζεται ως φλόγα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε, ότι η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε θερμότητα γίνεται στην φλόγα. Είναι προφανές ότι η κύρια λειτουργία μιας εστίας καύσης είναι η δημιουργία και διατήρηση της φλόγας. Στην καύση παίρνουν μέρος, εκτός από το καύσιμο, το οξειδωτικό μέσο και τα αδρανή. Ως οξειδωτικό μέσο παίρνεται το οξυγόνο του αέρα. Ως αδρανές χαρακτηρίζεται ένα συστατικό που δεν παίρνει μέρος στην αντίδραση της καύσης, λόγω όμως της θερμοχωρητικότητος του επιδρά περιορίζοντας την άνοδο της θερμοκρασίας. Το κυρίως αδρανές είναι το μοριακό άζωτο (N_2) που περιέχει ο αέρας καύσης. Άλλα αδρανή είναι π.χ. το H_2O της υγρασίας του καυσίμου και του αέρα, τα ευγενή αέρια του αέρα, η τέφρα αλλά και η περίσσεια του O_2 . Τα κύρια προϊόντα της καύσης είναι το CO_2 και το H_2O αλλά και ίχνη μερικών άλλων ουσιών που αποτελούν τους ρύπους. Τα καυσαέρια, εκτός από το CO_2 και H_2O περιέχουν και τα αδρανή N_2 και O_2 . Τα στερεά καύσιμα μπορούν να καούν μόνο με φλόγα διάχυσης. Στην φλόγα διάχυσης το καύσιμο αναμιγνύεται με τον αέρα στην εστία καύσης και η αντίδραση (φλόγα) αρχίζει και συντηρείται με την συνεχή ανάμειξη. Τα μόρια του O_2 μπορούν να προσεγγίσουν τα μόρια του καυσίμου μόνο με διάχυση. Η καύση των στερεών καυσίμων είναι μια πλέον πολύπλοκη διεργασία, γιατί αποτελείται από επίμερους διεργασίες όπως π.χ. ξήρανση (εξάτμιση υγρασίας), απελευθέρωση των πτητικών (παραγωγή αερίων καυσίμων), καύση των αερίων με φλόγα διάχυσης (ομογενής αντίδραση), καύση του στέρεου άνθρακα (ετερογενής αντίδραση). Η τελευταία διεργασία της καύσης του στέρεου καύσιμου, παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα της ετερογενούς αντιδράσεως δηλαδή το ότι η ταχύτητα καύσης εξαρτάται από την ειδική επιφάνεια του καυσίμου (m^2/kg καυσίμου). Τα αδρομερή τεμάχια, απαιτούν σχετικά μεγάλο χρόνο για να καούν τλήρως. Αυτός ήταν και ο λόγος, όπου με την πρόοδο της τεχνολογίας αναπτύχθηκε η καύση του άνθρακα σε μορφή σκόνης κόκκων. Η φλόγα σκόνης άνθρακα είναι φλόγα διάχυσης δηλαδή πρόκειται για μηχανική ανάμιξη των κόκκων με τον αέρα καύσης. Η καύση όλων των τύπων καυσίμων στους λέβητες γίνεται με φλόγα διάχυσης. Η ταχεία και πλήρης καύση προϋποθέτει την όσο το δυνατόν καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα. Επειδή η διάχυση είναι μια μοριακή διεργασία που απαιτεί χρόνο, η ταχύτητα καύσης εξαρτάται ισχυρά από την μορφή ροής στην φλόγα, όπου το υψηλό τυρβώδες δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Από τα παραπάνω φαίνεται καθαρά ότι, η κατασκευαστική διαμόρφωση της εστίας καύσης, εξαρτάται κατ' αρχήν από τον τύπο του καυσίμου. Στα στερεά καύσιμα πρέπει να διακρίνουμε μεταξύ αδρομερών τεμαχίων και σκόνης. Τα αδρομερή τεμάχια του στέρεου καυσίμου παραμένουν ακίνητα και σχηματίζουν σχετικά λεπτό στρώμα. Εκ των κάτω οδηγείται ο αέρας καύσης. Το στρώμα του καυσίμου δίνει την φλόγα, η οποία γεμίζει τον θάλαμο κάυσης.



Εικόνα 1. Σχηματική παράσταση α) εστίες σχάρας, β) ρευστοποιημένης κλίνης.

Πηγή: [6]

Εάν μικρύνει το μέγεθος των τεμαχίων του στερεού καυσίμου και ρυθμιστεί η ταχύτητα του αέρα καύσης σε μια δεδομένη τιμή, το στρώμα του καυσίμου δεν μένει ακίνητο. Τα μικρά τεμαχία αρχίζουν να αιωρούνται και έτσι δίνουν στο στρώμα τα χαρακτηριστικά του ρευστού, απ' όπου πήρε και το όνομα. Μαζί με τα τεμαχίδια του καυσίμου αιωρείται και η τέφρα, η οποία απομακρύνεται εν είδη ρευστού. Λόγω του υψηλού τυρβώδους της ρευστοποιημένης κλίνης, επικρατούν ιδανικές συνθήκες μετάδοσης μάζας (ταχεία και πλήρης καύση σε θερμοκρασίες 800-900°C) και μετάδοσης θερμότητας. Τόσο στις εστίες σχάρας, όσο και στην ρευστοποιημένη κλίνη, το πάχος του στρώματος του καυσίμου δεν μπορεί να αυξηθεί πέρα από ένα όριο. Η ισχύς της εστίας καύσης είναι ανάλογη της διατομής της και επομένως η χρησιμοποίηση της περιορίζεται σε χαμηλές θερμικές ισχείς της τάξεως των 300-400 MW. Οι καυστήρες εδώ είναι περισσότερο εξειδικευμένοι επειδή η κατασκευή τους δεν εξαρτάται μόνο από τον τύπο του καυσίμου αλλά και από το κατά πόσον η καύση γίνεται με ιπτάμενη η λιωμένη τέφρα. Η εστία μάζι με τον θάλαμο καύσης αποτελούν μια κατασκευάστικη ενότητα του λέβητα. Στην εστία γίνεται η ανάμιξη των αντιδρώντων (καυσίμου και αέρα) και δημιουργείται η φλόγα, η οποία όμως εκτείνεται σε όλο τον θάλαμο καύσης. Η χημική αντίδραση της καύσης αρχίζει στην εστία (έναυση) περατώνεται όμως στον θάλαμο καύσης. Επειδή η φλόγα ακτινοβολεί μεγάλα ποσά θερμότητας, ο θάλαμος καύσης είναι έτσι διαμορφωμένος ώστε οι θερμαντικές επιφάνειες του λέβητα να παραλαμβάνουν αυτή τη θερμότητα.

Εστίες σχάρας

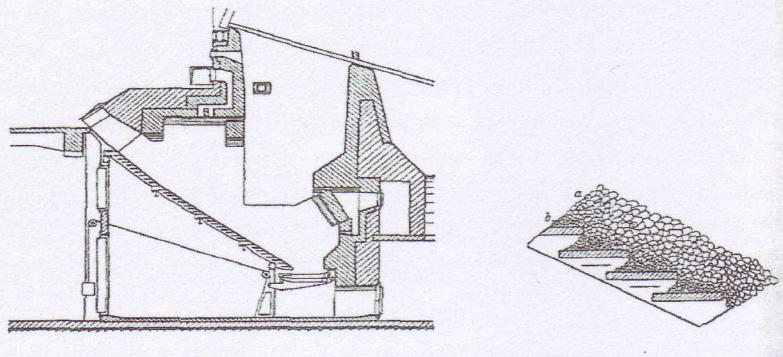
Επίπεδη σχάρα:

Η επίπεδη σχάρα είναι απλή στην κατασκευή της. Αποτελείται από ράβδους που έχουν συνήθως διατομή τραπεζίου και απέχουν μεταξύ τους 6-10 mm. Η ελεύθερη διατομή για την διέλευση του αέρα είναι το 20-25% της συνολικής επιφανείας της σχάρας. Το αδρομερές καύσιμο προσάγεται στην σχάρα σε αραιά χρονικά διαστήματα με χειροκίνητα ή μηχανικά φτυάρια. Ο πρωτεύων αέρας (85% του συνολικού) προσάγεται από το κάτω μέρος της σχάρας όπου και ψύχει τις ράβδους. Ο δευτερεύων αέρας, εισέρχεται από τα πλάγια τοιχώματα του θαλάμου καύσης, λίγο πιο πάνω από το στρώμα καυσίμου. Ο δευτερεύων αέρας σκοπό έχει να δώσει το απαιτούμενο οξυγόνο για την καύση των πτητικών αερίων. Για να μπορεί να φτάσει έως και το κέντρο του θαλάμου καύσης πρέπει να εκτοξεύεται με μεγάλη ταχύτητα και έτσι δημιουργούνται και οι απαιτούμενοι στροβιλισμοί στην φλόγα. Το υλικό κατασκευής της σχάρας είναι θερμοανθεκτικός χυτοσίδηρος. Ως σχέση φύξης της σχάρας ορίζεται το μέγεθος $2h/b$, όπου h είναι το ύψος και b το πάχος των ράβδων, ($b = 30-20$ mm). Η σχέση φύξης παίζει αποφαστικό ρόλο

στην διάρκεια ζωής της σχάρας. Συνήθως είναι $2h/B = 12$. Τα μειονεκτήματα της επίπεδης σχάρας είναι: υψηλή τιμή κατασκευής, περιορισμένη ισχύς μεγάλη περίσσεια αέρα ($\eta = 1,3$ έως $1,6$). Οταν καίγεται άνθρακας στην σχάρα, θα πρέπει να περιορίζεται και η προθέρμανση του αέρα στους 100 έως 120°C , για να αποφεύγεται η τήξη της τέφρας. Η επιφάνεια της επίπεδης σχάρας είναι συνήθως $2.5\text{-}5 \text{ m}^2$. Η θερμική φόρτιση είναι $0,7\text{-}1 \text{ MW/m}^2$. Η επίπεδη σχάρα απαντάται σήμερα στην βιομηχανία, σε μικρές μονάδες καύσης.

Κλιμακωτή σχάρα:

Στην παράκατω εικόνα δίνεται η αρχή λειτουργίας της κλιμακωτής σχάρας.



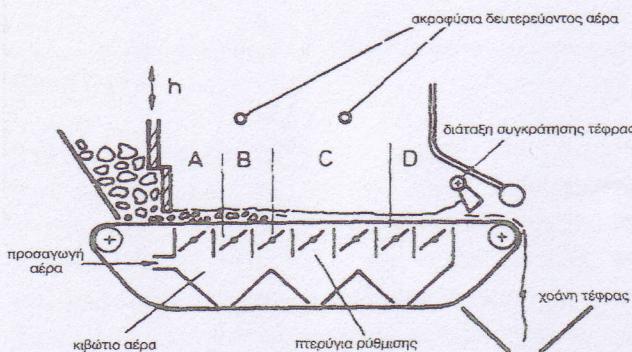
Εικόνα 2. Κλιμακωτή σχάρα: α. στρώμα άνθρακα, β. εστίες καύσης.

Πηγή: [6]

Πρόκειται για μια παραλλαγή της κεκλιμένης σχάρας, που σχεδιάστηκε για την καύση λιγνίτη και ξύλων. Σε απόσταση περίπου 500 mm το ποθετούνται εγκάρσια προφίλ, πάνω στα οποία στερεώνεται η κλιματωτή σχάρα. Η κλίση της σχάρας πρέπει να είναι λίγο μικρότερη από την γωνιά τριβής του καυσίμου για παράδειγμα Τύρφη 30° , Λιγνίτης 34° , Ξύλο 40° . Η σχέση ψύξης παίρνεται περίπου 1 , αλλά λόγω του ότι η θερμογόνος δύναμη των παραπάνω καυσίμων είναι μικρή, δεν παίζει σπουδαίο ρόλο. Όπως φαίνεται και στην εικόνα οι απώλειες λόγω πτώσης καύσιμου από την σχάρα είναι ελάχιστες. Το πάνω μέρος της σχάρας χρησιμεύει ως περιοχή ξήρανσης του καυσίμου. Το πλάτος της σχάρας φτάνει έως τα $1,5 \text{ m}$, το μήκος της έως τα 7 m . Μπορούν να τοποθετηθούν έως και 5 παράλληλες σχάρες. Η θερμική φόρτιση είναι έως 700 KW/m^2 .

Κινούμενη σχάρα:

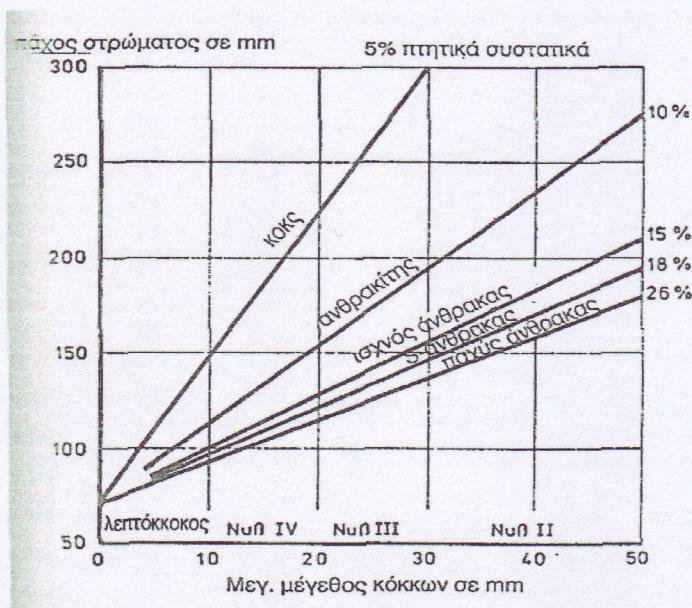
Την αρχή λειτουργίας της κινούμενης σχάρας δίνει η παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3. Σχήμα προσαγωγής αέρα καύσης σε κινούμενη σχάρα, A. ξήρανση, B. απαερίωση (πτητικά) και έναυση, C. καύση κοκς, D. περάτωση της καύσης.

Πηγή: [6]

Πρόκειται για μια ατέρμονα αλυσίδα από ράβδους σε κατάλληλη μεταξύ τους απόσταση ώστε να δημιουργείται η εστία σχάρας. Η αλυσίδα στηρίζεται σε μικρούς τροχούς και κινείται με μικρή ταχύτητα (25-250 mm/min). Η καύση γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά. Το καύσιμο κυλάει από το σιλό στην κινούμενη σχάρα και με την ακτινοβολία της φλόγας, από τον χώρο καύσης, ξηραίνεται, απαεριούται δηλαδή εκλύονται τα πτητικά και αρχίζει να καίγεται. Η καύση του στερεού κοκς διαρκεί αρκετό χρόνο και έτσι στο τέλος του δρόμου η τέφρα απορρίπτεται σ' ένα χωνί απ' όπου απομακρύνεται με κατάλληλα οχήματα. Η πορεία της καύσης απαιτεί διαφορετικούς όγκους αέρα κατά μήκος της σχάρας. Στην περιοχή της απαερίωσης, όπου καίγονται τα πτητικά συστατικά, απαιτείται πολύ περισσότερος αέρας απ' ότι στο τέλος του δρόμου όπου καίγεται το στερεό κοκς. Η ανάγκη σε ποσότητα αέρα κατά μήκος της σχάρας δίνεται στην εικόνα. Για να επιτευχθεί η ταύτιση της ανάγκης αέρα με την διανομή του αέρα καύσης, ο χώρος κάτω από την σχάρα χωρίζεται σε ζώνες. Με τα πτερύγια ρύθμισης επιτυγχάνεται η επιθυμητή κατανομή του αέρα καύσης όπως δείχνει η εικόνα. Οι ράβδοι της σχάρας είναι κατασκευασμένοι από θερμοανθετικό χρωμιούχο χάλυβα. Ο αέρας καύσης δεν μπορεί να προθερμανθεί ελεύθερα γιατί πρέπει να εξασφαλίζει και την ψύξη των ράβδων της σχάρας. Για προθέρμανση αέρα έως και 200°C η θερμοκρασία των ράβδων είναι περίπου 350°C. Το πάχος του στρώματος του άνθρακα πάνω στην σχάρα καθορίζεται από το μέγεθος των τεμαχίων και το είδος του άνθρακα, όπως δείχνει η εικόνα 4.

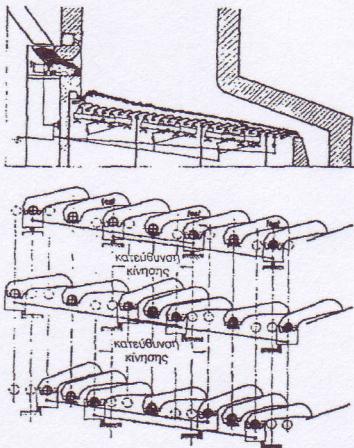


Εικόνα 4. Πάχος στρώματος καυσίμου σε κινούμενη σχάρα.
Πηγή: [6]

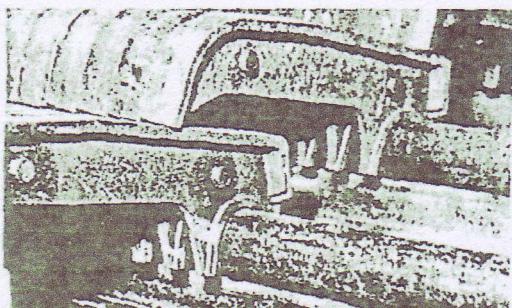
Τελευταία εξέλιξη στην τεχνολογία καύσης σε κινούμενη σχάρα αποτελεί η αυτοματοποίηση της σχέσης αέρα καύσης/καυσίμου, όπου ανάλογα με το πάχος του στρώματος ρυθμίζεται η ταχύτητα κίνησης της σχάρας. Για να διευκολυνθεί η καύση των πτητικών, έως και 25% του αέρα καύσης εισάγεται από τα πλάγια τοιχώματα του θαλάμου καύσης (πάνω από το στρώμα) ως δευτερεύων αέρας με μεγάλη ταχύτητα ροής. Ένα μειονέκτημα όλων των εστιών σχάρας, είναι η ανάγκη χρησιμοποίησης μεγάλης περίσσειας αέρα ($\eta = 1,3$ έως 1,6). Η θερμική φόρτιση της κινούμενης σχάρας είναι 1-2 MW/m². Το πλάτος της σχάρας είναι 3-3,5 m και το μήκος της είναι 4-6 m. Μπορεί να λειτουργήσει ως εστία καύσης σε λέβητες με ισχύ έως 120 t ατμού/ώρα.

Σχάρα πρόσθιας προώθησης:

Η κατασκευή αυτού του τύπου σχάρας είναι έτσι ώστε να επιτρέπει το «σκάλισμα της θράκας» με σύγχρονη πρόσθια προώθηση της. (Ως γνωστόν θράκα είναι το πυρακτωμένο στρώμα του άνθρακα). Η σχάρα έχει μια μικρή κλίση προς τα εμπρός. Κάθε δεύτερη ράβδος (ή πλάκα) είναι ακίνητη, ενώ οι άλλες ράβδοι μπορούν να κινούνται παλινδρομικώς όπως δείχνει η εικόνα 5 και στην εικόνα 6 δείχνεται μια κατασκευαστική άποψη των ράβδων της σχάρας.



Εικόνα 5. Σχάρα πρόσθιας προώθησης. Σχηματική επεξήγηση της λειτουργίας της.
Πηγή: [6]



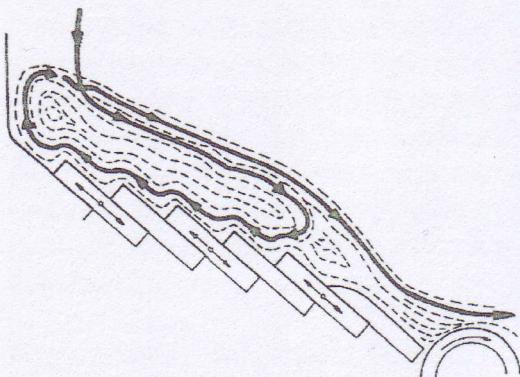
Εικόνα 6. Κατασκευή ράβδων σχάρας πρόσθιας προώθησης.
Πηγή: [6]

Η παλινδρομική κίνηση γίνεται με την βοήθεια υδραυλικών κυλίνδρων. Η συνολική κίνηση του στρώματος, μέχρι πάχους 500 mm, είναι από αριστερά προς τα δεξιά. Η κίνηση των ράβδων προς την αντίθετη φορά (παλινδρόμηση) προκαλεί το «σκάλισμα» δηλ. την τοπική ανάδευση του στρώματος και εμποδίζει την δημιουργία μιας συναφούς «θράκας», επιτρέποντας έτσι την διέλευση του αέρα καύσης. Και εδώ ο αέρας καύσης κατανέμεται σε διάφορες ζώνες κάτω από την σχάρα. Η θερμική φόρτιση της σχάρας είναι περίπου 1 MW/m^2 και είναι κατάλληλη για την καύση υγρού λιγνίτη και λιθάνθρακα που έχει τάση να σχηματίζει συμπαγή θράκα. Χρησιμοποιείται σήμερα για την καύση απορριμάτων και στερεών αποβλήτων της βιομηχανίας.

Σχάρα ανάστροφης κίνησης:

Ο τύπος αυτός της σχάρας αναπτύχθηκε για την καύση υγρού και πλούσιου σε τέφρα λιγνίτη. Όπως φαίνεται και από το σχήμα της εικόνας 7, η σχάρα ανάστροφης κίνησης έχει μεγάλη κλίση. Η παλινδρομική κίνηση των ελεύθερων ράβδων, που εδώ είναι τελείως επίπεδοι, επιτρέπει την κίνηση του καυσίμου κατ' αντίστροφη φορά δηλ. από το κάτω προς το άνω μέρος της σχάρας. Το φρέσκο καύσιμο «γλυνστράει» πάνω από το

οπισθοδρομούν μισοκαμένο καύσιμο. Η μακριά αυτή διαδρομή του καυσίμου στην σχάρα υποβοηθάει στην ξήρανση και έναυση.



Εικόνα 7. Σχάρα ανάστροφης κίνησης.

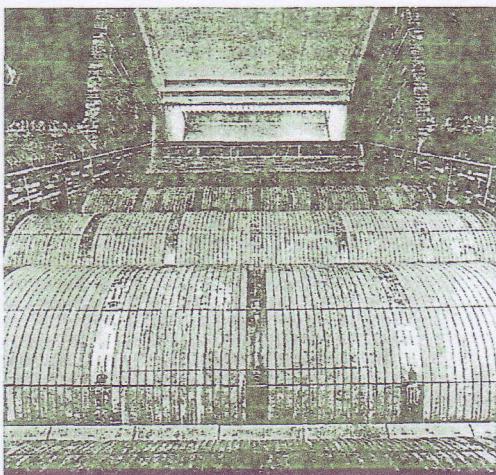
Πηγή: [6]

Η αδρή και στερεά κατασκευή αυτής της διάταξης είναι ελάχιστα εναίσθητη στην παρουσία ξένων σωμάτων στο καύσιμο. Οι ιδιότητες αυτές είναι πολύ κατάλληλες για να μπορεί η σχάρα αυτού του τύπου να χρησιμοποιηθεί και στην καύση στερεών αποβλήτων. Ιδιαίτερη σημασία έχει εδώ το γεγονός ότι τα απόβλητα παραμένουν σε υψηλές θερμοκρασίες ικανό χρόνο ώστε να καταστρέφονται τα μικρόβια και οι οσμές. Η προθέρμανση του αέρα κατά την καύση των αποβλήτων μπορεί να είναι και μέχρι 200°C . Η θερμική φόρτιση για την καύση άνθρακα είναι $1-2 \text{ MW/m}^2$.

Σγάρες καύσης απορριμάτων:

Εκτός των διατάξεων πρόσθιας και ανάστροφης προώθησης, στην καύση στερεών αποβλήτων και κυρίως απορριμάτων χρησιμοποιούνται και οι σγάρες των περιστρεφόμενων κυλίνδρων που ανεπτύχθηκαν ειδικά γι' αυτό τον σκοπό (εικόνα 8).

Οι κύλινδροι έχουν διάμετρο περίπου 800 mm και είναι έτσι τοποθετημένοι ώστε να δημιουργούν κεκλιμένη εστία. Η επιφάνεια των κυλίνδρων σχηματίζεται από παράλληλα τοποθετημένες οδοντωτές λωρίδες θερμοανθεκτικού χάλυβα. Κάθε κύλινδρος έχει την δική του κίνηση με δυνατότητα ρύθμισης των στροφών. Ο αέρας καύσης κατανέμεται κατά ζώνες κάτω από τους κυλίνδρους.



Εικόνα 8. Σχάρα περιστρεφόμενων κυλίνδρων.

Πηγή: [6]

Με την ξεχωριστή κίνηση των κυλίνδρων και προσαρμογή της περιστροφής τους σε 1-3 στροφές ανά ώρα, επιτυγχάνεται πλήρης καύση. Στην καύση των απορριμάτων, τα οποία

κατά κανόνα περιέχουν μεγάλα ποσοστά πτητικών ουσιών απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην κατανομή του αέρα καύσης. Περίπου το 80% του αέρα προσάγεται ως πρωτεύων αέρας με θερμοκρασία προθέρμανσης 120-200°C. Ο δευτερεύων αέρας πρέπει να εισάγεται με μεγαλύτερη ταχύτητα απ' ότι στα άλλα καύσιμα. Ως χαρακτηριστικό μέγεθος για την περίσσεια αέρα δεν παίρνεται εδώ η περιεκτικότητα σε O₂ -όπως στους συνήθεις λέβητες- αλλά η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε CO. Ο συντελεστής σχέσης αέρα είναι: $\eta = 1,6$ έως 2,0. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της καύσης στερεών αποβλήτων είναι οι παραγόμενοι ρύποι, των οποίων ο αριθμός και η ποσότητα εξαρτάται από την σύσταση των εκάστοτε απορριμάτων. Πρέπει να παίρνονται οπωδόποτε μέτρα για τον περιορισμό εκπομπής ρύπων όπως π.χ. SO₂, CO, καθώς και χλωριούχων και φθοριούχων ενώσεων.

Θερμοδυναμικός υπολογισμός

Το καύσιμο επιλέγεται με κριτήρια, την υγρασία ($\phi \leq 20\%$) και την θερμογόνο δύναμη του ($H_{uv} \geq 4000$ kcal/kg). Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και η ποσότητα βιομάζας που παράγεται και που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμη ύλη. Ο τύπος εστίας καύσης που επιλέγεται για στελέχη αραβόσιτου είναι κινούμενη σχάρα.

Με δεδομένα την παραγωγή ατμού (kg/h) και την θερμοκρασία εισόδου του νερού στον ατμολέβητα, τα βήματα του θερμοδυναμικού υπολογισμού περιγράφονται στις παρακάτω ενότητες:

- 2.1. Υπολογισμός της παροχής του καυσίμου.
- 2.2. Υπολογισμός της παροχής του αέρα της καύσης.
- 2.3. Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων.
- 2.4. Υπολογισμός της παροχής των καυσαερίων.
- 2.5. Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης.
- 2.6. Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύς στον φλογοθάλαμο.
- 2.7. Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύς στις δέσμες αυλών.
- 2.8 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών του ατμοπλέβητα.

2.1 Υπολογισμός της παροχής του καυσίμου

Ο υπολογισμός της συνολικής ισχύος του ατμολέβητα είναι μια επαναληπτική διαδικασία “try & error”. Αρχικά γίνεται μια εκτίμηση της ισχύος και του βαθμού απόδοσης του ατμολέβητα ώστε να προκύψει η κατανάλωση του καυσίμου και στη συνέχεια ακολουθεί ο αναλυτικός τους υπολογισμός.

Η συνολική ισχύς του ατμολέβητα είναι:

$$P = m_D \cdot (h_{D-} - h_v) \quad \text{σχέση 2.1.1}$$

όπου,

m_D - Η παραγωγή του ατμού σε [kg/s]

h_D - Η ενθαλπία του ατμού [kJ/kg] στην πίεση λειτουργίας, P σε bar

h_v - Η ενθαλπία του νερού [kJ/kg] στη θερμοκρασία εισόδου, T σε 0°C

Υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης του καυσίμου:

Η θερμογόνος δύναμη στερεών καυσίμων, που είναι γνωστή η σύστασή τους, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_u = 8100 \cdot c + 29000 \cdot \left(h - \frac{o}{8}\right) + 2500 \cdot s - 600 \cdot w \quad \text{σχέση 2.1.2}$$

Άρα προκύπτει η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου H_u [kcal/kg].

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του λέβητα ισούται με το πηλίκο της ωφέλιμης ισχύος προς την προσδιδόμενη ενέργεια, δηλαδή το γινόμενο της ροής μάζας του καυσίμου επί την θερμογόνο δύναμη του.

$$n = \frac{-P}{H_u \cdot m_b} \quad \text{σχέση 2.1.3}$$

όπου,

n - Βαθμός απόδοσης του ατμολέβητα

P- Η συνολική ισχύς του ατμολέβητα σε [KW]

H_u - Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου σε [kcal/kg]

Άρα προκύπτει η παροχή του καυσίμου m_b σε [kg/h]

2.2 Υπολογισμός της παροχής του αέρα καύσης

Για στοιχειομετρική και πλήρη καύση 1kg καυσίμου το στοιχειομετρικό O_2 που απαιτείται είναι:

$$O_{min} = \frac{32}{12}c + \frac{16}{2} \left(h - \frac{o}{8} \right) + s \quad \text{σχέση 2.2.1}$$

Η στοιχειομετρική ποσότητα αέρα είναι :

$$L_{min} = O_{min}/0,232 = 11,49 c + 3 \cdot 4,48 (h-o/8) + 4,31 s$$

$$\text{Άρα προκύπτει } L_{min} \frac{kg \text{ αέρα}}{kg b}$$

Η πραγματική ποσότητα αέρα είναι:

$$L = \lambda * L_{min} \quad \text{σχέση 2.2.2}$$

όπου,

λ (η περίσεια αέρα)

$$L_{min} \frac{kg \text{ αέρα}}{kg b}$$

$$\text{Άρα προκύπτει } L_{min} \frac{kg \text{ αέρα}}{kg b}$$

Υπολογισμός παροχής αέρα:

Η παροχή αέρα δίνεται από την σχέση:

$$m_L = m_b * L$$

σχέση 2.2.3

Άρα προκύπτει m_L σε [kg/s]

2.3 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίων

Η μάζα του ξηρού καυσαερίου στοιχειομετρικής καύσης είναι:

$$\mu_{GOT} = 12,494 c + 5,31 s + 26,483 (h-o/8) + n$$

σχέση 2.3.1

Άρα προκύπτει μ_{GOT} $\frac{kg \kappa.}{kg b}$

Η μάζα του νερού στα καυσαέρια είναι:

$$\mu_{H2O} = 9 h + w$$

σχέση 2.3.2

Άρα προκύπτει μ_{H2O} $\frac{kg \kappa.}{kg b}$

Η συνολική στοιχειομετρική μάζα του καυσαερίου είναι:

$$\mu_{GO} = \mu_{GOT} + \mu_{H2O}$$

σχέση 2.3.3

Άρα προκύπτει μ_{GO} $\frac{kg \kappa.}{kg b}$

Η πραγματική μάζα του καυσαερίου είναι:

$$\mu_G = \mu_{GO} + L_{min} (\lambda - 1)$$

σχέση 2.3.4

Άρα προκύπτει μ_G $\frac{kg \kappa.}{kg b}$

Το καυσαέριο περιέχει CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , καθώς επίσης και CO , H_2 , NO_x , τα οποία όμως είναι αμελητέες ποσότητες.

Η κατά μάζα σύσταση του καυσαερίου είναι:**Για το CO₂ έχω:**

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{44}{12} c \text{ kg } CO_2$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

Για το H₂O έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$9 \cdot h + w = \frac{kg \text{ } H_2O}{kg b} \quad \text{σχέση 2.3.5}$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

Για το N₂ έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{32}{12} \cdot \frac{76,8}{23,2} \cdot c + \frac{76,8}{23,2} \cdot 8 \cdot \left(h - \frac{o}{8}\right) + n = Kg \text{ } N_2 = \frac{kg \text{ } N_2}{kg \text{ } b}$$

Για το O₂ έχω:Από την καύση 1 kg καυσίμου δεν παράγεται O₂.**Η κατά όγκο σύσταση του καυσαερίου είναι:**Το στοιχειομετρικό O₂ που απαιτείται είναι:

$$O_{\min} = \frac{c}{12} + \left(h - \frac{o}{8}\right) \frac{1}{4} + \frac{s}{32} \quad \text{σχέση 2.3.6}$$

Η στοιχειομετρική ποσότητα αέρα είναι:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0.21} = 0.397c + 1.19 \left(h - \frac{o}{8}\right) + 0.149s$$

Η ποσότητα αέρα που δεν συμμετέχει στην καύση είναι:

$$L - O_{\min} = \lambda L_{\min} - O_{\min} = \lambda \frac{O_{\min}}{0.21} - O_{\min} = L - \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{o}{32} + \frac{s}{32} \right)$$

Η συνολική ποσότητα του καυσαερίου είναι:

$$n_p = L + \frac{h}{4} + \frac{o}{32} + \frac{w}{18} + \frac{n}{28} \quad \text{σχέση 2.3.7}$$

Για το CO₂ έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{1}{12} \cdot c \quad kmol \text{ } CO_2$$

Για το H₂O έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{h}{2} + \frac{w}{18} \quad kmol \text{ } H_2O$$

Η ποσότητα του N₂ στα καυσαέρια είναι:

$$L_k = L - \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} + \frac{s}{32} \right) \quad \text{σχέση 2.3.8}$$

2.4 Υπολογισμός της παροχής των καυσαερίων

Η παροχή καυσαερίου δίνεται από την σχέση :

$$m_v = m_b + m_L \quad \text{σχέση 2.4.1}$$

Άρα προκύπτει m_v σε [kg/s]

2.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον φλογοθάλαμο

Τα καυσαέρια παράγονται στο θάλαμο καύσης και παίρνουν τη θερμοκρασία της φλόγας. Κατά την πορεία τους έως την έξοδο από την καπνοδόχο, ψύχονται έως την θερμοκρασία t_A . Στο θάλαμο καύσης η θερμότητα μεταδίδεται με ακτινοβολία στο νερό που εξατμίζεται, ενώ τα καυσαέρια ψύχονται έως τη θερμοκρασία t_E . Μετά το θάλαμο καύσης, η θερμότητα μεταδίδεται με συναγωγή κυρίως στις επιφάνειες του λέβητα. Όλες οι θερμαντικές επιφάνειες που βρίσκονται μετά το θάλαμο καύσης σχεδιάζονται σύμφωνα με τους κανόνες των εναλλακτών θερμότητας. Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης t_E , θα πραγματοποιηθεί με την μέθοδο της μέσης θερμοκρασίας T_m . Η πρώτη παραδοχή είναι ότι η καύση γίνεται ακαριαία στον πυθμένα του θαλάμου καύσης και τα καυσαέρια παίρνουν τη θεωρητική αδιαβατική θερμοκρασία t_{ad} . Τα καυσαέρια εκπέμπουν ακτινοβολία προς τα τοιχώματα, που έχουν την σταθερή θερμοκρασία t_w και εξέρχονται από το θάλαμο καύσης με τη θερμοκρασία t_E . Η δεύτερη παραδοχή είναι ότι η ακτινοβολία των καυσαερίων θεωρείται ότι γίνεται με την μέση θερμοκρασία T_m , η οποία ορίζεται ως:

$$T_m = \sqrt{T_{ad} \times T_E} \quad \text{σχέση 2.5.1}$$

όπου,

T_{ad} (Η θεωρητική αδιαβατική θερμοκρασία καύσης)

T_E (Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον φλογοθάλαμο)

Υποθέτω τιμή T_E και βρίσκω την T_m

Υπολογισμός θεωρητικής αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης

Η θεωρητική αδιαβατική θερμοκρασία καύσης T_{ad} ισούται με την θερμοκρασία που αναπτύσσουν τα προϊόντα της καύσης (καυσαέριο μίγμα) όταν τα αντιδρώντα της καύσης (μίγμα αέρα-καυσίμου) αφεθούν να καούν σε αδιαβατικό θάλαμο υπό σταθερή πίεση. Στην περίπτωση αυτή, η ενθαλπία των προϊόντων στην αδιαβατική θερμοκρασία θα πρέπει να ισούται με την ενθαλπία των αντιδρώντων πριν την αντίδραση στην θερμοκρασία εισόδου τους (πριν την καύση).

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$h_R(t_L) = h_P(t_{ad}) \quad \text{σχέση 2.5.2, 2.5.4, 2.5.3}$$

$$h_R(t_L) = Hu + \lambda L_{\min} \left[c_{p,L}^0 \right]_0^{t_L} \times t_L$$

$$h_P(t_{ad}) = \left[m_i^* \times \left[c_{p,i}^0 \right]_0^{t_{ad}} \right] \times t_{ad}$$

όπου,

$h_R(t_L)$ (Η ενθαλπία των αντιδρώντων πριν την αντίδραση σε θερμοκρασία $t_L = 293 \text{ [K]} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$)

$h_P(t_{ad})$ (Η ενθαλπία των προϊόντων στην αδιαβατική θερμοκρασία καύσης)

H_u (Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου)

λL_{\min} (Είναι η ποσότητα του αέρα [kg L/kg b])

$\left[c_{p,L}^0 \right]_0^{t_L}$ (Είναι η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα [kJ/kgK] σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας [$^\circ\text{C}$])

$\left[c_{p,i}^0 \right]_0^{t_{ad}}$ (Είναι η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα των συστατικών του καυσαερίου [kJ/kgK] σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας [$^\circ\text{C}$])

m_i^* (Είναι τα κλάσματα μάζας των συστατικών του καυσαερίου [kg/kg b]
των συστατικών του καυσαερίου)

$i = \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O}_2, \text{N}_2$

Ο υπολογισμός της άγνωστης θεωρητικής αδιαβατικής θερμοκρασίας καύσης t_{ad} γίνεται με τη μέθοδο δοκιμής και επαλήθευσης.

Για

$$Hu [kJ / kg]$$

$$\lambda L_{\min} [kg_L / kg_b]$$

$$\left[c_{p,L}^0 \right]_0^{t_L} [kJ / kgK]$$

Προκύπτει ότι:

$$h_R(t_L) [kJ/kg]$$

Λύνοντας την παρακάτω σχέση ως προς t_{ad} προκύπτει:

$$Hu + \lambda L_{\min} \left[c_{p,L}^0 \right]_0^{t_L} \times t_L = \left[m_i^* \times \left[c_{p,i}^0 \right]_0^{t_{ad}} \right] \times t_{ad}$$

Θεωρούμε στην παραπάνω σχέση το t_{ad} [K].

Τα αποτέλεσματα του πίνακα προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή:

| ΕΝΩΣΗ | m_i [kg _i /kg _b] | T_i [K] | $\bar{H}_i(T_i)$ [kJ/kg] |
|------------------|---|-----------|--------------------------|
| Καύσιμο | | | |
| CO ₂ | | | |
| H ₂ O | | | |
| N ₂ | | | |
| O ₂ | | | |

$$\text{Άρα } h_R(t_L) [\text{kJ/kg}] = h_P(t_{ad}) [\text{kJ/kg}]$$

Ισοζύγιο ενέργειας στον φλογοθάλαμο:

Η φλόγα ανταλλάσσει με τα τοιχώματα το ποσό θερμότητας:

$$\dot{Q} = \varepsilon \times C_s \times \left[\left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \times F \quad \text{σχέση 2.5.4}$$

Τα καυσαέρια με ροή μάζας m_v ψύχονται έτσι ώστε να αποδώσουν το ποσό θερμότητας

$$\dot{Q} = c p_m \times m_v \times (T_{ad} - T_E) \quad \text{σχέση 2.5.5}$$

Το ισοζύγιο θερμότητας δίνει:

$$\dot{Q} = cp_m \times m_v \times (T_{ad} - T_E) = \varepsilon \times C_s \times \left[\left(\frac{\sqrt{T_{ad} \times T_E}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \times F$$

Επειδή $T_w \ll T_E$ ο όρος $(T_w/100)^4$ θεωρείται αμελητέος.

Από το παραπάνω ισοζύγιο προκύπτει η σχέση:

$$\left(\frac{T_E}{T_{ad}} \right)^2 + \frac{Ko}{\varepsilon} \left(\frac{T_E}{T_{ad}} \right) - \frac{Ko}{\varepsilon} = 0 \quad \text{σχέση 2.5.6}$$

όπου Ko είναι ο αριθμός Konakov ή Boltzmann, ο οποίος ισούται με

σχέση 2.5.7 πηγή: [6]

$$Ko = Bo = \frac{cp_m \times m_v \times 100}{C_s \times F \times \left(\frac{T_{ad}}{100} \right)^3}$$

όπου,

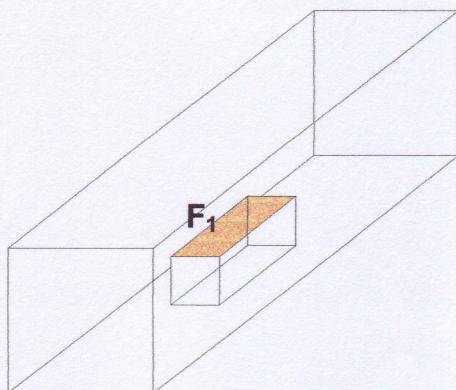
m_v [kg/s] (Η παροχή των καυσαερίων)

c_{p_m} [J/kgK] (Η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [°C])

T_{ad} 1828 [K] (Η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης)

C_s [W/m²K] (Παγκόσμια σταθερά ακτινοβολίας σωμάτων)

F_1 [m²] (Η επιφάνεια της φλόγας)



Υπολογισμός της θερμαινόμενης επιφάνειας του θαλάμου καύσης

Η συνολικά θερμαινόμενη επιφάνεια του θαλάμου καύσης είναι το άθροισμα των θερμαινόμενων επιφανειών των πλευρικών τοιχωμάτων και του κυλινδρικού

περιβλήματος.

Η θερμαινόμενη επιφάνεια του κυλινδρικού περιβλήματος (κελύφους) είναι:

$$F_2 = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2}$$

σχέση 2.5.8

όπου,

D [m] (Διάμετρος κυλινδρικού περιβλήματος)

l [m] (Μήκος κυλινδρικού περιβλήματος)

Άρα προκύπτει η θερμαινόμενη επιφάνεια του κυλινδρικού περιβλήματος

$$F_{κυλ} m^2$$

Άρα προκύπτει η συνολικά θερμαινόμενη επιφάνεια του θαλάμου καύσης

$$F_2 [m^2]$$

Η επιφάνεια της φλόγας είναι $F_1 m^2$

Επομένως η επιφάνεια της φλόγας καταλαμβάνει ένα ποσοστό του θαλάμου καύσης.

Γίνεται εκτίμηση της T_E [K]

Άρα προκύπτει ο αριθμός Konakov K_o

Για το συντελεστή εκπομπής ισχύει η σχέση:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_{2m}} - 1 \right) \frac{F_2}{F_1}} \quad \text{σχέση 2.5.9}$$

όπου,

ε_1 (Ο συντελεστής εκπομπής της φλόγας)

F_2/F_1 (Το ποσοστό της επιφάνειας του θαλάμου καύσης που καταλαμβάνει η φλόγα)

α_{2m} (Ο συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας των τοιχωμάτων)

Άρα προκύπτει ο συντελεστής εκπομπής ε

Λύνοντας την παρακάτω σχέση ως προς T_E προκύπτει :

$$\left(\frac{T_E}{T_{ad}}\right)^2 + \frac{Ko}{\varepsilon} \left(\frac{T_E}{T_{ad}}\right) - \frac{Ko}{\varepsilon} = 0 \quad \text{σχέση 2.5.10}$$

$$\frac{T_E}{T_{ad}} [K]$$

Λύνω την δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς τον όρο

Άρα προκύπτει η τιμή T_E σε [K], η οποία πρέπει να συμπίπτει με την αρχική υπόθεση.

Άρα τελικά θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης είναι T_E σε K.

2.6 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στον φλογοθάλαμο

Τα καυσαέρια ανταλλάζουν θερμότητα με τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης με ακτινοβολία και με συναγωγή.

Υπολογισμός θερμότητας που αποδίδεται από τα καυσαέρια με ακτινοβολία στο θάλαμο καύσης

Η προκύπτουσα συνολική ροή ακτινοβολούμενης ενέργειας (θερμοροή ακτινοβολίας) σε δύο επιφάνειες που έχουν ανταλλαγή ακτινοβολίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad \text{σχέση 2.6.1}$$

όπου,

$F [\text{m}^2]$ (Η επιφάνεια της φλόγας)

$T_1 [\text{K}]$ (Η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης)

$T_2 [\text{K}]$ (Η θερμοκρασία των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσης)

$C_{12} [\text{W/m}^2\text{K}]$ (Αριθμός ανταλλαγής ακτινοβολίας)

Ο αριθμός ανταλλαγής ακτινοβολίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{12} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \phi_{12} \cdot C_s \quad \text{σχέση 2.6.2}$$

όπου,

$C_s [\text{W/m}^2\text{K}]$

ε_1 (Συντελεστής εκπομπής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας)

ε_2 (Συντελεστής εκπομπής της «ίδιας» ακτινοβολίας)

φ_{12} (Αριθμός ακτινοβολίας ή γωνιακή σχέση ή συντελεστής μορφής)

Υπάρχουν δύο βασικές σχέσεις που συνδέουν τους συντελεστές μορφής:

$$F_1 \cdot \phi_{12} = F_2 \cdot \phi_{21} \quad \text{σχέση 2.6.3}$$

$$\phi_{11} + \phi_{12} + \phi_{13} + \dots + \phi_{ij} = 1 \quad \text{σχέση 2.6.4}$$

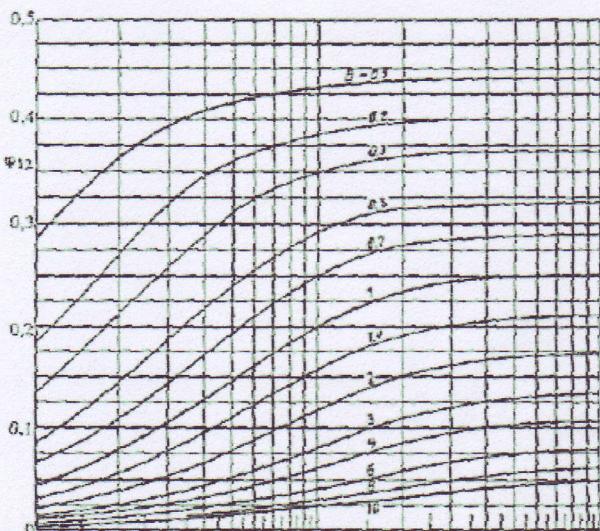
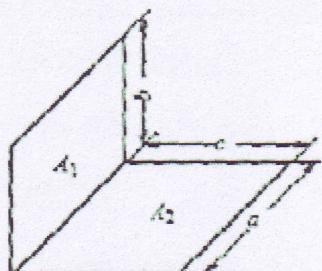
Από τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης θα επιλεγούν τα

$\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{14}, \varphi_{13}, \varphi_{15}$

Για παράδειγμα αν οι συντελεστές μορφής φ_{12} και φ_{14} είναι μεταξύ δύο καθέτων επιφανειών με κοινή ακμή λαμβάνονται από το διάγραμμα της εικόνας 1.

Είναι:

$B=b/a$ και $C=c/a$

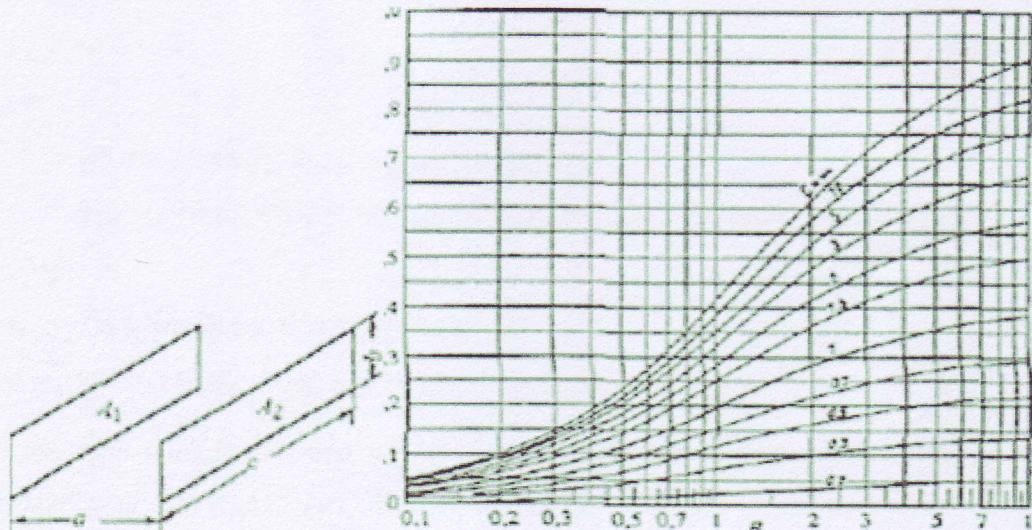


Εικόνα 1. Συντελεστής μορφής φ μεταξύ δύο καθέτων ορθογωνίων επιφανειών που έχουν κοινή ακμή.

Εάν οι συντελεστές μορφής φ_{16} είναι μεταξύ δύο παραλλήλων επιφανειών λαμβάνονται από το διάγραμμα της εικόνας 2.

Είναι:

$$B = b/a \text{ και } C = c/a$$



Εικόνα 2. Συντελεστής μορφής ϕ μεταξύ δύο παραλλήλων επιφανειών σε πεπερασμένη απόσταση μεταξύ τους.

Στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος για τις τιμές που βρέθηκαν:

Θα πρέπει να ισχύει

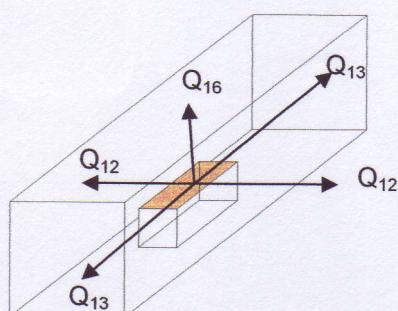
$$\phi_{11} + \phi_{12} + \phi_{13} + \phi_{14} + \phi_{15} + \phi_{16} = 1 \quad \text{σχέση 2.6.5}$$

Άρα προκύπτει $C_{12} [\text{W/m}^2\text{K}]$, $C_{13} [\text{W/m}^2\text{K}]$ και $C_{16} [\text{W/m}^2\text{K}]$

Άρα τελικά προκύπτει $\dot{Q}_{12} [kW]$, $\dot{Q}_{13} [kW]$ και $\dot{Q}_{16} [kW]$

Η συνολική θερμοροή ακτινοβολίας προς τις επιφάνειες του θαλάμου καύσης είναι:

$$\dot{Q}_{\pi\lambda} = 2\dot{Q}_{12} + 2\dot{Q}_{13} + \dot{Q}_{16} [kW]$$



Υπολογισμός θερμότητας που αποδίδεται από τα καυσαέρια με συναγωγή στο θάλαμο καύσης

Η θερμότητα που αποδίδεται με συναγωγή δίνεται από την σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{συν}} = K \cdot F \cdot \Delta\Theta_m \quad \text{σχέση 2.6.6}$$

όπου,

K (Ο συντελεστής θερμοπερατότητας)

F (Η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, δηλαδή η επιφάνεια του θαλάμου καύσης)

$\Delta\Theta_m$ (Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά)

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής των καυσαερίων α_1

Ο αριθμός Reynolds που είναι σημαντικός για την περιγραφή του πεδίου ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{w \times L}{v} = \frac{\rho \times w \times L}{n} \quad \text{σχέση 2.6.7}$$

όπου,

ρ [kg/m³] (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [°C])

n [Pas] (Το δυναμικό ιξώδες στη θερμοκρασία T_m [°C])

w [m/s] (Η ταχύτητα των καυσαερίων)

L [m] (Το μήκος περιφροής)

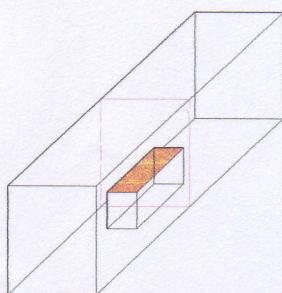
Το μήκος περιφροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L = \frac{A_s}{P} \quad \text{σχέση 2.6.8}$$

όπου,

A_s [m²] (Η επιφάνεια εναλλαγής)

P [m] (Η περίμετρος της προβολής του σώματος στη διεύθυνση της ροής)



Η ταχύτητα των καυσαερίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w = \frac{m_v}{\rho \times A}$$

σχέση 2.6.9

όπου,

m_v [kg/s] (Η παροχή των καυσαερίων)

ρ [kg/m³] (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [°C])

A [m²] (Η διατομή του θαλάμου καύσης)

Άρα προκύπτει το Re

Το κινηματικό ιξώδες είναι:

$$v = \frac{n}{\rho} [m^2 / s]$$

Ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας a που εκφράζει τη θερμική αδράνεια των σωμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times cp_m}$$

σχέση 2.6.10

όπου,

ρ [kg/m³] (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [°C])

λ [W/mK] (Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη θερμοκρασία T_m [°C])

c_p [J/kgK] (Η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [°C])

Άρα προκύπτει a [m²/s]

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Pr = \frac{v}{a}$$

σχέση 2.6.11

όπου,

v [m² / s] (Το κινηματικό ιξώδες)

a [m²/s] (Ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας)

Άρα προκύπτει Pr

Σε μία εξωτερική ροή το οριακό στρώμα είναι συνεχώς υπό ανάπτυξη, ενώ έξω από αυτό η ροή του ρευστού παραμένει ανεμπόδιστη. Για το λόγο αυτό στην περίπτωση της ροής γύρω από μια επίπεδη πλάκα ο αριθμός Nusselt στην περιοχή του στρωτού οριακού στρώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Nu_{L, lam} = \frac{0,664 \cdot \sqrt{\text{Pr} \cdot \text{Re}}}{\sqrt[6]{\text{Pr}}} \quad \text{σχέση 2.6.12}$$

Άρα προκύπτει $Nu_{L, lam}$

Ο αριθμός Nusselt στην περίπτωση του τυρβώδους οριακού στρώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Nu_{L, turb} = \frac{0,037 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}}{1 + 2,443 \cdot \text{Re}^{-0,1} \cdot (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad \text{σχέση 2.6.13}$$

Άρα προκύπτει $Nu_{L, turb}$

Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$Nu_L = Nu_{L, min} + \sqrt{Nu_{L, lam}^2 + Nu_{L, turb}^2} \quad \text{σχέση 2.6.14}$$

Άρα προκύπτει Nu_L

Ο συντελεστής συναγωγής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad \text{σχέση 2.6.15}$$

Άρα προκύπτει ο συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων κατά τη διαδρομή τους στο θάλαμο καύσης α_1 [W/m²K]

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής του νερού a_2
 Η μεταφορά θερμότητας στην περιοχή των δύο φάσεων μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς, δηλαδή με συναγωγή και με βρασμό. Οι συντελεστές βρασμού που δίνονται στη βιβλιογραφία έχουν παρθεί από πειράματα σε συσκευές χωρίς κυκλοφορία του ρευστού. Ο συντελεστής συναγωγής βρασμού του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$a_2 = m \cdot (t_w - t_b)^{n-1} \quad \text{σχέση 2.6.16}$$

όπου,

τι και ο εμπειρικοί εκθέτες, η τιμή των οποίων εξαρτάται από το είδος του υγρού, την

πίεση βρασμού και τη φύση της επιφάνειας του δοχείου.

$t_w [{}^{\circ}\text{C}]$ (Θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας σωλήνων)

$t_b [{}^{\circ}\text{C}]$ (Θερμοκρασία βρασμού)

Άρα προκύπτει $\alpha_b [\text{W/m}^2\text{K}]$.

| Οβεία | Πίεση psia | Συντελεστής | | | max Δt (°F) | $\alpha_h (\text{Btu}/\text{ft}^2 \text{ °F h})$ για Δt | | | | | κλίση σωλήνα |
|----------|---------------|---------------------|------|-----------|------------------------|---|-------|-------|-------|------|-----------------|
| | | m | m | πλάτος Δt | | 5 F | 10 F | 20 F | 30 F | 40 F | |
| Νερό | 14,7 | 14,3 | 3,14 | 5-40 | >10 | 450 | 2000 | — | — | — | HT |
| “ | 14,7 | 52 | 2,35 | 10-35 | 35 | — | 1200 | 2780 | 5100 | — | VT |
| “ | 14,7 | $1,7 \cdot 10^{-2}$ | 4,90 | 15-35 | 35 | — | — | 2000 | 9600 | — | W |
| “ | 383 | 605 | 2,82 | 5-30 | 30 | 1130 | 4000 | 14200 | 30000 | — | W |
| Οξυγόνο | 14,7 | 4,8 | 2,47 | 6-10 | >10 | — | 140 | — | — | — | VT |
| Αέρα | 14,7 | 1,9 | 2,67 | 6-12 | >12 | — | 90 | — | — | — | VT |
| Freon 12 | 60 | 0,49 | 3,82 | 12-20 | >20 | — | (320) | 2250 | — | — | HT |

Παρατηρήσεις:

VT = κατακόρυφος σωλήνας, HT=οριζόντιος σωλήνας, HP=οριζόντια πλάκα, W=σύρμα (ηλεκτρικής αντίστασης)

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{a_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{a_2} + ff_1 + ff_2 \quad \text{σχέση 2.6.17}$$

όπου,

$a_1 [\text{W/m}^2\text{K}]$ (Συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων)

$a_2 [\text{W/m}^2\text{K}]$ (Συντελεστής συναγωγής του νερού)

$s [\text{m}]$ (Πάχος των σωλήνων)

$\lambda [\text{W/mK}]$ (Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας)

$ff_1 [\text{m}^2\text{K/W}]$ (Συντελεστής ρύπανσης των καυσαερίων)

$ff_2 [\text{m}^2\text{K/W}]$ (Συντελεστής ρύπανσης του νερού τροφοδοσίας του λέβητα)

Άρα προκύπτει $K [\text{W/m}^2\text{K}]$

Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς

Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\Theta_m = \frac{\Delta\Theta_M - \Delta\Theta_\mu}{\ln \frac{\Delta\Theta_M}{\Delta\Theta_\mu}} = \frac{(\theta_1'' - \theta_2') - (\theta_1' - \theta_2'')}{\ln \frac{\theta_1'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2''}} \quad \text{σχέση 2.6.18}$$

όπου,

$\theta_1'' = 1555 [{}^{\circ}\text{C}]$ (Η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης)

$\theta_1' [{}^{\circ}\text{C}]$ (Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το φλογοθάλαμο)

$\theta_2'' [{}^{\circ}\text{C}]$ (Η θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού σε P barg)

$\theta_2' [{}^{\circ}\text{C}]$ (Η θερμοκρασία του νερού κορεσμένου νερού σε P barg)

Άρα προκύπτει $\Delta\Theta_m [{}^{\circ}\text{C}]$

Η θερμότητα που αποδίδεται με συναγωγή δίνεται από την σχέση:

$$\dot{Q}_{\sigma\nu} = K \cdot F \cdot \Delta\Theta_m \quad \text{σχέση 2.6.19}$$

όπου,

$K [\text{W/m}^2\text{K}]$ (Ο συντελεστής θερμοπερατότητας)

$F [\text{m}^2]$ (Η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, δηλαδή η επιφάνεια του θαλάμου καύσης)

$\Delta\Theta_m [{}^{\circ}\text{C}]$ (Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά)

Άρα προκύπτει $Q_{\sigma\nu} [\text{kW}]$

2.7 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στις δέσμες αυλών

Τα καυσαέρια αφού εξέλθουν από το θάλαμο καύσης, εισέρχονται στις δέσμες αυλών και εν συνεχείᾳ εξέρχονται από τον ατμολέβητα προς την καπνοδόχο.

Τα καυσαέρια ανταλλάζουν θερμότητα με τα τοιχώματα των σωλήνων μέσω συναγωγής. Στην περίπτωση που οι δέσμες αυλών είναι δύο, στην πρώτη δέσμη θεωρείται ότι η θερμοκρασία των καυσαερίων κατέρχεται στα 2/3 της συνολικής πτώσης της θερμοκρασίας των καυσαερίων από την έξοδο τους από τον φλοιοθάλαμο ως την έξοδό τους από τον ατμολέβητα. Επομένως η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδό τους από την πρώτη δέσμη αυλών T_D είναι:

$$T_D = T_E - \frac{2}{3} \times (T_E - T_A) \quad \text{σχέση 2.7.1}$$

όπου T_A είναι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον ατμολέβητα

Γίνεται η υπόθεση: $T_A [\text{K}]$

Άρα προκύπτει $T_D [\text{K}]$

Η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων στην πρώτη δέσμη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{m1} = \frac{T_E + T_D}{2} \quad \text{σχέση 2.7.2}$$

όπου,

$T_E [\text{K}]$ (Θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης)

$T_D [\text{K}]$ (Θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την πρώτη δέσμη σωλήνων)

Άρα προκύπτει $T_{m1} [{}^{\circ}\text{C}]$

Υπολογισμός επιφάνειας σωλήνων πρώτης δέσμης

| Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρώτης δέσμης σωλήνων | | |
|---|-----------------|----------------|
| Αριθμός σωλήνων | Z | |
| Εξωτερική διάμετρος σωλήνων | d _a | m |
| Πάχος σωλήνων | 2s | m |
| Εσωτερική διάμετρος σωλήνων | d _i | m |
| Υπολογιστική διάμετρος σωλήνων | d _m | m |
| Μήκος σωλήνων | L | m |
| Επιφάνεια σωλήνων | F _{σ1} | m ² |

Άρα προκύπτει:

$$F_{\sigma 1} = z \cdot \pi \cdot d_m \cdot L \quad [m^2] \quad \text{σχέση 2.7.3}$$

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής των καυσαερίων α₁

Ο αριθμός Reynolds που είναι σημαντικός για την περιγραφή του πεδίου ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{w \times d_i}{v} = \frac{\rho \times w \times d_i}{n} \quad \text{σχέση 2.7.4}$$

όπου,

di [m] (Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων)

ρ [kg/m³] (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [°C])

n [Pas] (Το δυναμικό ιξώδες στη θερμοκρασία T_m [°C])

w [m/s] (Η ταχύτητα των καυσαερίων στην πρώτη δέσμη σωλήνων)

Η ταχύτητα των καυσαερίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w = \frac{m_v}{\rho \times A} \quad \text{σχέση 2.7.5}$$

όπου,

m_v [kg/s] (Η παροχή των καυσαερίων)

ρ [kg/m³] (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [°C])

A [m²] (Η διατομή της πρώτης δέσμης σωλήνων)

Η διατομή των σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = z \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad \text{σχέση 2.7.6}$$

όπου,

z (Ο αριθμός των σωλήνων της πρώτης δέσμης)

d_i [m] (Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων)

Άρα προκύπτει Re

Το κινηματικό ιξώδες είναι:

$$v = \frac{n}{\rho} [m^2 / s] \quad \text{σχέση 2.7.7}$$

Ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας a που εκφράζει τη θερμική αδράνεια των σωμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times cp_m} \quad \text{σχέση 2.7.8}$$

όπου,

ρ [kg/m³] (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [0C])

λ [W/mK] (Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη θερμοκρασία T_m [0C]))

c_p [J/kgK] (Η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p των καυσαερίων στη θερμοκρασία T_m [0C]))

Άρα προκύπτει a [m^2/s]

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Pr = \frac{v}{\partial} \quad \text{σχέση 2.7.9}$$

όπου,

v [m^2 / s] (Το κινηματικό ιξώδες)

a [m^2/s] (Ο συντελεστής θερμικής διαλυτότητας)

Άρα προκύπτει Pr

Ο αριθμός Nusselt για τυρβώδη ροή μέσα σε σωλήνα κυκλικής διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$Nu_0 = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \times (Re - 1000) \times Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{di}{L} \right)^{2/3} \right] \quad \text{σχέση 2.7.10}$$

$$\xi = (1,82 \log_{10} Re - 1,64)^{-2}$$

$$Nu = Nu_0 \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.11}$$

Λόγω της περιορισμένης περιοχής θερμοκρασιών ισχύει:

$$\frac{Pr}{Pr_w} \approx 1$$

Άρα $Nu = Nu_0$

Ο συντελεστής συναγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{Nu \times \lambda}{di} \quad \text{σχέση 2.7.11}$$

όπου,

Nu (Αριθμός Nusselt)

λ [W/mK] (Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη θερμοκρασία T_m [0C])

d_i [m] (Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων)

Άρα προκύπτει ο συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων για την πρώτη δέσμη σωλήνων a_1 [W/m²K]

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής του νερού a_2

Η μεταφορά θερμότητας στην περιοχή των δύο φάσεων μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς, δηλαδή με συναγωγή και με βρασμό. Οι συντελεστές βρασμού που δίνονται στη βιβλιογραφία έχουν παρθεί από πειράματα σε συσκευές χωρίς κυκλοφορία του ρευστού. Ο συντελεστής συναγωγής βρασμού του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$a_2 = m \cdot (t_w - t_b)^{n-1} \quad \text{σχέση 2.7.12}$$

όπου,

μ και η εμπειρικοί εκθέτες, η τιμή των οποίων εξαρτάται από το είδος του υγρού, την πίεση βρασμού και τη φύση της επιφάνειας του δοχείου.

t_w [0C] (Θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας σωλήνων)

t_b [0C] (Θερμοκρασία βρασμού)

Άρα προκύπτει a_b [W/m²K].

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + ff_1 + ff_2$$

σχέση 2.7.13

όπου,

α_1 [W/m²K] (Συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων)

α_2 [W/m²K] (Συντελεστής συναγωγής του νερού)

s [m] (Πάχος των σωλήνων)

λ [W/mK] (Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας)

ff_1 [m²K/W] (Συντελεστής ρύπανσης των καυσαερίων)

ff_2 [m²K/W] (Συντελεστής ρύπανσης του νερού τροφοδοσίας του λέβητα)

Άρα προκύπτει K [W/m²K]

Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς

Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\Theta_m = \frac{\Delta\Theta_M - \Delta\Theta_\mu}{\ln \frac{\Delta\Theta_M}{\Delta\Theta_\mu}} = \frac{(\theta_1'' - \theta_2') - (\theta_1' - \theta_2'')}{\ln \frac{\theta_1'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2''}}$$

σχέση 2.7.14

όπου,

θ_1'' [⁰C] (Η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στην πρώτη δέσμη)

θ_1' [⁰C] (Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την πρώτη δέσμη)

θ_2'' [⁰C] (Η θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού σε P barg)

θ_2' [⁰C] (Η θερμοκρασία του κορεσμένου νερού σε P barg)

Άρα προκύπτει $\Delta\Theta_m$ [⁰C]

Η θερμότητα που αποδίδεται με συναγωγή δίνεται από την σχέση:

$$\dot{Q}_{\sigma\nu\nu} = K \cdot F \cdot \Delta\Theta_m$$

σχέση 2.7.15

όπου,

K [W/m²K] (Ο συντελεστής θερμοπερατότητας)

F [m²] (Η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, δηλαδή η επιφάνεια του θαλάμου καύσης)

$\Delta\Theta_m$ [⁰C] (Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά)

Άρα προκύπτει $Q_{\sigma\nu\nu}$ [kW]

2.8 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών του ατμολέβητα

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό των ατμολεβήτων, είναι η ειδική φόρτιση της θερμαντικής επιφάνειας, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_D = \frac{m_D}{F_T} \quad \text{σχέση 2.8.1}$$

όπου,

m_D [kg/h] (Η παραγωγή ατμού)

F_T [m^2] (Η συνολική θερμαντική επιφάνεια του λέβητα)

Άρα προκύπτει η ειδική φόρτιση της θερμαντικής επιφάνειας q_D [kg/ m^2 h]

Εκτός από την ειδική φόρτιση της θερμαντικής επιφάνειας υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη, όπως είναι η θερμική φόρτιση όγκου, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_B = \frac{m_b \cdot H_u}{V_B} \quad \text{σχέση 2.8.2}$$

όπου,

m_b [kg/h] (Η παροχή του καυσίμου)

$H_u=4150$ [kcal/kg] (Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου)

V_B [m^3] (Ο όγκος του θαλάμου καύσης)

Άρα προκύπτει η θερμική φόρτιση όγκου q_B [MW/ m^3]

Στους λέβητες με εστία σχάρας χρησιμοποιείται επίσης η θερμική φόρτιση διατομής, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_A = \frac{m_b \cdot H_u}{A} \quad \text{σχέση 2.8.3}$$

όπου,

m_b [kg/h] (Η παροχή του καυσίμου)

$H_u=4150$ [kcal/kg] (Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου)

A [m^2] (Η διατομή του θαλάμου καύσης)

Άρα προκύπτει η θερμική φόρτιση διατομής q_A [MW/ m^2].

Κεφάλαιο 3

Υπολογισμός αντοχής στοιχείων ατμολέβητα

Η μελέτη υπολογισμού των δομικών στοιχείων του ατμολέβητα εκπονήται βάσει των υπολογιστικών και κατασκευαστικών οδηγιών του προτύπου EUROPEAN STANDARD EN 12953-3. Το πρότυπο αφορά τον υπολογισμό και σχεδιασμό συσκευών διεργασιών καθώς και των δομικών τους στοιχείων ακολουθώντας τους κανόνες της επιστήμης και της τεχνικής. Κατά τον υπολογισμό λαμβάνονται υπόψη συντελεστές ασφαλείας και ποιότητας, καθώς και κατασκευαστικές προσαυξήσεις. Σαν στόχο ο υπολογισμός αντοχής έχει την εξένυρεση των παχών των διάφορων δομικών στοιχείων του ατμολέβητα.

3.1 Θερμοκρασία υπολογισμού

3.1.1 Θερμοκρασία κορεσμού βάσει της πίεσης λειτουργίας του λέβητα

Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού) επιλέγεται βάσει της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης του λέβητα.

| | |
|----------------------------|-----------------------------|
| Πίεση λειτουργίας [barg] | Θερμοκρασία κορεσμού [°C] |
|----------------------------|-----------------------------|

3.1.2 Κυλινδρικό περίβλημα

Για το κυλινδρικό περίβλημα η θερμοκρασία υπολογισμού βρίσκεται από τη σχέση

$$t_c = t_s + 4e + 15$$

όπου είναι το πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος

3.1.3 Σωλήνες

Η θερμοκρασία υπολογισμού για τους σωλήνες βρίσκεται από τη σχέση

$$t_c = t_s + 25$$

3.1.4 Κυκλικά καλύμματα

Η θερμοκρασία υπολογισμού για τα κυκλικά καλύμματα βρίσκεται από τη σχέση

$$t_c = t_s + 50$$

3.2 Υπολογισμός πάχους κυλινδρικού περιβλήματος

Το απαιτούμενο πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις

$$e_{sa} = e_{cs} + c_1 + c_2$$

σχέση (7.1-2)

όπου,

$c_1 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{cs} = \frac{p_c \cdot d_{os}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot v + 2 \cdot p_c} \quad \text{σχέση (7.2-2)}$$

2) όπου:

| | |
|----------|---|
| e_{cs} | Απαιτούμενο πάχος του κελύφους χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| p_c | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{os} | Εξωτερική διάμετρος του κελύφους χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(Rp/1,5, Rm/2,4)$ [N/mm^2] |
| V | Συντελεστής ποιότητας συγκολλήσεων |

Για το κυλινδρικό περίβλημα επιλέγουμε συνήθως το υλικό P265 GH (σύμφωνα με το πρότυπο EN 10028-3)

Η θερμοκρασία υπολογισμού βρίσκεται από τη σχέση

$$t_c = t_s + 4e + 15 \text{ [} ^\circ \text{C]}$$

Επιλέγουμε θερμοκρασία αναφοράς σε $[^\circ \text{C}]$

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

i) Rp για υλικό κατασκευής P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 4 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει Rp/1,5

ii) Rm για υλικό κατασκευής P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 3 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει Rm/2,4

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(Rp/1,5, Rm/2,4)$ σε $[\text{N/mm}^2]$

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cs} | c_1 | c_2 | e_{sa} | Επιλεγόμενο πάχος κελύφους |
|----------|-------|-------|----------|----------------------------|
| | 1 | 1 | | |

3.3 Υπολογισμός πάχους σωλήνων που υπόκεινται σε εξωτερική υπερπίεση

Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση (12.1-1) ή από τον πίνακα (12.1-1)

$$e = e_{ct} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (12.1-1)}$$

όπου,

$c_1 = 1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος των σωλήνων χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{ct} = \frac{P \cdot d_0}{1,6 \cdot f} \quad \text{σχέση (12.1-2)}$$

όπου:

| | |
|----------|---|
| e_{cs} | Απαιτούμενο πάχος των σωλήνων χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| P | Πίεση υπολογισμού [N/mm ²] |
| d_0 | Εξωτερική διάμετρος των σωλήνων [mm] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του υλικού min (Rp/1,5 , Rm/2,4) [N/mm ²] |

Για τους σωλήνες επιλέγουμε συνύθως το υλικό St 35.8 σύμφωνα με το πρότυπο DIN 17 175 Η θερμοκρασία υπολογισμού είναι

$$t_c = t_s + 25 \quad [{}^{\circ}\text{C}]$$

Επιλέγουμε θερμοκρασία αναφοράς σε [{}^{\circ}\text{C}]

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

i) Rp για υλικό St35.8 στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 6 του DIN 17 175)

Άρα προκύπτει Rp/1,5

ii) Rm για υλικό St35.8 στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 5 του DIN 17 175)

Άρα προκύπτει Rm/2,4

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι min(Rp/1,5 , Rm/2,4) [N/mm²]

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος των σωλήνων συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cs} | c_1 | c_2 | e_{sa} | Επιλεγόμενο πάχος σωλήνων |
|----------|-------|-------|----------|---------------------------|
| | 1 | 1 | | |

3.3.1 Απόσταση μεταξύ των σωλήνων

Θα πρέπει από το κατασκευαστικό σχέδιο του λέβητα να προκύπτει η απόσταση μεταξύ των σωλήνων να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση που προκύπτει από τη σχέση

$0,125xd_0+7$ [mm] 3.4 Υπολογισμός πάχους πλευρικών σωλήνων που υπόκεινται σε εξωτερική υπερπίεση

Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση (12.1-1) ή από τον πίνακα (12.1-1)

$$e = e_{ct} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (12.1-1)}$$

όπου,

$c_1 = 1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος των σωλήνων χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{ct} = \frac{P \cdot d_0}{1,6 \cdot f} \quad \text{σχέση (12.1-2)}$$

όπου:

| | |
|----------|--|
| e_{cs} | Απαιτούμενο πάχος των σωλήνων χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| P | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_0 | Εξωτερική διάμετρος των σωλήνων [mm] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |

Για τους πλευρικούς σωλήνες επιλέγουμε συνήθως το υλικό P265 GH σύμφωνα με το πρότυπο EN 10028-3

Η θερμοκρασία υπολογισμού είναι

$$t_c = t_s + 4e + 15 \quad [{}^\circ C]$$

Επιλέγουμε θερμοκρασία αναφοράς [${}^\circ C$]

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

i) R_p για υλικό κατασκευής P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 4 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει $R_p/1,5$

ii) R_m για υλικό κατασκευής P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 3 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει $R_m/2,4$

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2]

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος των σωλήνων συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cs} | c_1 | c_2 | e_{sa} | Επιλεγόμενο πάχος σωλήνων |
|----------|-------|-------|----------|---------------------------|
| | 1 | 1 | | |

3.5. Υπολογισμός πάχους θυρίδας επιθεώρησης που υπόκειται σε εξωτερική υπερπίεση

Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος της θυρίδας επιθεώρησης υπολογίζεται από τη σχέση (12.1-1) ή από τον πίνακα (12.1-1)

$$e = e_{ct} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (12.1-1)}$$

όπου,

$c_1 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας

και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος της θυρίδας επιθεώρησης χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{ct} = \frac{P \cdot d_o}{1,6 \cdot f} \quad \text{σχέση (12.1-2)}$$

όπου:

| | |
|----------|---|
| e_{cs} | Απαιτούμενο πάχος των σωλήνων χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| P | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_o | Εξωτερική διάμετρος της θυρίδας [mm] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |

Για την θυρίδα επιθεώρησης επιλέγουμε συνήθως το υλικό P265 GH σύμφωνα με το πρότυπο EN 10028-3

Η θερμοκρασία υπολογισμού είναι

$$t_c = t_s + 4e + 15 \text{ [} ^\circ \text{C]}$$

επιλέγουμε θερμοκρασία αναφοράς [$^\circ \text{C}$]

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

- i) R_p για υλικό κατασκευής P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 4 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει $R_p/1,5$

- ii) R_m για υλικό κατασκευής P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 3 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει $R_m/2,4$

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2]

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος της θυρίδας επιθεώρησης συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cs} | c_1 | c_2 | e_{sa} | Επιλεγόμενο πάχος θυρίδας επιθεώρησης |
|----------|-------|-------|----------|---------------------------------------|
| | 1 | 1 | | |

3.6 Υπολογισμός πάχους κυκλικών καλυμμάτων

Τα κυκλικά καλύμματα (εμπρόσθιο και οπίσθιο) είναι συνήθως επίπεδα. Οι κυκλικοί επίπεδοι δίσκοι είναι αμοιβαία στηριγμένοι μέσω των σωλήνων και του κυλινδρικού περιβλήματος. Το απαιτούμενο πάχος των κυκλικών επιπέδων δίσκων υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{pa} = e_{ch} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (10.2-1)}$$

όπου,

$c_1 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος των κυκλικών επιπέδων δίσκων χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{ch} = c_4 \cdot b \cdot y \cdot \sqrt{\frac{p_c}{f}} \quad \text{σχέση (10.2-2)}$$

όπου,

$c_4 = 0,36$ γιατί τα κυκλικά καλύμματα είναι επίπεδα, συγκολλημένα και από τις δύο πλευρές και ο λόγος του πάχους των καλυμμάτων προς το πάχος των κελύφους είναι $e_h/e_s = 1,14$ πίνακας (10.2-1)

$y = 1$ αν υπάρχουν τέσσερις αντιστηρίξεις

$b \text{ mm}$ είναι η υπολογιστική διάμετρος, δηλαδή η διάμετρος του μεγαλύτερου κύκλου που μπορεί να εγγραφεί στο αδιάτρητο τμήμα του δίσκου

| | | |
|-------|--|--|
| c_4 | | Συντελεστής |
| B | | Υπολογιστική διάμετρος [mm] |
| y | | Συντελεστής |
| p_c | | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| f | | Σταθερά αντοχής του υλικού min ($R_p/1,5$, $R_m/2,4$) [N/mm^2] |

Για τα επίπεδα κυκλικά καλύμματα επιλέγουμε συνήθως το υλικό P265 GH σύμφωνα με το πρότυπο EN 10028-3

Επιλέγουμε θερμοκρασία αναφοράς [${}^0\text{C}$]

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

i) Rp για υλικό P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 4 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει Rp/1,5

ii) Rm για υλικό P265 GH στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 5 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει Rm/2,4

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(R_p/1,5, R_m/2,4) [\text{N/mm}^2]$

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος των επιπέδων κυκλικών καλυμμάτων συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{ch} | c_1 | c_2 | e_{pa} | Επιλεγόμενο πάχος επιπέδων κυκλικών καλυμμάτων |
|----------|-------|-------|----------|--|
| | 1 | 1 | | |

3.7 Υπολογισμός πάχους επιπέδων πλευρικών τοιχωμάτων

Το απαραίτητο πάχος σ επιπέδων δίσκων στερεωμένων με αμφιδέτες, ομοιόμορφα κατανεμημένων, σε όλη την επιφάνεια που καταπονείται από την πίεση είναι

$$e_{pp} = C_3 \cdot \sqrt{(t_1^2 + t_2^2) \cdot \frac{P \cdot S}{K}}$$

όπου,

| | | |
|-------|---|---|
| C_3 | | Συντελεστής υπολογισμού επιπέδων δίσκων στηριγμένων με συγκολλημένους αμφιδέτες |
| P | | Πίεση υπολογισμού $[\text{N/mm}^2]$ |
| t_1 | | Οριζόντια απόσταση μεταξύ των αμφιδετών $[\text{mm}]$ |
| t_2 | | Κάθετη απόσταση μεταξύ των αμφιδετών $[\text{mm}]$ |
| S | 2 | Συντελεστής ασφάλειας |
| K | | Σταθερά αντοχής του υλικού $[\text{N/mm}^2]$ |

Άρα προκύπτει το πάχος των επιπέδων πλευρικών τοιχωμάτων e_{pp} $[\text{mm}]$.

Το τελικό πάχος των επιπέδων πλευρικών τοιχωμάτων τυποποιείται.

3.8 Υπολογισμός ανοιγμάτων στο κυλινδρικό περίβλημα

Η μεγαλύτερη δυνατή εξωτερική διάμετρος d_{ob} ενός μη ενισχυμένου ανοίγματος υπολογίζεται από τη σχέση

$$d_{ob\ max} = 2 \cdot \left(\frac{l_{rs}}{v_a} - l_{rs} \right) \quad \text{σχέση (8.2-2)}$$

όπου,

$$v_a = \frac{p_c \cdot d_{rs}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot e_{rs}} \quad \text{σχέση (8.2-1)}$$

και

$$l_{rs} = \sqrt{(d_{rs} + e_{rs}) \cdot e_{rs}} \quad \text{σχέση (8.1-1)}$$

Άρα

| | |
|----------|---------------------------------------|
| l_{rs} | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| e_{rs} | Πάχος κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| d_{is} | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |

| | |
|---------------|--|
| v_a | Συντελεστής εξασθένισης |
| p_c | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{is} | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |
| e_{rs} | Πάχος κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| $d_{ob\ max}$ | Η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος ενός μη ενισχυμένου ανοίγματος [mm] |
| l_{rs} | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| v_a | Συντελεστής εξασθένισης |

Συνεπώς, το μοναδικό άνοιγμα του κυλινδρικού περιβλήματος το οποίο χρειάζεται ενίσχυση είναι η ελλειπτική οπή (ανθρωποθυρίδα).

Ο λόγος του μεγάλου προς το μικρό άξονα πρέπει να είναι μικρότερος από 1,5. Για τον υπολογισμό θα ληφθεί ως διάμετρος η διάσταση του μικρού άξονα της έλλειψης.

Για την ενίσχυση της ανθρωποθυρίδας επιλέγεται συνήθως ενισχυτικός δακτύλιος από υλικό P265 GH με πάχος e_{rp} [mm] και ισοδύναμο μήκος περιστομίου l_{rs}

| | |
|-------------------|--|
| l_{rs} | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| $e=e_{rs}+e_{rp}$ | Συνολικό πάχος κελύφους και ενισχυτικού δακτυλίου [mm] |
| d_{is} | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |

| | |
|-------------------|--|
| v_a | Συντελεστής εξασθένισης |
| p_c | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{is} | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |
| $e=e_{rs}+e_{rp}$ | Συνολικό πάχος κελύφους και ενισχυτικού δακτυλίου [mm] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| $d_{ob\ max}$ | Η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος ενός μη ενισχυμένου ανοίγματος [mm] |
| l_{rs} | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| v_a | Συντελεστής εξασθένισης |

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι $d_{ob \ max}$ [mm], το οποίο θα πρέπει να είναι ασφαλώς μεγαλύτερο από τη διάμετρο της ανθρωποθυρίδας d [mm].

Το απαιτούμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{sb} = e_{cb} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (7.1-2)}$$

όπου,

$c_1 = 1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{cb} = \frac{p_c \cdot d_{ob}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot v + 2 \cdot p_c} \quad \text{σχέση (7.2-2)}$$

όπου:

| | | |
|----------|--|--|
| e_{cb} | | Απαιτούμενο πάχος του κελύφους χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| p_c | | Πίεση υπολογισμού [N/mm ²] |
| d_{ob} | | Εξωτερική διάμετρος της ανθρωποθυρίδας χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| f_s | | Σταθερά αντοχής του υλικού min (Rp/1,5, Rm/2,4) [N/mm ²] |
| V | | Συντελεστής ποιότητας συγκολλήσεων |

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cb} | c_1 | c_2 | e_{sb} | Επιλεγόμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας |
|----------|-------|-------|----------|--------------------------------------|
| | 1 | 1 | | |

Επίσης, θα πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση του ελάχιστου πάχους ενός περιστομίου, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$\min e_{cb} = 0,015 \times d_{ob} + 3,2 \text{ [mm]} \quad \text{σχέση (8.3-1)}$$

Επίσης, πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση της καταπόνησης

$$f_a = p_c \cdot \left(\frac{A_p}{A_{fs} + A_{fb} + 0,7 \cdot A_{fp}} + \frac{1}{2} \right) \leq f_s \quad \text{σχέση (8.3-6) για } \Psi=0^0$$

όπου:

| | |
|-------|---|
| f_a | Πραγματική φόρτιση [N/mm ²] |
| p_c | Πίεση υπολογισμού [N/mm ²] |
| A_p | Περιοχή που καταπονείται από την πίεση [mm ²] |

| | |
|----------|---|
| A_{fs} | Περιοχή πίεσης του κελύφου [mm^2] |
| A_{fp} | Περιοχή πίεσης του ενισχυτικού δακτυλίου [mm^2] |
| A_{fb} | Περιοχή πίεσης του περιστομίου [mm^2] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| e_{rs} | Πάχος κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |

Για τον υπολογισμό του A_p θα υπολογίσουμε το l_{rb} από τη σχέση

$$l_{rb} = \sqrt{(d_{rb} + e_{rb}) \cdot e_{rb}} \text{ mm} \quad \text{σχέση (8.1-2)}$$

Από τα περιστόμια θα εξετάσουμε μόνο αυτό με το μεγαλύτερο άνοιγμα.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί για αυτό και για τα μικρότερα ανοίγματα δεν απαιτείται ενισχυτικός δακτύλιος.

Το απαιτούμενο πάχος του συγκεκριμένου περιστομίου συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{sb} = e_{cb} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (7.1-2)}$$

όπου,

$c_1 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος του συγκεκριμένου περιστομίου χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{cb} = \frac{p_c \cdot d_{ob}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot v + 2 \cdot p_c} \quad \text{σχέση (7.2-2)}$$

όπου:

| | | |
|----------|---|---|
| e_{cb} | | Απαιτούμενο πάχος του περιστομίου χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| p_c | | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{ob} | | Εξωτερική διάμετρος του περιστομίου χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| f_s | | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| V | 1 | Συντελεστής ποιότητας συγκολλήσεων |

Για το συγκεκριμένο περιστόμιο επιλέγουμε συνήθως το υλικό St 35.8 σύμφωνα με το πρότυπο DIN 17 175

Επιλέγουμε θερμοκρασία αναφοράς σε $[{}^0\text{C}]$

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

- i) R_p για υλικό κατασκευής St 35.8 στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 6 του DIN 17 175)

Άρα προκύπτει $R_p/1,5$

ii) Rm για υλικό κατασκευής St 35.8 στη θερμοκρασία αναφοράς (πίνακας 5 του DIN 17175)
Άρα προκύπτει Rm/2,4

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(Rp/1,5, Rm/2,4)$ [N/mm²]

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος αυτού του περιστομίου συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cb} | c_1 | c_2 | e_{sb} | Επιλεγόμενο πάχος για το συγκεκριμένο περιστόμιο |
|----------|-------|-------|----------|--|
| | 1 | 1 | | |

Επίσης, πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση του ελάχιστου πάχους ενός περιστομίου, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$\min e_{cb} = 0,015 \times d_{ob} + 3,2 \text{ [mm]} \quad \text{σχέση (8.3-1)}$$

Επίσης, πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση της καταπόνησης για το περιστόμιο με d_{ob}

$$f_a = \frac{p_c \cdot (2 \cdot A_p + A_{fs} + A_{fb})}{2 \cdot \left(A_{fs} + \frac{f_b}{f_s} \cdot A_{fb} \right)} \leq f_s \quad \text{σχέση (8.3-4)}$$

όπου:

| | |
|----------|---|
| f_a | Πραγματική φόρτιση [N/mm ²] |
| p_c | Πίεση υπολογισμού [N/mm ²] |
| A_p | Περιοχή που καταπονείται από την πίεση [mm ²] |
| A_{fs} | Περιοχή πίεσης του κελύφους [mm ²] |
| A_{fb} | Περιοχή πίεσης του περιστομίου [mm ²] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του κελύφους $\min(Rp/1,5, Rm/2,4)$ [N/mm ²] |
| f_b | Σταθερά αντοχής του περιστομίου $\min(Rp/1,5, Rm/2,4)$ [N/mm ²] |

Για τον υπολογισμό του A_{fs} θα υπολογίσουμε το l_{rs} από τη σχέση

$$l_{rs} = \sqrt{(d_{rs} + e_{rs}) \cdot e_{rs}} \text{ mm} \quad \text{σχέση (8.1-1)}$$

Για τον υπολογισμό του A_p υπολογίσαμε τα l_{rb} και l_{rbi} από τις σχέσεις

$$l_{rb} = \sqrt{(d_{rb} + e_{rb}) \cdot e_{rb}} \text{ mm} \quad \text{σχέση (8.1-2)}$$

$$l_{rbi} = 0,5 \cdot \sqrt{(d_{rb} + e_{rb}) \cdot e_{rb}} \text{ mm} \quad \text{σχέση (8.1-3)}$$

Ο συντελεστής εξασθένισης του συγκεκριμένου ανοίγματος στο κυλινδρικό περίβλημα υπολογίζεται από τη σχέση

$$v_b = \frac{2 \cdot l_{rs}}{(2 \cdot l_{rs} + d_{ob})} \leq 1 \quad \text{σχέση (8.2-5)}$$

Επίσης, πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση της καταπόνησης

$$f_{ab} = \frac{p_c}{1,5} \cdot \left(\frac{d_{is} + e_{rs}}{2 \cdot e_{rs}} + 0,2 \cdot \frac{d_{ib} + e_{rb}}{e_{rb}} \cdot \sqrt{\frac{d_{is} + e_{rs}}{e_{rs}}} \right) \leq \min(f_s, f_b) \quad \text{σχέση (8.3-10)}$$

όπου:

| | |
|----------|--|
| f_{ab} | Πραγματική φόρτιση [N/mm^2] |
| f_s | Σταθερά αντοχής του κελύφους $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| f_b | Σταθερά αντοχής του περιστομίου $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| p_c | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{is} | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |
| e_{rs} | Πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| d_{ib} | Εσωτερική διάμετρος του περιστομίου [mm] |
| e_{rb} | Πάχος του περιστομίου [mm] |

Γέλος, πρέπει να υπολογιστεί η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ανοιγμάτων έτσι ώστε όλα τα ανοίγματα να θεωρούνται ως μεμονωμένα.

Για όλα τα ανοίγματα πρέπει να ικανοποιείται η εξής συνθήκη

$$P_\phi \geq \frac{\left(\frac{d_{ib1}}{2} + e_{rb1} \right)}{\cos \Psi_1} + \frac{\left(\frac{d_{ib2}}{2} + e_{rb2} \right)}{\cos \Psi_2} + 2 \cdot \sqrt{(d_{is} + e_{rs}) \cdot e_{rs}} \quad \text{σχέση (8.1-4)}$$

Για την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών περιστομίων

όπου:

| | |
|---------------|--|
| P_ϕ | Η ελάχιστη απαπούμενη απόσταση από κέντρο σε κέντρο δύο διαδοχικών ανοιγμάτων [mm] |
| d_{ib1} | Εσωτερική διάμετρος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| e_{rb1} | Πάχος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| d_{ib2} | Εσωτερική διάμετρος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| e_{rb2} | Πάχος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| d_{is} | Εσωτερική διάμετρος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| e_{rs} | Πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| $\cos \Psi_1$ | Γωνία κλίσης του πρώτου περιστομίου |
| $\cos \Psi_2$ | Γωνία κλίσης του δεύτερου περιστομίου |

Άρα επιλέγουμε P_ϕ [mm]

3.9 Υπολογισμός εμβαδού ορθογωνικής διατομής αντιστηρίξεων

Οι αντιστηρίξεις είναι επίπεδες πλάκες ορθογωνικής διατομής. Το υλικό κατασκευής τους είναι συνήθως τυποποιημένος χάλυβας St 37.1 και συγκολλούνται στο κυλινδρικό περιβλήμα (κέλυφος) και στα επίπεδα κυκλικά καλύμματα.

Αρχικά υπολογίζεται η δύναμη που ασκείται στις αντιστηρίξεις F_R με βάση την επιφάνεια φόρτισης A_R που αντιστοιχεί σε μία αντιστήριξη

$$F_R = P \cdot A_R = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot P}{4}$$

όπου,

| | |
|-------|--|
| F_R | Δύναμη που καταπονεί τις αντιστηρίξεις [N] |
| p_c | Πίεση λειτουργίας [N/mm ²] |
| D_i | Υπολογιστική διάμετρος [mm] |

Άρα προκύπτει F_R [N]

Το εμβαδόν της ορθογωνικής διατομής της κάθε αντιστήριξης προκύπτει από τη σχέση

$$A \geq \frac{F \cdot S}{\sigma_{0,2}}$$

όπου,

| | | |
|----------------|---|--|
| F_R | | Δύναμη που καταπονεί τις αντιστηρίξεις [N] |
| S | 3 | Συντελεστής ασφάλειας |
| $\sigma_{0,2}$ | | Όριο ροής του υλικού [mm] |

Άρα προκύπτει το ελάχιστο εμβαδό της ορθογωνικής διατομής των αντιστηρίξεων A_p [mm²].

Η ελάχιστη διατομή μιας αντιστήριξης υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_g \cdot h = \frac{f_G \cdot W}{f \cdot \sin V} \quad \text{σχέση (10.2-4)}$$

Επίσης, πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

$e_g \leq 1,5$ x πάχος κυλινδρικού περιβλήματος

$e_g \geq 0,5$ x πάχος κυλινδρικού περιβλήματος

$e_g \geq 0,5$ x πάχος κυκλικού καλύμματος (καθρέπτη)

Η γωνία μεταξύ αντιστήριξης και καθρέπτη πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από 60°.

όπου,

| e_g | Πάχος της αντιστήριξης [N] |
|-------|--|
| h | Ελάχιστο απαιτούμενο πλάτος της αντιστήριξης [mm] |
| V | Γωνία μεταξύ αντιστήριξης και καθρέπτη [°] |
| f | Σταθερά αντοχής του υλικού του καθρέπτη [N/mm ²] |
| f_G | Σταθερά αντοχής του υλικού της αντιστήριξης [N/mm ²] |
| W | Ασκούμενο φορτίο [N] |

3.10 Υπολογισμός διαμέτρου αμφιδετών

Οι αμφιδέτες είναι συμπαγείς κυλινδρικές μάζες. Το υλικό κατασκευής τους είναι συνήθως τυποποιημένος χάλυβας St 37-1. Αρχικά υπολογίζεται η δύναμη που ασκείται στους αμφιδέτες F_R με βάση την επιφάνεια φόρτισης A_R που αντιστοιχεί σε κάθε αμφιδέτη

$$F_R = P \cdot A_R$$

όπου,

| | |
|-------|--|
| F_R | Δύναμη που καταπονεί τους αμφιδέτες [N] |
| p_c | Πίεση λειτουργίας [N/mm^2] |
| A_R | Επιφάνεια φόρτισης που αντιστοιχεί σε κάθε αμφιδέτη [mm^2] |

Άρα προκύπτει F_R [N]

Το εμβαδό της κυκλικής διατομής του κάθε αμφιδέτη προκύπτει από τη σχέση

$$A \geq \frac{F \cdot S}{\sigma_{0,2}}$$

όπου,

| | | |
|----------------|---|---|
| F_R | | Δύναμη που καταπονεί τους αμφιδέτες [N] |
| S | 3 | Συντελεστής ασφάλειας |
| $\sigma_{0,2}$ | | Όριο ροής του υλικού [mm] |

Άρα προκύπτει το εμβαδό της κυκλικής διατομής των αμφιδετών A [mm^2].

Η διάμετρος των αμφιδετών προκύπτει από τη σχέση

$$d \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot S}{\pi \cdot \sigma_{0,2}}}$$

όπου,

| | | |
|----------------|---|---|
| F_R | | Δύναμη που καταπονεί τους αμφιδέτες [N] |
| S | 3 | Συντελεστής ασφάλειας |
| $\sigma_{0,2}$ | | Όριο ροής του υλικού [mm] |

Άρα προκύπτει η διάμετρος της κυκλικής διατομής των αμφιδετών.

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή

Δεδομένα υπολογισμού:

Καύσιμο: Στελέχη αραβοσίτου

Πίεση: 10barg

Παραγωγή ατμού: 6tn/h

Θερμοκρασία εισόδου νερού: 80 °C

Κορεσμένος ατμός

Η στοιχειακή ανάλυση του καύσιμου είναι C=0.44, H=0.054, O=0.389, N=0.0062,

S=0.001, A=0.047, W=0.061

Ο λόγος αέρα είναι $\lambda=1.3$

Η θερμογόνος δύναμη είναι $H_u=4150 \text{ kcal/kg}$

Ο τύπος εστίας καύσης που επιλέγεται για στελέχη αραβοσίτου είναι κινούμενη σχάρα με διαστάσεις 4X1,954 m.

Η στοιχειομετρία του καυσίμου αναφέρεται αναλυτικότερα στο παράρτημα [1]

4.1 Υπολογισμός της παροχής του καυσίμου

Η συνολική ισχύς του ατμολέβητα είναι:

$$P = m_D \cdot (h_D - h_v) \quad \text{σχέση 2.1.1}$$

όπου,

$m_D=1,66[\text{kg/s}]$ (Η παραγωγή του ατμού)

$h_D=2779,7[\text{kJ/kg}]$ (Η ενθαλπία του ατμού στην πίεση λειτουργίας, $P=10 \text{ barg}$)

$h_v=334,92[\text{kJ/kg}]$ (Η ενθαλπία του νερού στη θερμοκρασία εισόδου, $T=80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Άρα προκύπτει η συνολική ισχύς του ατμολέβητα $P=4058,4[\text{KW}]$ ή $P=4,1[\text{MW}]$

Η θερμογόνος δύναμη είναι γνωστή και δίνεται $H_u=4150 \text{ [kcal/kg]}$

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του λέβητα ισούται με το πηλίκο της ωφέλιμης ισχύος διά την προσδιδόμενη ενέργεια, δηλαδή το γινόμενο της ροής μάζας του καυσίμου επί την θερμογόνο δύναμή του.

$$n = \frac{-P}{H_u \cdot m_b} \quad \text{σχέση 2.1.2}$$

όπου,

$n=0,8$ (Βαθμός απόδοσης του ατμολέβητα)

$P=4058,4[\text{KW}]$ (Η συνολική ισχύς του ατμολέβητα)

$H_u=4150[\text{kcal/kg}]$ (Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου)

Άρα προκύπτει η παροχή του καυσίμου $m_b=0,293[\text{kg/s}]$ ή $m_b=1052.8[\text{kg/h}]$

4.2 Υπολογισμός της παροχής του αέρα καύσηςΓια στοιχειομετρική και πλήρη καύση 1kg καυσίμου το στοιχειομετρικό O₂ πουαπαιτείται είναι:

$$O_{min} = \frac{32}{12}c + \frac{16}{2} \left(h - \frac{o}{8} \right) + s$$

σχέση 2.2.1

Η στοιχειομετρική ποσότητα αέρα είναι :

$$L_{min} = O_{min}/0,232 = 11,49 c + 3 4,48 (h-o/8) + 4,31 s$$

$$\text{Άρα προκύπτει } L_{min} = 5,25 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg b}$$

Η πραγματική ποσότητα αέρα είναι:

$$L = \lambda * L_{min}$$

σχέση 2.2.2

$$\lambda = 1,3$$

$$L_{min} = 5,25 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg b}$$

$$\text{Άρα προκύπτει } L = 6,825 \frac{kg \text{ αέρα}}{kg b}$$

Υπολογισμός παροχής αέρα:Η παροχή αέρα δίνεται από την σχέση:

$$m_L = m_b * L$$

σχέση 2.2.3

$$\text{Άρα προκύπτει } m_L = 1,99 \text{ σε [kg/s]}$$

4.3 Υπολογισμός της σύστασης των καυσαερίωνΗ μάζα του ξηρού καυσαερίου στοιχειομετρικής καύσης είναι:

$$\mu_{GOT} = 12,494 c + 5,31 s + 26,483 (h-o/8) + n$$

σχέση 2.3.1

$$\text{Άρα προκύπτει } \mu_{GOT} = 5,65 \frac{kg \kappa.}{kg b}$$

Η μάζα του νερού στα καυσαέρια είναι:

$$\mu_{H2O} = 9 h + w$$

σχέση 2.3.2

$$\text{Άρα προκύπτει } \mu_{H2O} = 0,547 \frac{kg \kappa.}{kg b}$$

Η συνολική στοιχειομετρική μάζα του καυσαερίου είναι:

$$\mu_{GO} = \mu_{GOT} + \mu_{H2O}$$

σχέση 2.3.3

$$\text{Άρα προκύπτει } \mu_{GO} = 6,197 \frac{kg \kappa}{kg b}$$

Η πραγματική μάζα του καυσαερίου είναι:

$$\mu_G = \mu_{GO} + L_{min} (\lambda - 1)$$

σχέση 2.3.4

$$\text{Άρα προκύπτει } \mu_G = 7,772 \frac{kg \kappa}{kg b}$$

Το καυσαέριο περιέχει CO₂, H₂O, N₂, O₂, καθώς επίσης και CO, H₂, NO_x, τα οποία όμως είναι αμελητέες ποσότητες.

Η κατά μάζα σύσταση του καυσαερίου είναι:

Για το CO₂ έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{44}{12} c \quad kg CO_2 = 1,613 \frac{kg CO_2}{kg b}$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

$$\frac{1.613}{7.772} = 0.2075 \Rightarrow 20.75\% CO_2$$

Για το H₂O έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$9 \cdot h + w \quad kg H_2O = 0.547 \frac{kg H_2O}{kg b}$$

σχέση 2.3.5

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

$$\frac{0.547}{7.772} = 0.07038 \Rightarrow 7.038\% H_2O$$

Για το N₂ έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{32}{12} \cdot \frac{76,8}{23,2} \cdot c + \frac{76,8}{23,2} \cdot 8 \cdot \left(h - \frac{o}{8} \right) + n \quad Kg N_2 = 4.19 \frac{kg N_2}{kg b}$$

σχέση 2.3.6

Επειδή όμως έχω περίσσεια αέρα, η επιπλέον ποσότητα N₂ είναι:

$$(7,772 - 6,197) * 72,212\% = 1,14$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

$$\frac{4.19 + 1.14}{7.772} = 0.6857 \Rightarrow 68.57\% \text{ N}_2$$

Για το O₂ έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου δεν παράγεται O₂.

Επειδή όμως έχω περίσσεια αέρα, η επιπλέον ποσότητα O₂ είναι:

$$(7,772 - 6,197) * 27,788\% = 0,437$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

$$\frac{0.437}{7.772} = 0.056 \Rightarrow 5.6\% \text{ O}_2$$

Η κατά όγκο σύσταση του καυσαερίου είναι:

Το στοιχειομετρικό O₂ που απαιτείται είναι:

$$O_{\min} = \frac{c}{12} + \left(h - \frac{o}{8} \right) \frac{1}{4} + \frac{s}{32}$$

$$O_{\min} = 0.0785 \frac{\text{Kmol O}_2}{\text{Kgb}}$$

Η στοιχειομετρική ποσότητα αέρα είναι:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0.21} = 0.397c + 1.19 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 0.149s$$

$$L_{\min} = 0.18 \frac{\text{Kmol αέρα}}{\text{Kgb}}$$

Η ποσότητα αέρα που δεν συμμετέχει στην καύση είναι:

$$L - O_{\min} = \lambda L_{\min} - O_{\min} = \lambda \frac{O_{\min}}{0.21} - O_{\min} = L - \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{o}{32} + \frac{s}{32} \right)$$

Η συνολική ποσότητα του καυσαερίου είναι:

$$n_p = L + \frac{h}{4} + \frac{o}{32} + \frac{w}{18} + \frac{n}{28} \quad \text{σχέση 2.3.7}$$

$$\text{Άρα προκύπτει } n_p = 0.263 \frac{\text{kmol v}}{\text{kg b}}$$

Για το CO₂ έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{1}{12} \cdot c \text{ kmol CO}_2 = 0.036 \frac{\text{kmol CO}_2}{\text{kg b}}$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

$$\frac{0.036}{0.263} = 0.1368 \Rightarrow 13.68\% CO_2$$

Για το H₂O έχω:

Από την καύση 1 kg καυσίμου παράγονται:

$$\frac{h}{2} + \frac{w}{18} \text{ kmol } H_2O = 0.03038 \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kg } b}$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

$$\frac{0.03038}{0.263} = 0.1155 \Rightarrow 11.55\% H_2O$$

Η ποσότητα του N₂ στα καυσαέρια είναι:

$$L_k = L - \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} - \frac{o}{32} + \frac{s}{32} \right) = 0.1959 \frac{\text{kmol αέρα}}{\text{kg } b} \quad \text{σχέση 2.3.8}$$

Άρα το καυσαέριο περιέχει:

$$\frac{0.1959}{0.263} = 0.7448 \Rightarrow 74.48\% \text{ αέρα}$$

4.4 Υπολογισμός της παροχής των καυσαερίων

Η παροχή καυσαερίου δίνεται από την σχέση :

$$m_v = m_b + m_L \quad \text{σχέση 2.4.1}$$

Άρα προκύπτει $m_v = 2.28 \text{ [kg/s]} = 8208 \text{ [kg/h]}$

4.5 Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων από τον φλογοθάλαμο

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα στη παράγραφο 2.5 και με την εφαρμογή των

σχέσεων 2.5.1, 2.5.2 προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Για

$$Hu = 4150 \text{ [kcal/kg]} = 17324 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\lambda L_{\min} = 6.825 \text{ [kg}_L/\text{kg}_b]$$

$$\left[c_{p,L}^0 \right]_0^t = 1,007 \text{ [kJ/kgK]}$$

Προκύπτει ότι:

$$h_R(t_L) = 17324 \text{ [kJ/kg]}$$

Λύνοντας την παρακάτω σχέση ως προς t_{ad} προκύπτει:

$$Hu + \lambda L_{\min} \left[c_{p,L}^0 \right]_0^L \times t_L = \left[m_i^* \times \left[c_{p,i}^0 \right]_0^{ad} \right] \times t_{ad}$$

Εφαρμόζουμε την παραπάνω σχέση για $t_{ad} = 1828$ [K].

Τα αποτελέσματα του πίνακα προέκυψαν με γραμμική παρεμβολή:

| ΕΝΩΣΗ | m_i [kg _i /kg _b] | T_i [K] | $\bar{H}_i(T_i)$ [kJ/kg] |
|------------------|---|-----------|--------------------------|
| Καύσιμο | 1 | 293 | -17324 |
| CO ₂ | 1,613 | 1828 | -312,465*44 |
| H ₂ O | 0,547 | 1828 | -177,7254*18 |
| N ₂ | 4,19 | 1828 | 49,96889*28 |
| O ₂ | 0,437 | 1828 | 52,705*32 |

$$\text{Άρα } h_R(t_L) = 17324 \text{ [kJ/kg]} \approx h_P(t_{ad}) = 17326 \text{ [kJ/kg]}$$

$$\text{Δεχόμαστε επομένως την υπόθεση ότι } t_{ad} = 1828 \text{ [K]} = 1555 \text{ [°C]}$$

Ισοζύγιο ενέργειας στον φλογοθάλαμο:

Η φλόγα ανταλλάσσει με τα τοιχώματα το ποσό θερμότητας:

$$\dot{Q} = \varepsilon \times C_s \times \left[\left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \times F \quad \text{σχέση 2.5.3}$$

Τα καυσαέρια με ροή μάζας m_v ψύχονται έτσι ώστε να αποδώσουν το ποσό

θερμότητας

$$\dot{Q} = cp_m \times m_v \times (T_{ad} - T_E) \quad \text{σχέση 2.5.4}$$

Το ισοζύγιο θερμότητας δίνει:

$$\dot{Q} = cp_m \times m_v \times (T_{ad} - T_E) = \varepsilon \times C_s \times \left[\left(\frac{\sqrt{T_{ad} \times T_E}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \times F \quad \text{σχέση 2.5.5}$$

Επειδή $T_w \ll T_E$ ο όρος $(T_w/100)^4$ θεωρείται αμελητέος.

Από την παραπάνω ισοζύγιο προκύπτει η σχέση:

$$\left(\frac{T_E}{T_{ad}} \right)^2 + \frac{Ko}{\varepsilon} \left(\frac{T_E}{T_{ad}} \right) - \frac{Ko}{\varepsilon} = 0 \quad \text{σχέση 2.5.6}$$

όπου Κο είναι ο αριθμός Konakov ή Boltzmann, ο οποίος ισούται με

$$Ko = Bo = \frac{cp_m \times m_v \times 100}{Cs \times F_1 \times \left(\frac{Tad}{100} \right)^3} \quad \text{σχέση 2.5.7}$$

όπου,

$$m_v = 2,28 \text{ [kg/s]} \quad (\text{Η παροχή των καυσαερίων})$$

$$c_{p,m} = 1194 \text{ [J / kgK]} \quad (\text{Η ειδική θερμοχωρητικότητα } c_p \text{ των καυσαερίων στη θερμοκρασία } T_m = 924 \text{ [^{\circ}\text{C}]})$$

$$T_{ad} = 1828 \text{ [K]} \quad (\text{Η αδιαβατική θερμοκρασία καύσης})$$

$$Cs = 5,67 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (\text{Παγκόσμια σταθερά ακτινοβολίας σωμάτων})$$

$$F_1 = 2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Η επιφάνεια της φλόγας})$$

Υπολογισμός της θερμαινόμενης επιφάνειας του θαλάμου καύσης

Η συνολικά θερμαινόμενη επιφάνεια του θαλάμου καύσης είναι το άθροισμα των θερμαινόμενων επιφανειών των πλευρικών τοιχωμάτων.

Άνω επιφάνεια: $6,76 \text{ m}^2$

Οπίσθια επιφάνεια: $2,9 \text{ m}^2$

Εμπρόσθια επιφάνεια: $2,67 \text{ m}^2$

Δεξιά επιφάνεια: $4,6 \text{ m}^2$

Αριστερή επιφάνεια: $4,6 \text{ m}^2$

Άρα προκύπτει η συνολικά θερμαινόμενη επιφάνεια του θαλάμου καύσης

$$F_2 = 21,53 \text{ m}^2$$

Η επιφάνεια της φλόγας είναι $F_1 = 2 \text{ m}^2$

Επομένως η επιφάνεια της φλόγας καταλαμβάνει το 9,3% του θαλάμου καύσης.

Γίνεται εκτίμηση της $T_E = 1559 \text{ [K]}$

Άρα προκύπτει ο αριθμός Konakov $K_o = 3,9$

Για το συντελεστή εκπομπής ισχύει η σχέση:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\bar{\alpha}_{2m}} - 1 \right) \frac{F_2}{F_1}} \quad \text{σχέση 2.5.9}$$

όπου,

$$\varepsilon_1 = 0,8 \quad (\text{Ο συντελεστής εκπομπής της φλόγας})$$

$$F_2/F_1 = 0,093 \quad (\text{Το ποσοστό της επιφάνειας του θαλάμου καύσης που καταλαμβάνει η φλόγα})$$

$$\alpha_{2m} = 0,9 \quad (\text{Ο συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας των τοιχωμάτων})$$

Άρα προκύπτει ο συντελεστής εκπομπής $\varepsilon = 0,79$

Λύνοντας την παρακάτω σχέση ως προς T_E προκύπτει :

$$\left(\frac{T_E}{T_{ad}} \right)^2 + \frac{Ko}{\varepsilon} \left(\frac{T_E}{T_{ad}} \right) - \frac{Ko}{\varepsilon} = 0 \quad \text{σχέση 2.5.10}$$

$$\frac{T_E}{T_{ad}} = 0,8525K$$

Άρα προκύπτει η τιμή $T_E = 1559$ [K], η οποία συμπίπτει με την αρχική υπόθεση.

Άρα τελικά θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης είναι $T_E = 1559$ K = 1286°C .

4.6 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στην πρώτη δέσμη σωλήνων

Τα καυσαέρια αφού εξέλθουν από το θάλαμο καύσης, εισέρχονται στην πρώτη δέσμη αυλών και εν συνεχείᾳ στη δεύτερη δέσμη αυλών και στη συνέχεια εξέρχονται από τον ατμολέβητα προς την καπνοδόχο, όπως φαίνεται και στα σχέδια του παραρτήματος 3. Τα καυσαέρια ανταλλάζουν θερμότητα με τα τοιχώματα των αυλών μέσω συναγωγής. Στην πρώτη δέσμη θεωρείται ότι η θερμοκρασία των καυσαερίων κατέρχεται στα 2/3 της συνολικής πτώσης της θερμοκρασίας των καυσαερίων από την έξοδο τους από τον φλοιοθάλαμο ως την έξοδό τους από τον ατμολέβητα. Επομένως η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδό τους από την πρώτη δέσμη αυλών T_D είναι:

$$T_D = T_E - \frac{2}{3} \times (T_E - T_A) \quad \text{σχέση 2.7.1}$$

όπου T_A είναι η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον ατμολέβητα

Γίνεται η υπόθεση: $T_A = 200^{\circ}\text{C} = 473$ K

Άρα προκύπτει $T_D = 562^{\circ}\text{C} = 835$ K

Η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων στην πρώτη δέσμη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{m1} = \frac{T_E + T_D}{2}$$

σχέση 2.7.2

όπου,

$T_E = 1559 \text{ [K]}$ (Θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης)

$T_D = 835 \text{ [K]}$ (Θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την πρώτη δέσμη αυλών)

Άρα προκύπτει $T_{m1} = 1197 \text{ [K]} = 924 \text{ [^{\circ}C]}$

Υπολογισμός επιφάνειας σωλήνων πρώτης δέσμης

| Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρώτης δέσμης σωλήνων | | |
|---|----------------|----------------------|
| Αριθμός σωλήνων | Z | 116 |
| Εξωτερική διάμετρος σωλήνων | d_a | 0,0761m |
| Πάχος σωλήνων | 2s | 0,0058m |
| Εσωτερική διάμετρος σωλήνων | d_i | 0,0703m |
| Υπολογιστική διάμετρος σωλήνων | d_m | 0,0732m |
| Μήκος σωλήνων | L | 4,5m |
| Επιφάνεια σωλήνων | $F_{\sigma 1}$ | 119,98m ² |

Άρα προκύπτει:

$$F_{\sigma 1} = z \cdot \pi \cdot d_m \cdot L = 119,98 \text{ m}^2$$

σχέση 2.7.3

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής των καυσαερίων α_1

Ο αριθμός Reynolds που είναι σημαντικός για την περιγραφή του πεδίου ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{w \times d_i}{v} = \frac{\rho \times w \times d_i}{n}$$

σχέση 2.7.4

όπου,

$d_i = 0,0703 \text{ [m]}$ (Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων)

$\rho = 0,299 \text{ [kg/m}^3]$ (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη μέση θερμοκρασία $T_m = 924 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$)

$n = 4,821 \times 10^{-5} \text{ [Pas]}$ (Το δυναμικό ιξώδες στη μέση θερμοκρασία $T_m = 924 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$)

$w = 16,9 \text{ [m/s]}$ (Η ταχύτητα των καυσαερίων στην πρώτη δέσμη σωλήνων)

Η ταχύτητα των καυσαερίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w = \frac{m_v}{\rho \times A}$$

σχέση 2.7.5

όπου,

$$m_v=2,28 \text{ [kg/s]} \quad (\text{Η παροχή των καυσαερίων})$$

$$\rho=0,299 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (\text{Η πυκνότητα των καυσαερίων στη μέση θερμοκρασία } T_m=924 \text{ [}^{\circ}\text{C]})$$

$$A=0,45 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Η διατομή της πρώτης δέσμης σωλήνων})$$

Η διατομή των σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = z \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$$

σχέση 2.7.6

όπου,

$$z=116 \quad (\text{Ο αριθμός των σωλήνων της πρώτης δέσμης})$$

$$d_i=0,0703[\text{m}] \quad (\text{Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων})$$

$$\text{Άρα προκύπτει } Re=7388$$

Το κινηματικό ιξώδες είναι:

$$v = \frac{n}{\rho} [\text{m}^2 / \text{s}]$$

σχέση 2.7.7

Ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας α που εκφράζει τη θερμική αδράνεια των σωμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times c p_m}$$

σχέση 2.7.8

όπου,

$$\rho=0,299 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (\text{Η πυκνότητα των καυσαερίων στη μέση θερμοκρασία } T_m=924 \text{ [}^{\circ}\text{C]})$$

$$\lambda=0,0834 \text{ [W/mK]} \quad (\text{Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη μέση θερμοκρασία } T_m=924 \text{ [}^{\circ}\text{C]})$$

$$c_p=1194 \text{ [J/kgK]} \quad (\text{Η ειδική θερμοχωρητικότητα } c_p \text{ των καυσαερίων στη θερμοκρασία } T_m=924 \text{ [}^{\circ}\text{C]})$$

$$\text{Άρα προκύπτει } a=2,34 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2/\text{s}]$$

Ο αριθμός Pradl υπολογίζεται από τη σχέση ή από τους σχετικούς πίνακες:

$$\text{Pr} = \frac{v}{a} \quad \text{σχέση 2.7.9}$$

όπου,

$$v=1,687*10^{-4} [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{Το κινηματικό ιξώδες στη μέση θερμοκρασία } T_m=924 [{}^\circ\text{C}])$$

$$a=2,22*10^{-4} [\text{m}^2/\text{s}] \quad (\text{Ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας στη μέση θερμοκρασία } T_m=924 [{}^\circ\text{C}])$$

Άρα προκύπτει $\text{Pr}=0,755$

Ο αριθμός Nusselt για τυρβώδη ροή μέσα σε σωλήνα κυκλικής διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$Nu_0 = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \times (\text{Re}-1000) \times \text{Pr}}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left(\text{Pr}^{2/3} - 1\right)} \left[1 + \left(\frac{di}{L} \right)^{2/3} \right] \quad \text{σχέση 2.7.10}$$

$$\xi = (1,82 \log_{10} \text{Re} - 1,64)^{-2}$$

$$Nu = Nu_0 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{0,11}$$

Λόγω της περιορισμένης περιοχής θερμοκρασιών ισχύει:

$$\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \cong 1$$

Άρα $Nu=Nu_0=25,6$

Ο συντελεστής συναγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{Nu \times \lambda}{di} \quad \text{σχέση 2.7.11}$$

όπου,

$$Nu=25,6 \quad (\text{Ο αριθμός Nusselt})$$

$$\lambda=0,0834 [\text{W}/\text{mK}] \quad (\text{Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη μέση θερμοκρασία } T_m=924 [{}^\circ\text{C}])$$

$$di=0,0703 [\text{m}] \quad (\text{Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων})$$

Άρα προκύπτει ο συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων για την πρώτη δέσμη σωλήνων $\alpha_1=30,4 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής του νερού α_2

Η μεταφορά θερμότητας στην περιοχή των δύο φάσεων μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς, δηλαδή με συναγωγή και με βρασμό. Οι συντελεστές βρασμού που δίνονται στη βιβλιογραφία έχουν παρθεί από πειράματα σε συσκευές χωρίς κυκλοφορία του ρευστού. Ο συντελεστής συναγωγής βρασμού του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_b = m \cdot (t_w - t_b)^{n-1} \quad \text{σχέση 2.7.12}$$

όπου,

$m=52$ και $n=2,35$ εμπειρικοί εκθέτες, η τιμή των οποίων εξαρτάται από το είδος του υγρού, την πίεση βρασμού και τη φύση της επιφάνειας του δοχείου.

$t_w=195 [^{\circ}\text{C}]$ (Θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας σωλήνων)

$t_b=185 [^{\circ}\text{C}]$ (Θερμοκρασία βρασμού)

Άρα προκύπτει $\alpha_b=1164 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + ff_1 + ff_2 \quad \text{σχέση 2.7.13}$$

όπου,

$\alpha_1=30,4 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ (Συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων)

$\alpha_2=1164 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ (Συντελεστής συναγωγής του νερού)

$s=0,0029 [\text{m}]$ (Πάχος των σωλήνων)

$\lambda=50 [\text{W}/\text{mK}]$ (Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας)

$ff_1=0,002 [\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ (Συντελεστής ρύπανσης των καυσαερίων)

$ff_2=0,0002 [\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$ (Συντελεστής ρύπανσης του νερού τροφοδοσίας του λέβητα)

Άρα προκύπτει $K=27,8 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς

Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\Theta_m = \frac{\Delta\Theta_M - \Delta\Theta_\mu}{\ln \frac{\Delta\Theta_M}{\Delta\Theta_\mu}} = \frac{(\theta_1'' - \theta_2') - (\theta_1' - \theta_2'')}{\ln \frac{\theta_1'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2''}} \quad \text{σχέση 2.7.14}$$

όπου,

$$\theta_1'' = 1286 \text{ [}^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στην πρώτη δέσμη})$$

$$\theta_1' = 562 \text{ [}^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από την πρώτη δέσμη})$$

$$\theta_2'' = 184 \text{ [}^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Η θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού σε P=10 barg})$$

$$\theta_2' = 184 \text{ [}^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Η θερμοκρασία του κορεσμένου νερού σε P=10 barg})$$

$$\text{Άρα προκύπτει } \Delta\Theta_m = 676,6 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$$

Η θερμότητα που αποδίδεται με συναγωγή δίνεται από την σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{συν}} = K \cdot F \cdot \Delta\Theta_m \quad \text{σχέση 2.7.15}$$

όπου,

$$K = 27,8 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (\text{Ο συντελεστής θερμοπερατότητας})$$

$$F = 119,98 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, δηλαδή η επιφάνεια της πρώτης δέσμης σωλήνων})$$

$$\Delta\Theta_m = 676,6 \text{ [}^{\circ}\text{C}] \quad (\text{Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά})$$

$$\text{Άρα προκύπτει } Q_{\text{συν}} = 2256773 \text{ [W]} = 2256,8 \text{ [kW].}$$

4.7 Υπολογισμός της αποδιδόμενης ισχύος στην δεύτερη δέσμη σωλήνων

Στη δεύτερη δέσμη σωλήνων η θερμοκρασία των καυσαερίων κατέρχεται από τη θερμοκρασία T_D στη θερμοκρασία T_A . Εφαρμόζονται ακριβώς οι ίδιες σχέσεις με την παράγραφο 4.6.

Η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων στη δεύτερη δέσμη σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{m2} = \frac{T_D + T_A}{2}$$

όπου,

$$T_D = 835 \text{ [K]} \quad (\text{Θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στη δεύτερη δέσμη σωλήνων})$$

$$T = 473 \text{ [K]} \quad (\text{Θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον ατμολέβητα})$$

$$\text{Άρα προκύπτει } T_{m2} = 654 \text{ [K]} = 381 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$$

Υπολογισμός επιφάνειας σωλήνων δεύτερης δέσμης

| Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρώτης δέσμης σωλήνων | | |
|---|----------------|---------------------|
| Αριθμός σωλήνων | Z | 39 |
| Εξωτερική διάμετρος σωλήνων | d_a | 0,0761m |
| Πάχος σωλήνων | 2s | 0,0058m |
| Εσωτερική διάμετρος σωλήνων | d_i | 0,0703m |
| Υπολογιστική διάμετρος σωλήνων | d_m | 0,0732m |
| Μήκος σωλήνων | L | 4,5m |
| Επιφάνεια σωλήνων | $F_{\sigma 1}$ | 40,34m ² |

Άρα προκύπτει:

$$F_{\sigma 1} = z \cdot \pi \cdot d_m \cdot L = 40,34 \text{ m}^2$$

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής των καυσαερίων α_1

Ο αριθμός Reynolds που είναι σημαντικός για την περιγραφή του πεδίου ροής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{w \times d_i}{v} = \frac{\rho \times w \times d_i}{n}$$

όπου,

$$di = 0,0703[\text{m}] \quad (\text{Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων})$$

$$\rho = 0,548[\text{kg/m}^3] \quad (\text{Η πυκνότητα των καυσαερίων στη μέση θερμοκρασία } T_m = 381 [{}^\circ\text{C}])$$

$$n = 3,129 \times 10^{-5} [\text{Pas}] \quad (\text{Το δυναμικό ιξώδες στη μέση θερμοκρασία } T_m = 381 [{}^\circ\text{C}])$$

$$w = 27,5 [\text{m/s}] \quad (\text{Η ταχύτητα των καυσαερίων στην πρώτη δέσμη σωλήνων})$$

Η ταχύτητα των καυσαερίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w = \frac{m_v}{\rho \times A}$$

όπου,

$$m_v = 2,28 [\text{kg/s}] \quad (\text{Η παροχή των καυσαερίων})$$

$$\rho = 0,548 [\text{kg/m}^3] \quad (\text{Η πυκνότητα των καυσαερίων στη μέση θερμοκρασία } T_m = 381 [{}^\circ\text{C}])$$

$$A = 0,151 [\text{m}^2] \quad (\text{Η διατομή της πρώτης δέσμης σωλήνων})$$

Η διατομή των σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

όπου,

$z=39$ (Ο αριθμός των σωλήνων της πρώτης δέσμης)

$d_i=0,0703[m]$ (Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων)

$$\text{Άρα προκύπτει } Re=33859$$

Το κινηματικό ιξώδες είναι:

$$v = \frac{n}{\rho} [m^2 / s]$$

Ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας α που εκφράζει τη θερμική αδράνεια των σωμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times cp_m}$$

όπου,

$\rho=0,548 [\text{kg/m}^3]$ (Η πυκνότητα των καυσαερίων στη μέση θερμοκρασία $T_m=381 [{}^\circ\text{C}]$)

$\lambda=0,0487 [\text{W/mK}]$ (Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη μέση θερμοκρασία $T_m=381 [{}^\circ\text{C}]$)

$c_p=1185 [\text{J/kgK}]$ (Η ειδική θερμοχωρητικότητα c_p των καυσαερίων στη θερμοκρασία $T_m=381 [{}^\circ\text{C}]$)

$$\text{Άρα προκύπτει } a=8,026 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$$

Ο αριθμός Prandtl υπολογίζεται από τη σχέση ή από τους σχετικούς πίνακες:

$$Pr = \frac{v}{\partial}$$

όπου,

$v=5,912 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$ (Το κινηματικό ιξώδες στη μέση θερμοκρασία $T_m=381 [{}^\circ\text{C}]$)

$a=8,026 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$ (Ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας στη μέση θερμοκρασία $T_m=381 [{}^\circ\text{C}]$)

$$\text{Άρα προκύπτει } Pr=0,742$$

Ο αριθμός Nusselt για τυρβώδη ροή μέσα σε σωλήνα κυκλικής διατομής δίνεται από τη σχέση:

$$Nu_0 = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \times (Re - 1000) \times Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{di}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

$$\xi = (1,82 \log_{10} Re - 1,64)^{-2}$$

$$Nu = Nu_0 \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,11}$$

Λόγω της περιορισμένης περιοχής θερμοκρασιών ισχύει:

$$\frac{Pr}{Pr_w} \approx 1$$

$$\text{Άρα } Nu = Nu_0 = 84,8$$

Ο συντελεστής συναγωγής δίνεται από τη σχέση:

$$a = \frac{Nu \times \lambda}{di}$$

όπου,

$$Nu = 84,8 \quad (\text{Ο αριθμός Nusselt})$$

$$\lambda = 0,0487 [\text{W/mK}] \quad (\text{Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στη μέση θερμοκρασία } T_m = 381 [{}^\circ\text{C}])$$

$$di = 0,0703 [\text{m}] \quad (\text{Η εσωτερική διάμετρος των σωλήνων})$$

Άρα προκύπτει ο συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων για την πρώτη δέσμη σωλήνων $a_1 = 58,7 [\text{W/m}^2\text{K}]$

Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής του νερού a_2

Η μεταφορά θερμότητας στην περιοχή των δύο φάσεων μπορεί να γίνει με δύο μηχανισμούς, δηλαδή με συναγωγή και με βρασμό. Οι συντελεστές βρασμού που δίνονται στη βιβλιογραφία έχουν παρθεί από πειράματα σε συσκευές χωρίς κυκλοφορία του ρευστού. Ο συντελεστής συναγωγής βρασμού του νερού δίνεται από τη σχέση:

$$a_b = m \cdot (t_w - t_b)^{n-1}$$

όπου,

$m=52$ και $n=2,35$ εμπειρικοί εκθέτες, η τιμή των οποίων εξαρτάται από το είδος του υγρού, την πίεση βρασμού και τη φύση της επιφάνειας του δοχείου.

$t_w=195 [{}^0C]$ (Θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας σωλήνων)

$t_b=185 [{}^0C]$ (Θερμοκρασία βρασμού)

Άρα προκύπτει $a_b=1164 [W/m^2K]$.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{a_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{a_2} + ff_1 + ff_2$$

όπου,

$a_1=58,7 [W/m^2K]$ (Συντελεστής συναγωγής των καυσαερίων)

$a_2=1164 [W/m^2K]$ (Συντελεστής συναγωγής του νερού)

$s=0,0029 [m]$ (Πάχος των σωλήνων)

$\lambda=50 [W/mK]$ (Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας)

$ff_1=0,002 [m^2K/W]$ (Συντελεστής ρύπανσης των καυσαερίων)

$ff_2=0,0002 [m^2K/W]$ (Συντελεστής ρύπανσης του νερού τροφοδοσίας του λέβητα)

Άρα προκύπτει $K=49,6 [W/m^2K]$

Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς

Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\Theta_m = \frac{\Delta\Theta_M - \Delta\Theta_\mu}{\ln \frac{\Delta\Theta_M}{\Delta\Theta_\mu}} = \frac{(\theta_1'' - \theta_2') - (\theta_1' - \theta_2'')}{\ln \frac{\theta_1'' - \theta_2'}{\theta_1' - \theta_2''}}$$

όπου,

$\theta_1'' = 562 [{}^0C]$ (Η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων στη δεύτερη δέσμη)

$\theta_1' = 200 [{}^0C]$ (Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τη δεύτερη δέσμη)

$\theta_2'' = 184 [{}^0C]$ (Η θερμοκρασία του κορεσμένου ατμού σε $P=10$ barg)

$\theta_2' = 184 [{}^0C]$ (Η θερμοκρασία του κορεσμένου νερού σε $P=10$ barg)

Άρα προκύπτει $\Delta\Theta_m=676,6 [{}^0C]$

Η θερμότητα που αποδίδεται με συναγωγή δίνεται από την σχέση:

$$\dot{Q}_{\sigma\nu} = K \cdot F \cdot \Delta\Theta_m$$

όπου,

$$K=49,6 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (\text{Ο συντελεστής θερμοπερατότητας})$$

$$F=40,4 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, δηλαδή η επιφάνεια της δεύτερης δέσμης σωλήνων})$$

$$\Delta\Theta_m=114,5 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (\text{Η μέση θερμοκρασιακή διαφορά})$$

Άρα προκύπτει $Q_{\sigma\nu}=229089 \text{ [W]}=229,1 \text{ [kW]}$.

4.8 Υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών του ατμολέβητα

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό των ατμολεβήτων, είναι η ειδική φόρτιση της θερμαντικής επιφάνειας, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{q}_D = \frac{m_D}{F_T}$$

όπου,

$$m_D=6000 \text{ [kg/h]} \quad (\text{Η παραγωγή ατμού})$$

$$F_T=166,7 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Η συνολική θερμαντική επιφάνεια του λέβητα}) \text{ πdlz}$$

Άρα προκύπτει η ειδική φόρτιση της θερμαντικής επιφάνειας $q_D=36 \text{ [kg/m}^2\text{h]}$

Στους λέβητες με εστία σχάρας χρησιμοποιείται επίσης η θερμική φόρτιση διατομής, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{q}_A = \frac{m_b \cdot H_u}{A}$$

όπου,

$$m_b=8208 \text{ [kg/h]} \quad (\text{Η παροχή του καυσίμου})$$

$$H_u=4150 \text{ [kcal/kg]} \quad (\text{Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου})$$

$$A=7,82 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Η διατομή του θαλάμου καύσης})$$

Άρα προκύπτει η θερμική φόρτιση διατομής $q_A=4,36 \text{ [MW/m}^2\text{]}$.

4.9 Θερμοκρασία υπολογισμού

4.9.1 Θερμοκρασία κορεσμού βάσει της πίεσης λειτουργίας του λέβητα

Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού) επιλέγεται βάσει της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης του λέβητα και εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα.

| Πίεση λειτουργίας [barg] | Θερμοκρασία κορεσμού [°C] |
|--------------------------|---------------------------|
| 10 | 184 |

4.9.2 Κυλινδρικό περιβλημα

Για το κυλινδρικό περιβλημα η θερμοκρασία υπολογισμού βρίσκεται από τη σχέση

$$t_c = t_s + 4e + 15$$

όπου είναι το πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος

4.9.3 Σωλήνες

Για τους σωλήνες από τη στιγμή που το μέγιστο επιλεγόμενο πάχος είναι $e_t=4$ mm, τότε $2xe_t=2x2,9=5,8$ το οποίο είναι μικρότερο από 25. Συνεπώς η θερμοκρασία υπολογισμού για τους σωλήνες βρίσκεται από τη σχέση. Επιλέγεται σωλήνας άνευ ραφής κατά DIN 2448/1629

$$t_c = t_s + 25$$

4.9.4 Κυκλικά καλύμματα

Για τα κυκλικά καλύμματα (εμπρόσθιο και οπίσθιο) από τη στιγμή που το μέγιστο επιλεγόμενο πάχος είναι $e_p=25$ mm, τότε $2xe_p=2x25=50$ το οποίο είναι ίσο με 50. Συνεπώς η θερμοκρασία υπολογισμού για τα κυκλικά καλύμματα βρίσκεται από τη σχέση

$$t_c = t_s + 50$$

4.10 Υπολογισμός πάχους κυλινδρικού περιβλήματος

Το απαιτούμενο πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{sa} = e_{cs} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (7.1-2)}$$

όπου,

$c_1=1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2=1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{cs} = \frac{p_c \cdot d_{os}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot v + 2 \cdot p_c} \quad \text{σχέση (7.2-2)}$$

όπου:

| | | |
|----------|--------|---|
| e_{cs} | 11,2 | Απαιτούμενο πάχος του κελύφους χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| p_c | 1,0 | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{os} | 1986 | Εξωτερική διάμετρος του κελύφους χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| f_s | 103,33 | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| v | 0,85 | Συντελεστής ποιότητας συγκολλήσεων |

Για το κυλινδρικό περίβλημα επιλέγουμε το υλικό P265 GH σύμφωνα με το πρότυπο EN 10028-3

Η θερμοκρασία υπολογισμού είναι

$$t_c = t_s + 4e + 15 = 283 \text{ } [{}^\circ\text{C}] \quad (\text{αν λάβουμε υπόψη το πάχος ίσο με 20 mm})$$

Παίρνουμε ως θερμοκρασία αναφοράς τους $300 \text{ } [{}^\circ\text{C}]$

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

i) R_p για υλικό κατασκευής P265 GH στους $300 \text{ } {}^\circ\text{C}$ είναι 155 (πίνακας 4 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει $R_p/1,5 = 103,33$

ii) R_m για υλικό κατασκευής P265 GH στους $300 \text{ } {}^\circ\text{C}$ είναι 410 (πίνακας 3 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει $R_m/2,4 = 170,83$

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(R_p/1,5, R_m/2,4) = 103,33 \text{ } [\text{N/mm}^2]$

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cs} | c_1 | c_2 | e_{sa} | Επιλεγόμενο πάχος κελύφους |
|----------|-------|-------|----------|----------------------------|
| 11,2 | 1 | 1 | 13,2 | 16 |

4.11 Υπολογισμός πάχους σωλήνων που υπόκεινται σε εξωτερική υπερπίεση

Το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος σωλήνων υπολογίζεται από τη σχέση (12.1-1) ή από τον πίνακα (12.1-1)

$$e = e_{ct} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (12.1-1)}$$

όπου,

$c_1 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος των σωλήνων χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{ct} = \frac{p \cdot d_0}{1,6 \cdot f} \quad \text{σχέση (12.1-2)}$$

όπου:

| | | |
|----------|-------|---|
| e_{cs} | 0,432 | Απαιτούμενο πάχος των σωλήνων χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| p | 1,0 | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_0 | 76,1 | Εξωτερική διάμετρος των σωλήνων [mm] |
| f_s | 110 | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |

Για τους σωλήνες επιλέγουμε το υλικό St35.8 σύμφωνα με το πρότυπο DIN 17 175
Η θερμοκρασία υπολογισμού είναι

$$t_c = t_s + 25 = 213 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Παίρνουμε ως θερμοκρασία αναφοράς τους $250 \text{ [}^\circ\text{C]}$

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

i) R_p για υλικό St35.8 στους $250 \text{ [}^\circ\text{C}$ είναι 165 (πίνακας 6 του DIN 17 175)

Άρα προκύπτει $R_p/1,5 = 110$

ii) R_m για υλικό St35.8 στους $250 \text{ [}^\circ\text{C}$ είναι 360 (πίνακας 5 του DIN 17 175)

Άρα προκύπτει $R_m/2,4 = 150$

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(R_p/1,5, R_m/2,4) = 110 \text{ [N/mm}^2]$

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος των σωλήνων συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cs} | c_1 | c_2 | e_{sa} | Επιλεγόμενο πάχος σωλήνων |
|----------|-------|-------|----------|---------------------------|
| 0,432 | 1 | 1 | 2,432 | 2,9 |

4.11.1 Απόσταση μεταξύ των σωλήνων

Όπως διαπιστώνεται και από τα κατασκευαστικά σχέδια του παραρτήματος η απόσταση μεταξύ των σωλήνων είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση που προκύπτει από τη σχέση

$$0,125 \times d_0 + 7 = 16,5 \text{ mm}$$

4.12 Υπολογισμός πάχους κυκλικών καλυμμάτων

Τα κυκλικά καλύμματα (εμπρόσθιο και οπίσθιο), όπως εμφανίζονται και στα κατασκευαστικά σχέδια είναι επίπεδα. Οι κυκλικοί επίπεδοι δίσκοι είναι αμοιβαία στηριγμένοι μέσω των σωλήνων και του κυλινδρικού περιβλήματος. Το απαιτούμενο πάχος των κυκλικών επιπέδων δίσκων υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{pa} = e_{ch} + c_1 + c_2 \quad \text{σχέση (10.2-1)}$$

όπου,

$c_1=1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2=1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος των κυκλικών επιπέδων δίσκων χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{ch} = c_4 \cdot b \cdot y \cdot \sqrt{\frac{p_c}{f}} \quad \text{σχέση (10.2-2)}$$

όπου,

$c_4=0,36$ γιατί τα κυκλικά καλύμματα είναι επίπεδα, συγκολλημένα και από τις δύο πλευρές και ο λόγος του πάχους των καλυμμάτων προς το πάχος του κελύφους είναι $e_h/e_s=1,14$ πίνακας (10.2-1)

$y=1$ χωρίς αντιστηρίξεις

$b=678$ mm είναι η υπολογιστική διάμετρος, δηλαδή η διάμετρος του μεγαλύτερου κύκλου που μπορεί να εγγραφεί στο αδιάτρητο τμήμα του δίσκου

| | | |
|-------|--------|--|
| c_4 | 0,36 | Συντελεστής |
| b | 678 | Υπολογιστική διάμετρος [mm] |
| y | 1 | Συντελεστής |
| p_c | 1,0 | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| f | 116,66 | Σταθερά αντοχής του υλικού min (Rp/1,5 , Rm/2,4) [N/mm^2] |

Για τα επίπεδα κυκλικά καλύμματα επιλέγουμε το υλικό P265 GH σύμφωνα με το πρότυπο EN 10028-3

Παίρνουμε ως θερμοκρασία αναφοράς τους 250 [$^{\circ}\text{C}$]

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

i) Rp για υλικό P265 GH στους 250 $^{\circ}\text{C}$ είναι 175 (πίνακας 4 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει Rp/1,5=116,66

ii) Rm για υλικό P265 GH στους 250 $^{\circ}\text{C}$ είναι 410 (πίνακας 5 του EN 10028-2)

Άρα προκύπτει Rm/2,4=170,83

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι min(Rp/1,5 , Rm/2,4)=116,66 [N/mm^2]

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος των επιπέδων κυκλικών καλυμμάτων συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{ch} | c_1 | c_2 | e_{pa} | Επιλεγόμενο πάχος επιπέδων κυκλικών καλυμμάτων |
|----------|-------|-------|----------|--|
| 22,598 | 1 | 1 | 24,598 | 26 |

4.13 Υπολογισμός ανοιγμάτων στο κυλινδρικό περίβλημα

Η μεγαλύτερη δυνατή εξωτερική διάμετρος d_{ob} ενός μη ενισχυμένου ανοίγματος υπολογίζεται από τη σχέση

$$d_{ob\ max} = 2 \cdot \left(\frac{l_{rs}}{v_a} - l_{rs} \right) \quad \text{σχέση (8.2-2)}$$

όπου,

$$v_a = \frac{p_c \cdot d_{is}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot e_{rs}} \quad \text{σχέση (8.2-1)}$$

και

$$l_{rs} = \sqrt{(d_{is} + e_{rs}) \cdot e_{rs}} \quad \text{σχέση (8.1-1)}$$

Άρα

| | | |
|----------|--------|---------------------------------------|
| l_{rs} | 177,54 | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| e_{rs} | 16 | Πάχος κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |

| | | |
|---------------|---------|--|
| v_a | 0,594 | Συντελεστής εξασθένισης |
| p_c | 1,0 | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |
| e_{rs} | 16 | Πάχος κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| f_s | 103,33 | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| $d_{ob\ max}$ | 242,698 | Η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος ενός μη ενισχυμένου ανοίγματος [mm] |
| l_{rs} | 177,54 | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| v_a | 0,594 | Συντελεστής εξασθένισης |

Συνεπώς, το μοναδικό άνοιγμα του κυλινδρικού περιβλήματος το οποίο χρειάζεται ενίσχυση είναι η ελλειπτική οπή (ανθρωποθυρίδα).

Ο λόγος του μεγάλου προς το μικρό άξονα είναι $460/360=1,28$ το οποίο είναι μικρότερο από 1,5. Για τον υπολογισμό θα ληφθεί ως διάμετρος η διάσταση του μικρού άξονα της έλλειψης, δηλαδή τα 360 mm.

Για την ενίσχυση της ανθρωποθυρίδας επιλέγεται ενισχυτικός δακτύλιος από υλικό P265 GH με πάχος $e_{rp}=10$ mm και ισοδύναμο μήκος περιστομίου $l_{rs}=270,82$

| | | |
|-------------------|--------|--|
| l_{rs} | 226,89 | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| $e=e_{rs}+e_{rp}$ | 26 | Συνολικό πάχος κελύφους και ενισχυτικού δακτυλίου [mm] |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |

| | | |
|-----------------------|--------|--|
| v_a | 0,365 | Συντελεστής εξασθένισης |
| p_c | 1,0 | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |
| $e = e_{rs} + e_{rp}$ | 26 | Συνολικό πάχος κελύφους και ενισχυτικού δακτυλίου [mm] |
| f_s | 103,33 | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |

| | | |
|----------------|--------|--|
| $d_{ob \ max}$ | 789,45 | Η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος ενός μη ενισχυμένου ανοίγματος [mm] |
| l_{rs} | 226,89 | Ισοδύναμο μήκος περιστομίου [mm] |
| v_a | 0,365 | Συντελεστής εξασθένισης |

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι $d_{ob \ max}=789,45$ mm, το οποίο είναι ασφαλώς μεγαλύτερο από τη διάμετρο της ανθρωποθυρίδας $d=360$ mm.

Το απαιτούμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{sb} = e_{cb} + c_1 + c_2$$

σχέση (7.1-2)

όπου,

$c_1=1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2=1$ mm είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{cb} = \frac{p_c \cdot d_{ob}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot v + 2 \cdot p_c} \quad \text{σχέση (7.2-2)}$$

όπου:

| | | |
|----------|--------|--|
| e_{cb} | 1,734 | Απαιτούμενο πάχος του κελύφους χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| p_c | 1,0 | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{ob} | 360 | Εξωτερική διάμετρος της ανθρωποθυρίδας χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| f_s | 103,33 | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| v | 1 | Συντελεστής ποιότητας συγκολλήσεων |

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cb} | c_1 | c_2 | e_{sb} | Επιλεγόμενο πάχος της ανθρωποθυρίδας |
|----------|-------|-------|----------|--------------------------------------|
| 1,734 | 1 | 1 | 3,734 | 6 |

Επίσης, ικανοποιείται η εξίσωση του ελάχιστου πάχους ενός περιστομίου, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$\min e_{cb} = 0,015x d_{ob} + 3,2 = 8,6 \text{ mm}$$

Από τα υπόλοιπα περιστόμια θα εξετάσουμε μόνο το μεγαλύτερο όνοιγμα, το οποίο έχει διάμετρο

$$d_{ob} = 168,3 \text{ mm.}$$

Όπως ήδη έχει αναφερθεί για αυτό και για τα μικρότερα ανοίγματα δεν απαιτείται ενισχυτικός δακτύλιος.

Το απαιτούμενο πάχος του συγκεκριμένου περιστομίου συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{sb} = e_{cb} + c_1 + c_2$$

όπου,

$c_1 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω αντιστάθμισης του πάχους της λαμαρίνας και των κατασκευαστικών ανοχών

$c_2 = 1 \text{ mm}$ είναι η προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Το απαιτούμενο πάχος του συγκεκριμένου περιστομίου χωρίς τις προσαυξήσεις υπολογίζεται από τη σχέση

$$e_{cb} = \frac{p_c \cdot d_{ob}}{(2 \cdot f_s - p_c) \cdot v + 2 \cdot p_c} \quad \text{σχέση (7.2-2)}$$

όπου:

| | | |
|----------|-------|---|
| e_{cb} | 0,986 | Απαιτούμενο πάχος του περιστομίου χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| p_c | 1,0 | Πίεση υπολογισμού [N/mm^2] |
| d_{ob} | 168,3 | Εξωτερική διάμετρος του περιστομίου χωρίς τις προσαυξήσεις [mm] |
| f_s | 93,33 | Σταθερά αντοχής του υλικού $\min(R_p/1,5, R_m/2,4)$ [N/mm^2] |
| v | 1 | Συντελεστής ποιότητας συγκολλήσεων |

Για το συγκεκριμένο περιστόμιο επιλέγουμε το υλικό St 35.8 σύμφωνα με το πρότυπο DIN 17 175

Παίρνουμε ως θερμοκρασία αναφοράς τους 300°C

Οι σταθερές αντοχής του υλικού είναι:

- i) Rp για υλικό κατασκευής St 35.8 στους 300°C είναι 140 (πίνακας 6 του DIN 17 175)
Άρα προκύπτει $R_p/1,5 = 93,33$

ii) Rm για υλικό κατασκευής St 35.8 στους 300°C είναι 360 (πίνακας 5 του DIN 17 175)
Άρα προκύπτει $\text{Rm}/2,4=150$

Άρα η σταθερά αντοχής του υλικού είναι $\min(\text{Rp}/1,5, \text{Rm}/2,4)=93,33 [\text{N/mm}^2]$

Τελικά, το απαιτούμενο πάχος αυτού του περιστομίου συμπεριλαμβάνοντας τις προσαυξήσεις παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

| e_{cb} | c_1 | c_2 | e_{sb} | Επιλεγόμενο πάχος για το συγκεκριμένο περιστόμιο |
|----------|-------|-------|----------|--|
| 0,986 | 1 | 1 | 2,986 | 6,3 |

Επίσης, ικανοποιείται η εξίσωση του ελάχιστου πάχους ενός περιστομίου, το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$\min e_{cb} = 0,015 \times d_{ob} + 3,2 = 5,725 \text{ mm} \quad \text{σχέση (8.3-1)}$$

Όλα τα υπόλοιπα περιστόμια θα έχουν πάχος $e_{sb}=5\text{mm}$, καθώς έτσι ικανοποιείται η εξίσωση του ελάχιστου πάχους ενός περιστομίου ακόμα και για το μεγαλύτερο από τα εναπομείναντα περιστόμια με $d_{ob}=60,3\text{mm}$ το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$\min e_{cb} = 0,015 \times d_{ob} + 3,2 = 4,105 \text{ mm}$$

Ο συντελεστής εξασθένισης του συγκεκριμένου ανοίγματος στο κυλινδρικό περίβλημα υπολογίζεται από τη σχέση

$$v_b = \frac{2 \cdot l_{rs}}{(2 \cdot l_{rs} + d_{ob})} = 0,72 \leq 1 \quad \text{σχέση (8.2-5)}$$

Επίσης, πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση της καταπόνησης

$$f_{ab} = \frac{p_c}{1,5} \cdot \left(\frac{d_{is} + e_{rs}}{2 \cdot e_{rs}} + 0,2 \cdot \frac{d_{ib} + e_{rb}}{e_{rb}} \cdot \sqrt{\frac{d_{is} + e_{rs}}{e_{rs}}} \right) \leq \min(f_s, f_b) \quad \text{σχέση (8.3-10)}$$

όπου:

| | | |
|----------|--------|--|
| f_{ab} | 82,068 | Πραγματική φόρτιση $[\text{N/mm}^2]$ |
| f_s | 103,33 | Σταθερά αντοχής του κελύφους $\min(\text{Rp}/1,5, \text{Rm}/2,4) [\text{N/mm}^2]$ |
| f_b | 93,33 | Σταθερά αντοχής του περιστομίου $\min(\text{Rp}/1,5, \text{Rm}/2,4) [\text{N/mm}^2]$ |
| p_c | 1,0 | Πίεση υπολογισμού $[\text{N/mm}^2]$ |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κελύφους [mm] |
| e_{rs} | 16 | Πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| d_{ib} | 155,7 | Εσωτερική διάμετρος του περιστομίου [mm] |
| e_{rb} | 6,3 | Πάχος του περιστομίου [mm] |

Άρα τελικά ισχύει $f_{ab} < f_b$

Τέλος, πρέπει να υπολογιστεί η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ανοιγμάτων έτσι ώστε όλα τα ανοίγματα να θεωρούνται ως μεμονωμένα.

Για όλα τα ανοίγματα πρέπει να ικανοποιείται η εξής συνθήκη

$$P_\phi \geq \frac{\left(\frac{d_{ib1}}{2} + e_{rb1}\right)}{\cos \Psi_1} + \frac{\left(\frac{d_{ib2}}{2} + e_{rb2}\right)}{\cos \Psi_2} + 2 \cdot \sqrt{(d_{is} + e_{rs}) \cdot e_{rs}} \quad \text{σχέση (8.1-4)}$$

Για την απόσταση μεταξύ των περιστομίων της ανθρωποθυρίδας (Φ360) και της παροχής ατμού (Φ168,3)

όπου:

| | | |
|---------------|----------|---|
| P_ϕ | 619,2275 | Η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση από κέντρο σε κέντρο δύο διαδοχικών ανοιγμάτων [mm] |
| d_{ib1} | 348 | Εσωτερική διάμετρος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| e_{rb1} | 6 | Πάχος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| d_{ib2} | 158,3 | Εσωτερική διάμετρος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| e_{rb2} | 5 | Πάχος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| e_{rs} | 16 | Πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| $\cos \Psi_1$ | 1 | Γωνία κλίσης του πρώτου περιστομίου ($\Psi_1=0^0$) |
| $\cos \Psi_2$ | 1 | Γωνία κλίσης του δεύτερου περιστομίου ($\Psi_2=0^0$) |

Τελικά επιλέγουμε $P_\phi=635,85$ mm

Για την απόσταση μεταξύ των περιστομίων της παροχής ατμού (Φ168,3) και της πλήρωσης (Φ48,3)

όπου:

| | | |
|---------------|----------|---|
| P_ϕ | 463,3775 | Η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση από κέντρο σε κέντρο δύο διαδοχικών ανοιγμάτων [mm] |
| d_{ib1} | 158,3 | Εσωτερική διάμετρος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| e_{rb1} | 5 | Πάχος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| d_{ib2} | 38,3 | Εσωτερική διάμετρος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| e_{rb2} | 5 | Πάχος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| e_{rs} | 16 | Πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| $\cos \Psi_1$ | 1 | Γωνία κλίσης του πρώτου περιστομίου ($\Psi_1=0^0$) |
| $\cos \Psi_2$ | 1 | Γωνία κλίσης του δεύτερου περιστομίου ($\Psi_2=0^0$) |

Τελικά επιλέγουμε $P_\phi=791,7$ mm

Για την απόσταση μεταξύ των περιστομίων της πλήρωσης του λέβητα ($\Phi 48,3$) και του ασφαλιστικού ($\Phi 60,3$)

όπου:

| | | |
|--------------|----------|---|
| P_ϕ | 409,3775 | Η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση από κέντρο σε κέντρο δύο διαδοχικών ανοιγμάτων [mm] |
| d_{ib1} | 38,3 | Εσωτερική διάμετρος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| e_{rb1} | 5 | Πάχος του πρώτου περιστομίου [mm] |
| d_{ib2} | 50,3 | Εσωτερική διάμετρος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| e_{rb2} | 5 | Πάχος του δεύτερου περιστομίου [mm] |
| d_{is} | 1954 | Εσωτερική διάμετρος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| e_{rs} | 16 | Πάχος του κυλινδρικού περιβλήματος [mm] |
| $\cos\Psi_1$ | 1 | Γωνία κλίσης του πρώτου περιστομίου ($\Psi_1=0^0$) |
| $\cos\Psi_2$ | 1 | Γωνία κλίσης του δεύτερου περιστομίου ($\Psi_2=0^0$) |

Τελικά επιλέγουμε $P_\phi=845,7$ mm

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

**Χαρακτηριστικές στοιχειομετρίες για συγκεκριμένους τύπους
βιομάζας.**

**Πριονίδι από την επεξεργασία για παραγωγή χαρτονιού.
Πληροφορίες των δειγμάτων**

| | |
|-----------------|--|
| Ομάδα | Κατεργασμένο ξύλο |
| Υπομάδα | μόρια σανίδας |
| Υλικό | πριονίδι από την επεξεργασία για παραγωγή χαρτονιού |
| Αναφορά: | Storm,C.; Spliethoff, H.; Hein,K.R.G.: Generation of a gaseous fuel by gasification or pyrolysis of biomass for use as reburn gas in coal-fired boilers. Proceedings 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 2000, vol. 1 p.689-699. |

Παραπρήσεις: υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο λόγω της μελανίνης στην κόλλα

Material composition

| | Ανάλυση Κατά προσέγγιση (wt. %) | | | Τελική ανάλυση (wt. %) | | | Στοιχειώδης ανάλυση (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-------|-------|------------------------|------|------|--|-----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | |
| Τέφρα | 1.3 | | 1.2 | C | 48.9 | 49.5 | 46.3 | Msr | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND |
| Νερό | | | 5.3 | H | 6.22 | 6.3 | 5.9 | Msr | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND |
| Πτητικές ουσίες | 77.5 | 78.5 | 73.4 | O | 38.5 | 39 | 36.5 | Cal | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND |
| | | | | N | 5.03 | 5.1 | 4.77 | Msr | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | | S | 0.1 | 0.1 | 0.09 | Msr | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND |
| HHV | - | - | - | F | - | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND |
| LHV | - | - | - | Br | - | - | - | ND | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND |
| HHV _{Miner} | 19644 | 19903 | 18603 | Total: | 100 | 100 | 100 | | | | | Zn | - | ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|---|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 1.3 |
| Cellulose | - |
| Hemicellulose | - |
| Lignin | - |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - |
| Lignin acid soluble (ASL) | - |
| Lipids | ND |
| Protein | ND |
| Extractives EtOH/toluene | ND |
| Extractives 95% EtOH | ND |
| Extractives hot water | ND |
| Starch | ND |
| Pectin | ND |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - |

Glossary

daf dry ash free
ar as received
Msr Measured
Lim detection Limit
Cal Calculated
ND Not Determined
Unk Unknown
Avg Average
Sst van Soest
Sgr Sugar Analysis

Total non-structural carbo-hydrates (TNC) - ND

Ash composition

| Ash production method | | Bulk density (kg ar/m ³) | |
|--|-------------------------------|--------------------------------------|---|
| - | | - | |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | | |
| CO ₂ - P ₂ O ₅ - Al ₂ O ₃ - Na ₂ O - | Pb | - | |
| SO ₃ - SiO ₂ - CaO - K ₂ O - | Cd | - | |
| Cl - Fe ₂ O ₃ - MgO - TiO ₂ - | Cu | - | |
| | | Cr | - |
| | | Hg | - |
| | | Mn | - |

Πριονίδι από μαλακό ξύλο
Samples Information

Group Untreated wood
Subgroup Other soft wood
material wood, sawdust
Reference: Tillman,D.A.: Biomass cofiring: The technology, the experience, the combustion consequences; Biomass and Bioenergy 19 (2000) 365-384
Remarks: HHV calculated Btu/lb

Material composition

| | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|------|-----|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| | | | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - ND | Fe | - ND | Pb | - ND |
| Proximate analysis (wt. %) | | | | | | | | | As | - ND | Hg | - ND | Sb | - ND |
| Ash | 1.1 | 0.7 | C | 49.3 | 49.8 | 32.1 | Msr | | B | - ND | K | - ND | Se | - ND |
| Water | | | H | 5.93 | 6 | 3.9 | Msr | | Ba | - ND | Mg | - ND | Si | - ND |
| Volatiles | 84.6 | 85.5 | 55 | O | 43.3 | 43.8 | 28.2 | Msr | Ca | - ND | Mn | - ND | Sn | - ND |
| | | | N | 0.4 | 0.4 | 0.26 | Msr | | Cd | - ND | Mo | - ND | Sr | - ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | S | 0.02 | 0.02 | 0.01 | Msr | | Co | - ND | Na | - ND | Te | - ND |
| HHV | 19410 | 19618 | 12630 | F | - | - | - | | Cr | - ND | Ni | - ND | Ti | - ND |
| LHV | 18115 | 18309 | 10935 | Br | - | - | - | | Cu | - ND | P | - ND | V | - ND |
| HHV _{Milne} | 19385 | 19593 | 12614 | Total: | 100 | 100 | 100 | | | Zn | - ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| Method of analysis | Not Determined | |
|--|----------------|----|
| Total Ash + Biochemical | 1.1 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (All) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ND |
| Protein | - | ND |
| Extractives EtOH/toluene | - | ND |
| Extractives 95% EtOH | - | ND |
| Extractives hot water | - | ND |
| Starch | - | ND |
| Pectin | - | ND |
| SUM C5 | 0 | |
| Arabinan | - | |
| Xylan | - | |
| SUM C6 | 0 | |
| Mannan | - | |
| Galactan | - | |
| Glucan | - | |
| Rhamnan | - | |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | ND |

Glossary

| | |
|-----|-----------------|
| daf | dry ash free |
| ar | as received |
| Msr | Measured |
| ND | Not Determined |
| Lim | detection Limit |
| Cal | Calculated |
| ND | Not Determined |
| Unk | Unknown |
| Avg | Average |
| Sst | van Soest |
| Sgr | Sugar Analysis |

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | | | | | |
| CO ₂ - | Pb - | | | | | |
| P ₂ O ₅ 2.1 | Hg - | | | | | |
| Al ₂ O ₃ 4.1 | Cd - | | | | | |
| Na ₂ O 2.3 | Mn - | | | | | |
| SO ₃ 1.9 | Cu - | | | | | |
| SiO ₂ 23.7 | Cr - | | | | | |
| CaO 40 | | | | | | |
| K ₂ O 9.8 | | | | | | |
| Cl - | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ 1.6 | | | | | | |
| MgO 4.8 | | | | | | |
| TiO ₂ 0.4 | | | | | | |

Πριονίδι βαλανιδιάς
Sample information

| | |
|-------------------|--|
| Group | untreated wood |
| Subgroup | oak |
| Material | timber, acorns, sawdust |
| ID-number | 803 |
| Reference: | T. R. Miles, T. R. Miles,Jr, L. Baxter, R. W. Bryers, B. M. Jenkins and L. L. Oden: Alkali deposits found in biomass power plants. A preliminary investigation of their extend and nature, NREL/TP-433-8142, 82 p. (1995). |
| Remarks: | Red Oak Sawdust, Pennsylvania, clean and dry fines, sawdust. Hazen |

Material composition

| | Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------|--------|---------------------------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - ND | Fe | - ND | Pb | - ND | |
| Ash | 0.3 | 0.3 | C | 50 | 50.1 | 44.2 | Msr | As | - ND | Hg | - ND | Sb | - ND |
| Water | | 11.4 | H | 5.92 | 5.9 | 5.2 | Msr | B | - ND | K | - ND | Se | - ND |
| Volatiles | 86.2 | 86.5 | O | 43.8 | 43.9 | 38.7 | Cal | Ba | - ND | Mg | - ND | Si | - ND |
| | | | N | 0.03 | 0.03 | 0.03 | Msr | Ca | - ND | Mn | - ND | Sn | - ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | S | 0.01 | 0.01 | 0.01 | Msr | Cd | - ND | Mo | - ND | Sr | - ND |
| HHV | 19478 | 19538 | F | - | - | - | Lim | Co | - ND | Na | - ND | Te | - ND |
| LHV | 18186 | 18243 | Br | - | - | - | ND | Cr | - ND | Ni | - ND | Ti | - ND |
| HHV _{Milne} | 19604 | 19665 | Total: | 100 | 100 | 100 | | Cu | - ND | P | - ND | V | - ND |
| | | | | | | | | | | Zn | - ND | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|--|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 0.3 |
| Cellulose | - ND |
| Hemicellulose | - ND |
| Lignin | - ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - ND |
| Lipids | - ND |
| Protein | - ND |
| Extractives EtOH/toluene | - ND |
| Extractives 95% EtOH | - ND |
| Extractives hot water | - ND |
| Starch | - ND |
| Pectin | - ND |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - ND |

Glossary

| | |
|-----|-----------------|
| daf | dry ash free |
| ar | as received |
| Msr | Measured |
| Lim | detection Limit |
| Cal | Calculated |
| ND | Not Determined |
| Unk | Unknown |
| Avg | Average |
| Sst | van Soest |
| Sgr | Sugar Analysis |

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m³) |
|------------------------------|---|
| ASTM D1102; 600 oC | - |

| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| CO ₂ 14.3 | Pb - |
| P ₂ O ₅ 1.3 | Hg - |
| Al ₂ O ₃ 3 | |
| Na ₂ O 1.4 | |
| SO ₃ 2.7 | Cd - |
| SiO ₂ 21 | Mn - |
| CaO 10.9 | |
| K ₂ O 22.4 | |
| Cl - | Cu - |
| Fe ₂ O ₃ 2.9 | Cr - |
| MgO 4.2 | |
| TiO ₂ 0.3 | |

Άχυρο ρυζιού
Sample information

Group straw (stalk/cob/ear)
 Subgroup rice
 Material straw of rice
 Reference: http://edv1.vt.tuwien.ac.at/AG_HOFBA/BIOBIB/Biobib.htm (1997).
 Remarks:

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | |
| Ash | 19.1 | - | C | 38.9 | 48.1 | - | Unk | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND | |
| Water | | 8 | H | 4.74 | 5.9 | - | Unk | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND | |
| Volatiles | - | - | O | 35.3 | 43.6 | - | Cal | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND | |
| | | | N | 1.37 | 1.69 | - | Unk | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND | |
| Calorific value (kJ/kg) | S | 0.11 | 0.14 | - | Unk | | | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND | |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.47 | 0.581 | - | Unk | Co | - | ND | Na | - | ND | Te | - | ND |
| HHV | 15954 | 19718 | - | F | - | - | - | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND | |
| LHV | 14920 | 18440 | - | Br | - | - | - | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND | |
| HHV _{Millne} | 14904 | 18421 | - | Total: | 100 | 100 | 0 | | | | Zn | - | ND | | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

Method of analysis Not Determined

| | | |
|--|------|----|
| Total Ash + Biochemical | 19.1 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ND |
| Protein | - | ND |
| Extractives EtOH/toluene | - | ND |
| Extractives 95% EtOH | - | ND |
| Extractives hot water | - | ND |
| Starch | - | ND |
| Pectin | - | ND |
| SUM C5 | 0 | |
| Arabinan | - | |
| Xylan | - | |
| SUM C6 | 0 | |
| Mannan | - | |
| Galactan | - | |
| Glucan | - | |
| Rhamnan | - | |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | ND |

Glossary

| | |
|-----|-----------------|
| daf | dry ash free |
| ar | as received |
| Msr | Measured |
| Lim | detection Limit |
| Cal | Calculated |
| ND | Not Determined |
| Unk | Unknown |
| Avg | Average |
| Sst | van Soest |
| Sgr | Sugar Analysis |

Ash composition

| Ash production method | | Bulk density (kg ar/m ³) |
|--|-------------------------------|--------------------------------------|
| laboratory | | - |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | |
| CO ₂ - P ₂ O ₅ 1.4 Al ₂ O ₃ 1.4 Na ₂ O 0.4 | Pb - Hg - | |
| SO ₃ 0.7 SiO ₂ 73 CaO 1.9 K ₂ O 13.5 | Cd - Mn - | |
| Cl - Fe ₂ O ₃ 0.6 MgO 1.8 TiO ₂ - | Cu - Cr - | |

Ορυζόφλοιός
Sample information

Group husk/shell/pit

Subgroup rice

Material rice husk

Reference: S. Gaur and T.B. Reed; An Atlas of Thermal Data For Biomass and Other Fuels. NREL/TP-433-7965, June 1995

Remarks:

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - ND | Fe | - ND | Pb | - ND | | |
| Ash | 15.8 | - | C | 38.9 | 46.2 | - | Msr | As | - ND | Hg | - ND | Sb | - ND | |
| Water | - | H | 5.1 | 6.1 | - | Msr | B | - ND | K | - ND | Se | - ND | | |
| Volatiles | 69.3 | 82.3 | - | O | 37.9 | 45 | - | Cal | Ba | - ND | Mg | - ND | Si | - ND |
| | | | | N | 2.17 | 2.58 | - | Msr | Ca | - ND | Mn | - ND | Sn | - ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | S | 0.12 | 0.14 | - | Msr | Cd | - ND | Mo | - ND | Sr | - ND | | |
| | dry | daf | ar | Cl | - | - | ND | Co | - ND | Na | - ND | Te | - ND | |
| HHV | 15670 | 18610 | - | F | - | - | ND | Cr | - ND | Ni | - ND | Ti | - ND | |
| LHV | 14557 | 17289 | - | Br | - | - | ND | Cu | - ND | P | - ND | V | - ND | |
| HHV _{Millne} | 15011 | 17828 | - | Total: | 100 | 100 | 0 | | | Zn | - ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|--|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 15.8 |
| Cellulose | - ND |
| Hemicellulose | - ND |
| Lignin | - ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - ND |
| Lipids | - ND |
| Protein | - ND |
| Extractives EtOH/toluene | - ND |
| Extractives 95% EtOH | - ND |
| Extractives hot water | - ND |
| Starch | - ND |
| Pectin | - ND |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - ND |

Glossary

daf dry ash free

ar as received

Msr Measured

Lim detection Limit

Cal Calculated

ND Not Determined

Unk Unknown

Avg Average

Sst van Soest

Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m³) |
|------------------------------|---|
| - | - |

Ash composition (wt.% (ash)) **Ash composition (mg/kg (ash))**

| | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|----|---|----|---|
| CO ₂ - | P ₂ O ₅ - | Al ₂ O ₃ - | Na ₂ O - | Pb | - | Hg | - |
| SO ₃ - | SiO ₂ - | CaO - | K ₂ O - | Cd | - | Mn | - |
| Cl - | Fe ₂ O ₃ - | MgO - | TiO ₂ - | Cu | - | Cr | - |

Άχυρο ρυζιού, ενυδατωμένο με βρόχινο νερό
Sample information

Group straw (stalk/cob/ear)
Subgroup rice
Material straw of rice, hydration with pluvial water
Reference: B. M. Jenkins, R. R. Bakker and J. B. Wei: On the properties of washed straw. Biomass and Bioenergy 10 (4) pp. 177-200 (1996).
Remarks: 65 mm cumulative precipitation

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - ND | Fe | - ND | Pb | - ND | | |
| Ash | 17.8 | - | C | 39.5 | 48.1 | - | Msr | As | - ND | Hg | - ND | Sb | - ND | |
| Water | - | - | H | 5.15 | 6.3 | - | Msr | B | - ND | K | - ND | Se | - ND | |
| Volatiles | - | - | O | 36.7 | 44.7 | - | Cal | Ba | - ND | Mg | - ND | Si | - ND | |
| | | | N | 0.6 | 0.73 | - | Msr | Ca | - ND | Mn | - ND | Sn | - ND | |
| Calorific value (kJ/kg) | S | 0.06 | 0.07 | - | Msr | Cd | - ND | Mo | - ND | Sr | - ND | | | |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.06 | 0.073 | - | Msr | Co | - ND | Na | - ND | Te | - ND |
| HHV | 15820 | 19255 | - | F | - | - | ND | Cr | - ND | Ni | - ND | Tl | - ND | |
| LHV | 14696 | 17887 | - | Br | - | - | ND | Cu | - ND | P | - ND | V | - ND | |
| HHV _{Millne} | 15594 | 18980 | - | Total: | 100 | 100 | 0 | | | Zn | - ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | | |
|--|----------------|---------------------|
| Method of analysis | Not Determined | |
| Total Ash + Biochemical | 17.8 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ndf dry ash free |
| Protein | - | ar as received |
| Extractives EtOH/toluene | - | Msr Measured |
| Extractives 95% EtOH | - | Lim detection Limit |
| Extractives hot water | - | Cal Calculated |
| Starch | - | ND Not Determined |
| Pectin | - | Unk Unknown |
| SUM C5 | 0 | Avg Average |
| Arabinan | - | Sst van Soest |
| Xylan | - | Sgr Sugar Analysis |
| SUM C6 | 0 | |
| Mannan | - | |
| Galactan | - | |
| Glucan | - | |
| Rhamnan | - | |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | ND |

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m³) | | |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------|
| 2 h at 575 degC | | | |
| | | | |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | | |
| CO ₂ - | P ₂ O ₅ 0.6 | Al ₂ O ₃ 0.8 | Na ₂ O 0.2 |
| SO ₃ 0.4 | SiO ₂ 91.6 | CaO 2.1 | K ₂ O 2.2 |
| Cl - | Fe ₂ O ₃ 0.5 | MgO 1.3 | TiO ₂ 0 |
| | Pb | - | Hg |
| | Cd | - | Mn |
| | Cu | - | Cr |

**Άχυρο ρυζιού, ενυδατώμενό
Sample information**

Group straw (stalk/cob/ear)
Subgroup rice
Material straw of rice, hydrated
Reference: B. M. Jenkins, R. R. Bakker and J. B. Wei: On the properties of washed straw. Biomass and Bioenergy 10 (4) pp. 177-200 (1996).
Remarks:

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|------|-------|-------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | | |
| Ash | 17.1 | 2.1 | C | 40.1 | 48.3 | 4.8 | Msr | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND | |
| Water | | 88 | H | 5.2 | 6.3 | 0.6 | Msr | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND | |
| Volatiles | - | - | O | 37 | 44.7 | 4.4 | Cal | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND | |
| | | | N | 0.48 | 0.58 | 0.06 | Msr | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND | |
| Calorific value (kJ/kg) | | | S | 0.06 | 0.07 | 0.01 | Msr | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND | |
| | | | dry | daf | ar | Cl | 0.06 | 0.072 | 0.007 | Msr | Co | - | ND | Na | - | ND | |
| HHV | 15850 | 19119 | 1902 | F | - | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND |
| LHV | 14715 | 17751 | -383 | Br | - | - | - | ND | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND |
| HHV _{Millne} | 15820 | 19083 | 1898 | Total: | 100 | 100 | 100 | | | | | Zn | - | ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|--|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 17.1 |
| Cellulose | - |
| Hemicellulose | - |
| Lignin | - |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - |
| Lignin acid soluble (ASL) | - |
| Lipids | - |
| Protein | - |
| Extractives EtOH/toluene | - |
| Extractives 95% EtOH | - |
| Extractives hot water | - |
| Starch | - |
| Pectin | - |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | ND |

Glossary
daf dry ash free
ar as received
Msr Measured
Lim detection Limit
Cal Calculated
ND Not Determined
Unk Unknown
Avg Average
Sst van Soest
Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m3) |
|--|-------------------------------|
| 2 h at 575 degC | - |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) |
| CO ₂ - P ₂ O ₅ 0.4 Al ₂ O ₃ 1 Na ₂ O 0.2 | Pb - Hg - |
| SO ₃ 0.3 SiO ₂ 93.1 CaO 2.1 K ₂ O 2 | Cd - Mn - |
| Cl - Fe ₂ O ₃ 0.5 MgO 0.9 TiO ₂ 0.1 | Cu - Cr - |

**Μη επεξεργασμένο ρύζι
Sample information**

Group straw (stalk/cob/ear)
Subgroup rice
Material not processed rice
Reference: B. M. Jenkins, R. R. Bakker and J. B. Wei: On the properties of washed straw. Biomass and Bioenergy 10 (4) pp. 177-200 (1996).
Remarks: imperial valley source

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|-----|-----|------|-----|----|-------|------|-----|------|------|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | |
| Ash | 18.6 | - | C | 38 | 46.6 | - | Msr | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - ND | |
| Water | - | - | H | 4.8 | 5.9 | - | Msr | B | - | ND | K | 17500 | Msr | Se | - ND | |
| Volatiles | - | - | O | 37.3 | 45.8 | - | Cal | Ba | - | ND | Mg | 2100 | Msr | Si | - ND | |
| | | | N | 0.52 | 0.64 | - | Msr | Ca | 2100 | Msr | Mn | - | ND | Sn | - ND | |
| Calorific value (kJ/kg) | S | 0.09 | 0.11 | - | Msr | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - ND | | | |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.74 | 0.909 | - | Msr | Co | - | ND | Na | 2600 | Msr | Te | - ND |
| HHV | 15250 | 18742 | - | F | - | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - ND |
| LHV | 14203 | 17454 | - | Br | - | - | - | ND | Cu | - | ND | P | 2200 | Msr | V | - ND |
| HHV _{Min} | 14526 | 17852 | - | Total: | 100 | 100 | 0 | | | | | Zn | - | ND | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| Method of analysis | Not Determined | |
|--|----------------|---------------------|
| Total Ash + Biochemical | 18.6 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ND |
| Protein | - | ND |
| Extractives EtOH/toluene | - | ND |
| Extractives 95% EtOH | - | ND |
| Extractives hot water | - | ND |
| Starch | - | ND |
| Pectin | - | ND |
| SUM C5 | 0 | |
| Arabinan | - | Glossary |
| Xylan | - | daf dry ash free |
| SUM C6 | 0 | ar as received |
| Mannan | - | Msr Measured |
| Galactan | - | Lim detection Limit |
| Glucan | - | Cal Calculated |
| Rhamnan | - | ND Not Determined |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | Unk Unknown |
| | | Avg Average |
| | | Sst van Soest |
| | | Sgr Sugar Analysis |
| | | |

Ash composition**Ash production method**

2 h at 575 degC

| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | | | |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------|
| CO ₂ - | P ₂ O ₅ 2.7 | Al ₂ O ₃ 1.4 | Na ₂ O 1.9 | Pb - Hg - |
| SO ₃ 0.8 | SiO ₂ 74.3 | CaO 1.6 | K ₂ O 11.3 | Cd - Mn - |
| Cl - | Fe ₂ O ₃ 0.7 | MgO 1.9 | TiO ₂ 0 | Cu - Cr - |

Αραβόσιτος
Sample information

Group straw (stalk/cob/ear)
Subgroup maize/corn
Material maize
Reference: <http://rredc.nrel.gov:80/biomass/doe/nrel/comp/alki/appendix.html> (1998).
Remarks:

Material composition

| | Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------|-------|---------------------------|------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - ND | Fe | - ND | Pb | - ND | | |
| Ash | 5.1 | 4.7 | | C | 46.8 | 49.3 | 44 | Msr | As | - ND | Hg | - ND | | |
| Water | | 6.1 | | H | 5.74 | 6 | 5.4 | Msr | B | - ND | K | - ND | | |
| Volatiles | 80.9 | 85.2 | 76 | O | 41.4 | 43.6 | 38.9 | Cal | Ba | - ND | Mg | - ND | | |
| | | | | N | 0.66 | 0.7 | 0.62 | Msr | Ca | - ND | Mn | - ND | | |
| Calorific value (kJ/kg) | | S | 0.11 | 0.11 | 0.1 | Msr | Cd | - ND | Mo | - ND | Sr | - ND | | |
| | HHV | 18101 | 19065 | 17004 | F | - | - | - | Co | - ND | Na | - ND | | |
| LHV | 16849 | 17746 | 15680 | Br | - | - | - | Cr | - ND | Ni | - ND | Ti | - ND | |
| HHV _{Min} | 18442 | 19424 | 17324 | Total: | 100 | 100 | 100 | | P | - ND | V | - ND | Zn | - ND |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|--|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 5.1 |
| Cellulose | - ND |
| Hemicellulose | - ND |
| Lignin | - ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - ND |
| Lipids | - ND |
| Protein | - ND |
| Extractives EtOH/toluene | - ND |
| Extractives 95% EtOH | - ND |
| Extractives hot water | - ND |
| Starch | - ND |
| Pectin | - ND |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - ND |
| Xylan | - ND |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - ND |
| Galactan | - ND |
| Glucan | - ND |
| Rhamnan | - ND |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - ND |

Glossary

daf dry ash free
ar as received
Msr Measured
Lim detection Limit
Cal Calculated
ND Not Determined
Unk Unknown
Avg Average
Sst van Soest
Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | | Bulk density (kg ar/m³) |
|--|--------------------------------------|---|
| - | | - |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | |
| CO ₂ - P ₂ O ₅ 8.7 Al ₂ O ₃ 2 Na ₂ O 0.2 | Pb - | Hg - |
| SO ₃ - SiO ₂ 54 CaO 8.7 K ₂ O 20.7 | Cd - | Mn - |
| Cl - Fe ₂ O ₃ - MgO 6.1 TiO ₂ - | Cu - | Cr - |

Πυρήνας ροδάκινων

Sample information

| | |
|-------------------|--|
| Group | husk/shell/pit |
| Subgroup | Others |
| Material | core of peaches |
| Reference: | O. Kitani and C. W. Hall: Biomass Handbook, Gordon and Breach science publishers, New York (1989). |
| Remarks: | |

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | | |
| Ash | 1 | - | C | 53 | 53.6 | - | Msr | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND | |
| Water | | 15 | H | 5.9 | 6 | - | Msr | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND | |
| Volatiles | 79.1 | 79.9 | - | O | 39.1 | 39.5 | - | Msr | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND |
| | | | | N | 0.32 | 0.32 | - | Msr | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | S | 0.05 | 0.05 | - | Msr | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND | |
| | dry | daf | ar | Cl | - | - | - | ND | Co | - | ND | Na | - | ND | Te | - | ND |
| HHV | 20820 | 21037 | - | F | - | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND |
| LHV | 19533 | 19736 | - | Br | - | - | - | ND | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND |
| HHV _{Millne} | 21125 | 21345 | - | Total: | 99.4 | 99.4 | 0 | | | | | Zn | - | ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| Method of analysis | Not Determined | |
|--|----------------|----|
| Total Ash + Biochemical | 1 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ND |
| Protein | - | ND |
| Extractives EtOH/toluene | - | ND |
| Extractives 95% EtOH | - | ND |
| Extractives hot water | - | ND |
| Starch | - | ND |
| Pectin | - | ND |
| SUM C5 | 0 | |
| Arabinan | - | |
| Xylan | - | |
| SUM C6 | 0 | |
| Mannan | - | |
| Galactan | - | |
| Glucan | - | |
| Rhamnan | - | |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | ND |

Glossary

| | |
|-----|-----------------|
| daf | dry ash free |
| ar | as received |
| Msr | Measured |
| Lim | detection Limit |
| Cal | Calculated |
| ND | Not Determined |
| Unk | Unknown |
| Avg | Average |
| Sst | van Soest |
| Sgr | Sugar Analysis |

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) |
|-----------------------|--------------------------------------|
| - | - |

Ash composition (wt.% (ash))

| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) |
|--|-------------------------------|
| CO ₂ - P ₂ O ₅ - Al ₂ O ₃ - Na ₂ O - | Pb - Hg - |
| SO ₃ - SiO ₂ - CaO - K ₂ O - | Cd - Mn - |
| Cl - Fe ₂ O ₃ - MgO - TiO ₂ - | Cu - Cr - |

Βαγάσση ζαχαροκάλαμων
Sample information

Group organic residue/product
Subgroup Bagasse
Material bagasse of sugars cane
ID-number 1900
Reference: Miles,T.R.,Jr.; Miles,T.R.: Alkali deposits found in biomass power plants: A preliminary investigation of their extent and nature. Summary report NREL/TZ-2-11226-1
Remarks:

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|-------|-----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | |
| Ash | 1.7 | | 1.5 | C | 49 | 49.8 | 44 | Msr | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND |
| Water | | 10.3 | | H | 5.87 | 6 | 5.3 | Msr | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND |
| Volatiles | 85.4 | 86.9 | 76.6 | O | 43.3 | 44 | 38.8 | Cal | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND |
| | | | | N | 0.1 | 0.1 | 0.09 | Msr | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | | S | 0.06 | 0.06 | 0.05 | Msr | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.02 | 0.02 | 0.018 | Msr | Co | - | ND | Na | - | ND | Te | - | ND |
| HHV | 19141 | 19468 | 17171 | F | - | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND |
| LHV | 17860 | 18165 | 15771 | Br | - | - | - | ND | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND |
| HHV _{mine} | 19244 | 19572 | 17263 | Total: | 100 | 100 | 100 | | | | | Zn | - | ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|--|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 1.7 |
| Cellulose | - |
| Hemicellulose | - |
| Lignin | - |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - |
| Lignin acid soluble (ASL) | - |
| Lipids | - |
| Protein | - |
| Extractives EtOH/toluene | - |
| Extractives 95% EtOH | - |
| Extractives hot water | - |
| Starch | - |
| Pectin | - |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - |
| | ND |

Glossary

daf dry ash free
 ar as received
 Msr Measured
 ND Not Determined
 Lim detection Limit
 Cal Calculated
 Unk Unknown
 Avg Average
 Sst van Soest
 Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) | | | | | |
|------------------------------|--------------------------------------|-----|--------------------------------|------|-------------------|-----|
| Ash composition (wt.% (ash)) | | | Ash composition (mg/kg (ash)) | | | |
| CO ₂ | P ₂ O ₅ | 5 | Al ₂ O ₃ | 11.4 | Na ₂ O | 2.5 |
| SO ₃ | SiO ₂ | 5.1 | CaO | 5.3 | K ₂ O | 9.8 |
| Cl | Fe ₂ O ₃ | 8 | MgO | 5.8 | TiO ₂ | 1.4 |
| | | | Pb | - | Hg | - |
| | | | Cd | - | Mn | - |
| | | | Cu | - | Cr | - |

Σακχαρότευτλο

Sample information

Group grass/plant
Subgroup other plants
Material sugar beet
Reference: http://edv1.vt.tuwien.ac.at/AG_HOFBA/BIOBIB/Biobib.htm (1997).
Remarks:

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|-------|---|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | |
| Ash | 4.8 | - | C | 44.5 | 46.7 | - | Unk | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND | |
| Water | - | - | H | 5.9 | 6.2 | - | Unk | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND | |
| Volatiles | - | - | O | 42.8 | 44.9 | - | Cal | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND | |
| | | | N | 1.84 | 1.93 | - | Unk | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND | |
| Calorific value (kJ/kg) | S | 0.13 | 0.14 | - | Unk | | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND | | |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.053 | 0.056 | - | Unk | Co | - | ND | Na | - | ND | Te | - | ND |
| HHV | 17700 | 18592 | - | F | - | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND |
| LHV | 16600 | 17437 | - | Br | - | - | - | ND | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND |
| HHV _{Millie} | 17559 | 18445 | - | Total: | 100 | 100 | 0 | | | | | Zn | - | ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| Method of analysis | Not Determined | |
|--|----------------|---------------------|
| Total Ash + Biochemical | 4.8 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ndf dry ash free |
| Protein | - | ar as received |
| Extractives EtOH/toluene | - | Msr Measured |
| Extractives 95% EtOH | - | Lim detection Limit |
| Extractives hot water | - | Cal Calculated |
| Starch | - | ND Not Determined |
| Pectin | - | Unk Unknown |
| SUM C5 | 0 | Avg Average |
| Arabinan | - | Sst van Soest |
| Xylan | - | Sgr Sugar Analysis |
| SUM C6 | 0 | |
| Mannan | - | |
| Galactan | - | |
| Glucan | - | |
| Rhamnan | - | |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | ND |

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) | | | |
|---|--------------------------------------|-----------------------|--------|-------|
| industrial | | | | |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | | | |
| CO ₂ - P ₂ O ₅ 5.2 | Al ₂ O ₃ 2.5 | Na ₂ O 3.1 | Pb - | Hg - |
| SO ₃ - SiO ₂ 21.7 | CaO 37 | K ₂ O 8.4 | Cd - | Mn - |
| Cl - Fe ₂ O ₃ 1.3 | MgO 13 | TiO ₂ - | Cu 124 | Cr 58 |

Υπόλειμματα ελιών, από την παραγωγή ελαιολάδου
Sample information

Group husk/shell/pit
Subgroup olive
Material remains of olives, from the production of olive oil
ID-number 1764
Reference: S.Arvelakis, C.Sotiriou, A.Moutsatsou and E.G.Koukios: Prediction of the behaviour of biomass ash in fluidized bed combustors and gasifiers. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 56 (3) pp. 1271-1278 (1999).
Remarks: Cl and O-content from S.Arvelakis et.al. Proc. 5th Eur. Conf. on Industrial Furnaces and Boilers, Vol.2,p.163-172. See also ID 1968, 1969 and 1970. Slightly different ash composition reported in Biomass and Bioenergy 22 (2002) 55-69.

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|-------|---|------|------|----|------|----|------|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - ND | Fe | - ND | Pb | - ND |
| Ash | 4.6 | | 4.3 | C | 50.7 | 53.1 | 47.9 | Msr | As | - ND | Hg | - ND |
| Water | | | | H | 5.89 | 6.2 | 5.6 | Msr | B | - ND | K | - ND |
| Volatiles | 72 | 75.5 | 68 | O | 37 | 38.8 | 35 | Msr | Ba | - ND | Mg | - ND |
| | | | | N | 1.36 | 1.43 | 1.29 | Msr | Ca | - ND | Mn | - ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | | S | 0.3 | 0.31 | 0.28 | Msr | Cd | - ND | Mo | - ND |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.18 | 0.189 | 0.17 | Msr | Co | - ND | Na | - ND |
| HHV | 21220 | 22243 | 20053 | F | - | - | - | ND | Cr | - ND | Ni | - ND |
| LHV | 19935 | 20896 | 18704 | Br | - | - | - | ND | Cu | - ND | P | - ND |
| HHV _{Min} | 20423 | 21408 | 19300 | Total: | 100.1 | 100.1 | 100 | | | | Zn | - ND |

Biochemical composition (wt.% dry)

| Method of analysis | Not Determined | |
|---|----------------|--------------------|
| Total Ash + Biochemical | 4.6 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ND |
| Protein | - | ND |
| Extractives EtOH/toluene | - | ND |
| Extractives 95% EtOH | - | ND |
| Extractives hot water | - | ND |
| Starch | - | ND |
| Pectin | - | ND |
| SUM C5 | 0 | |
| Arabinan | - | Sst van Soest |
| Xylan | - | Sgr Sugar Analysis |
| SUM C6 | 0 | |
| Mannan | - | |
| Galactan | - | |
| Glucan | - | |
| Rhamnan | - | |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | ND |

Glossary

daf dry ash free
 ar as received
 Msr Measured
 Lim detection Limit
 Cal Calculated
 ND Not Determined
 Unk Unknown
 Avg Average
 Sst van Soest
 Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Ash composition (wt.% (ash)) | | | Ash composition (mg/kg (ash)) | | | Bulk density (kg ar/m ³) |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----|---|--------------------------------------|
| 550degC | | | | | | | - |
| CO ₂ | P ₂ O ₅ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | 8.9 | Pb | - | Hg |
| SO ₃ | 5 SiO ₂ | 32.6 CaO | 21.3 K ₂ O | 15.1 | Cd | - | Mn |
| Cl | 1.4 Fe ₂ O ₃ | MgO | 7.9 TiO ₂ | - | Cu | - | Cr |

Ελιά
Sample information

Group husk/shell/pit
Subgroup olive
Material olive
Reference: http://edv1.vt.tuwien.ac.at/AG_HOFBA/BIOBIB/Biobib.htm (1997).

Remarks:

Material composition

| | Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------|------|---------------------------|------|-------|---|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | |
| Ash | 1.5 | - | C | 37.8 | 38.4 | - | Unk | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND | |
| Water | - | - | H | 6.23 | 6.3 | - | Unk | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND | |
| Volatiles | - | - | O | 53.6 | 54.4 | - | Cal | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND | |
| | | | N | 0.71 | 0.72 | - | Unk | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND | |
| Calorific value (kJ/kg) | S | 0.03 | 0.03 | - | Unk | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND | | | |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.07 | 0.071 | - | Unk | Co | - | ND | Na | - | ND | Te | - | ND |
| HHV | 21926 | 22267 | - | F | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND | |
| LHV | 20567 | 20886 | - | Br | - | - | ND | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND | |
| HHV _{Millne} | 14593 | 14820 | - | Total: | 100 | 100 | 0 | | | | Zn | - | ND | | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| Method of analysis | Not Determined | |
|--|----------------|--------------------|
| Total Ash + Biochemical | 1.5 | |
| Cellulose | - | ND |
| Hemicellulose | - | ND |
| Lignin | - | ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - | ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - | ND |
| Lipids | - | ND |
| Protein | - | ND |
| Extractives EtOH/toluene | - | ND |
| Extractives 95% EtOH | - | ND |
| Extractives hot water | - | ND |
| Starch | - | ND |
| Pectin | - | ND |
| SUM C5 | 0 | Avg Average |
| Arabinan | - | Sst van Soest |
| Xylan | - | Sgr Sugar Analysis |
| SUM C6 | 0 | |
| Mannan | - | |
| Galactan | - | |
| Glucan | - | |
| Rhamnan | - | |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - | ND |

Glossary

| | |
|-----|-----------------|
| daf | dry ash free |
| ar | as received |
| Msr | Measured |
| Lim | detection Limit |
| Cal | Calculated |
| ND | Not Determined |
| Unk | Unknown |
| Avg | Average |
| Sst | van Soest |
| Sgr | Sugar Analysis |

Ash composition

| Ash production method | | Bulk density (kg ar/m3) |
|---|--------------------------------------|-------------------------|
| laboratory | | |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | |
| CO ₂ - P ₂ O ₅ 2.7 Al ₂ O ₃ 5.3 Na ₂ O 29.9 | Pb - Hg - | |
| SO ₃ 2.4 SiO ₂ 23.1 CaO 10.9 K ₂ O 5.2 | Cd - Mn - | |
| Cl - Fe ₂ O ₃ 5.1 MgO 3 TiO ₂ 0.1 | Cu - Cr - | |

Κλαδέματα ελιών
Sample information

| | |
|------------|--|
| Group | untreated wood |
| Subgroup | other hard wood |
| Material | loppings of olives |
| ID-number | 2294 |
| Reference: | F. Suárez-García, A. Martínez-Alonso, M. Fernández Llorente, J.M.D. Tarascon: Inorganic matter characterization in vegetable biomass feedstocks. Fuel 81 (2002) 1161-1169. |

Remarks:

Material composition

Elemental analysis (mg/kg sample
(dry))

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Al | 1000 | Msr | Fe | 1300 | Msr | Pb | - | ND | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|-------|-------|-------|-----|-------|------|-----|------|-----|-----|----|-------|-----|
| dry | daf | ar | dry | daf | ar | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND | | | |
| Ash | 13.3 | 12.7 | C | 40.7 | 46.9 | 38.8 | Msr | B | - | ND | K | 3000 | Msr | Se | - | ND | |
| Water | | 4.6 | H | 5.73 | 6.6 | 5.5 | Msr | | | | | | | | | | |
| Volatiles | 76.2 | 87.9 | 72.7 | O | 41 | 47.2 | 39.1 | Msr | Ba | 11 | Msr | Mg | 850 | Msr | Si | 36000 | Msr |
| | | | | N | 0.59 | 0.68 | 0.56 | Msr | | | | | | | | | |
| Calorific value (kJ/kg) | | | S | 0.07 | 0.08 | 0.07 | Msr | Ca | 11000 | Msr | Mn | 26 | Msr | Sn | - | ND | |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.03 | 0.035 | 0.029 | Msr | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | 31 | Msr |
| HHV | - | - | - | F | - | - | - | ND | Co | - | ND | Na | 72 | Msr | Te | - | ND |
| LHV | - | - | - | Br | - | - | - | ND | | | | | | | | | |
| HHV _{Millne} | 16291 | 18790 | 15541 | Total: | 101.4 | 101.6 | 101.3 | | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | 37 | Msr |
| | | | | | | | | Cu | - | ND | P | 650 | Msr | V | - | ND | |
| | | | | | | | | | | Zn | 15 | | | | | | Msr |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|---|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 13.3 |
| Cellulose | - ND |
| Hemicellulose | - ND |
| Lignin | - ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - ND |
| Lipids | - ND |
| Protein | - ND |
| Extractives EtOH/toluene | - ND |
| Extractives 95% EtOH | - ND |
| Extractives hot water | - ND |
| Starch | - ND |
| Pectin | - ND |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - ND |

Glossary

daf dry ash free

ar as received

Msr Measured

Lim detection Limit

Cal Calculated

ND Not Determined

Unk Unknown

Avg Average

Sst van Soest

Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) |
|-----------------------|--------------------------------------|
| - | - |

| Ash composition (wt. % (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) |
|--|-------------------------------|
| CO ₂ - P ₂ O ₅ 1.1 Al ₂ O ₃ 1.4 Na ₂ O 0.1 | Pb - Hg - |
| SO ₃ - SiO ₂ 57 CaO 12 K ₂ O 2.7 | Cd - Mn - |
| Cl - Fe ₂ O ₃ 1.4 MgO 1.1 TiO ₂ 0 | Cu - Cr - |

Υπόλειμματα ελιών, που διυλίζεται
sample information

| | |
|-------------------|---|
| Group | husk/shell/pit |
| Subgroup | olive |
| Material | remains of olives, that distills |
| Reference: | Arvelakis,S.; Gehrmann,H.;Beckman,M.; Koukios,E.G.: Effect of leaching on the ash behaviour of olive residue during fluidised bed gasification. Proc. 5th Eur. Conf. on Industrial Furnaces&Boilers 2000,vol.2,p.163-172. |
| Remarks: | Ash composition from Arvelakis et al., Biomass and Bioenergy 22 (2002) 55-69. |

Material composition

| | Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------------------------|-------|-------|---------------------------|------|-------|---|-----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | |
| Ash | 2.4 | 2.2 | | C | 54 | 55.4 | 49.8 | Msr | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND |
| Water | | 7.8 | | H | 5.8 | 5.9 | 5.3 | Msr | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND |
| Volatiles | 78.3 | 80.3 | 72.2 | O | 35.5 | 36.4 | 32.7 | Cal | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND |
| | | | | N | 1.9 | 1.95 | 1.75 | Msr | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | | S | 0.3 | 0.31 | 0.28 | Msr | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.04 | 0.041 | 0.037 | Msr | Co | - | ND | Na | - | ND | Te | - | ND |
| HHV | 20790 | 21308 | 19162 | F | - | - | - | ND | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND |
| LHV | 19524 | 20011 | 17804 | Br | - | - | - | ND | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND |
| HHV _{Milne} | 21597 | 22135 | 19906 | Total: | 100 | 100 | 100 | | | | | | | | Zn | - | ND |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|--|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 2.4 |
| Cellulose | - |
| Hemicellulose | - |
| Lignin | - |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - |
| Lignin acid soluble (ASL) | - |
| Lipids | - |
| Protein | - |
| Extractives EtOH/toluene | - |
| Extractives 95% EtOH | - |
| Extractives hot water | - |
| Starch | - |
| Pectin | - |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - |
| | ND |

Glossary

daf dry ash free

ar as received

Msr Measured

ND Not Determined

Lim detection Limit

Cal Calculated

Unk Unknown

Avg Average

Sst van Soest

Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|--|--|--|--|
| - | - | | | | | |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | | | | | |
| CO ₂ - P ₂ O ₅ - Al ₂ O ₃ 0.6 Na ₂ O 0.1 | Pb - Hg - | | | | | |
| SO ₃ 3.3 SiO ₂ 43.6 CaO 23.4 K ₂ O 4.9 | Cd - Mn - | | | | | |
| Cl 0 Fe ₂ O ₃ 2.4 MgO 1.1 TiO ₂ 0.1 | Cu - Cr - | | | | | |

Πυρήνες ελιών, μέρος > 1mm, που διυλιζονται

Sample information

Group husk/shell/pit
Subgroup olive
Material cores of olives, part > 1mm, that distills
ID-number 1970
Reference: Koukios,E.G.; Arvelakis,S.; Georgali,B.: Physico-chemical upgrading of agroresidues as solid biofuels; Proc. 4th biomass conference of the Americas, p.299-304
Remarks: ash does not sinter between 750°C and 900°C

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - ND | Fe | - ND | Pb | - ND | | |
| Ash | 1.5 | 1.4 | C | 54.1 | 54.9 | 49.1 | Msr | As | - ND | Hg | - ND | Sb | - ND | |
| Water | | 9.3 | H | 5.98 | 6.1 | 5.4 | Msr | B | - ND | K | - ND | Se | - ND | |
| Volatiles | 80.8 | 82.1 | 73.3 | O | 37.1 | 37.7 | 33.6 | Cal | Ba | - ND | Mg | - ND | Si | - ND |
| | | | | N | 1.1 | 1.12 | 1 | Msr | Ca | - ND | Mn | - ND | Sn | - ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | S | 0.22 | 0.22 | 0.2 | Msr | Cd | - ND | Mo | - ND | Sr | - ND | |
| | dry | daf | ar | Cl | - | - | - | Msr | Co | - ND | Na | - ND | Te | - ND |
| HHV | 21210 | 21540 | 19231 | F | - | - | - | ND | Cr | - ND | Ni | - ND | Ti | - ND |
| LHV | 19905 | 20214 | 17820 | Br | - | - | - | ND | Cu | - ND | P | - ND | V | - ND |
| HHV _{Millne} | 21762 | 22100 | 19731 | Total: | 100 | 100 | 100 | | | Zn | - | ND | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| Method of analysis | Not Determined |
|---|----------------|
| Total Ash + Biochemical | 1.5 |
| Cellulose | - ND |
| Hemicellulose | - ND |
| Lignin | - ND |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - ND |
| Lignin acid soluble (ASL) | - ND |
| Lipids | - ND |
| Protein | - ND |
| Extractives EtOH/toluene | - ND |
| Extractives 95% EtOH | - ND |
| Extractives hot water | - ND |
| Starch | - ND |
| Pectin | - ND |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - ND |
| Xylan | - ND |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - ND |
| Galactan | - ND |
| Glucan | - ND |
| Rhamnan | - ND |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - ND |

Glossary

daf dry ash free
ar as received
Msr Measured
Lim detection Limit
Cal Calculated
ND Not Determined
Unk Unknown
Avg Average
Sst van Soest
Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|------|
| | - | |
| | | |
| Ash composition (wt.% (ash)) | Ash composition (mg/kg (ash)) | |
| CO ₂ - | Pb - | Hg - |
| P ₂ O ₅ - | | |
| Al ₂ O ₃ 3.7 | | |
| Na ₂ O 1.4 | | |
| SO ₃ 0.2 | Cd - | Mn - |
| SiO ₂ 22.7 | | |
| CaO 22.9 | | |
| K ₂ O 5.9 | | |
| Cl - | Cu - | Cr - |
| Fe ₂ O ₃ - | | |
| MgO 2.5 | | |
| TiO ₂ - | | |

Πυρήνες ελιών, μέρος > 1mm

Sample information

| | |
|-------------------|---|
| Group | husk/shell/pit |
| Subgroup | olive |
| Material | cores of olives, part > 1mm |
| ID-number | 1969 |
| Reference: | Koukios, E.G.; Arvelakis, S.; Georgali, B.: Physico-chemical upgrading of agroresidues as solid biofuels; Proc. 4th biomass conference of the Americas, p.299-304 |
| Remarks: | Cl calculated from ash (assuming Cl in biomass/Cl in ash = 3, like ID 1764); ash sintering starts at 750°C, fully fused at 900°C |

Material composition

| Proximate analysis (wt. %) | | | Ultimate analysis (wt. %) | | | Elemental analysis (mg/kg sample (dry)) | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|---------------------------|--------|-------|---|------|-----|----|----|---|----|----|---|----|----|---|----|
| | dry | daf | ar | dry | daf | ar | Al | - | ND | Fe | - | ND | Pb | - | ND | | | |
| Ash | 2.6 | | 2.4 | C | 51.3 | 52.7 | 46.8 | Msr | | As | - | ND | Hg | - | ND | Sb | - | ND |
| Water | | 8.8 | | H | 5.82 | 6 | 5.3 | Msr | | B | - | ND | K | - | ND | Se | - | ND |
| Volatiles | 77.9 | 80 | 71.1 | O | 39 | 40 | 35.5 | Cal | | Ba | - | ND | Mg | - | ND | Si | - | ND |
| | | | | N | 1 | 1.03 | 0.91 | Msr | | Ca | - | ND | Mn | - | ND | Sn | - | ND |
| Calorific value (kJ/kg) | | | | S | 0.28 | 0.29 | 0.26 | Msr | | Cd | - | ND | Mo | - | ND | Sr | - | ND |
| | dry | daf | ar | Cl | 0.11 | 0.113 | 0.1 | Cal | | Co | - | ND | Na | - | ND | Te | - | ND |
| HHV | 19840 | 20365 | 18102 | F | - | - | - | ND | | Cr | - | ND | Ni | - | ND | Ti | - | ND |
| LHV | 18570 | 19062 | 16729 | Br | - | - | - | ND | | Cu | - | ND | P | - | ND | V | - | ND |
| HHV _{Millne} | 20378 | 20917 | 18592 | Total: | 100.1 | 100.1 | 100 | | | | | | Zn | - | ND | | | |

Biochemical composition (wt.% dry)

| | |
|--|----------------|
| Method of analysis | Not Determined |
| Total Ash + Biochemical | 2.6 |
| Cellulose | - |
| Hemicellulose | - |
| Lignin | - |
| Lignin acid insoluble (AIL) | - |
| Lignin acid soluble (ASL) | - |
| Lipids | - |
| Protein | - |
| Extractives EtOH/toluene | - |
| Extractives 95% EtOH | - |
| Extractives hot water | - |
| Starch | - |
| Pectin | - |
| SUM C5 | 0 |
| Arabinan | - |
| Xylan | - |
| SUM C6 | 0 |
| Mannan | - |
| Galactan | - |
| Glucan | - |
| Rhamnan | - |
| Total non-structural carbo-hydrates (TNC) | - |
| | ND |

Glossary

daf dry ash free

ar as received

Msr Measured

Lim detection Limit

Cal Calculated

ND Not Determined

Unk Unknown

Avg Average

Sst van Soest

Sgr Sugar Analysis

Ash composition

| Ash production method | Bulk density (kg ar/m ³) |
|-----------------------|--------------------------------------|
| - | - |

Ash composition (wt.% (ash))

| CO ₂ | P ₂ O ₅ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O | 3.9 | Pb | - | Hg | - |
|---------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----|----|---|----|---|
| SO ₃ 0.7 | SiO ₂ 18.9 | CaO 9.8 | K ₂ O 41.8 | | Cd | - | Mn | - |
| Cl 1.4 | Fe ₂ O ₃ - | MgO 3.3 | TiO ₂ - | | Cu | - | Cr | - |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Ορισμοί – Εννοιες – Συμβολισμοί

Λιγνίνη:

Το δεύτερο, μετά την κυτταρίνη, συστατικό του ξύλου σε αναλογία 20-30%. Όταν γίνεται κατεργασία του ξύλου, για να παρασκευαστεί κυτταρίνη ή χαρτί, η λιγνίνη απομακρύνεται με επίδραση θειώδους ασβεστίου (CaSO_3). Η λιγνίνη παίρνεται από το ξύλο με επίδραση σε 0°C πυκνού υδροχλωρικού οξέος. Είναι αδιάλυτη στα περισσότερα διαλυτικά μέσα, έχει χρώμα καστανοκίτρινό και μοριακό βάρος πάνω από 10.000. Με οξείδωση δίνει βανιλίνη. Είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας κυτταρίνης και χαρτιού και παίρνεται σε μεγάλες ποσότητες και με μικρό κόστος.

Κυτταρίνη:

Οργανική ένωση που ανήκει στους μη σακχαροειδείς πολυσακχαρίτες. Είναι πολύ διαδομένη οργανική ουσία στη φύση και αποτελεί το περίβλημα σε όλα τα φυτικά κύτταρα, όταν αυτά είναι νεαρά. Τα πιο ηλικιωμένα κύτταρα περιέχουν εκτός από κυτταρίνη και λιγνίνη. Η κυτταρίνη παρασκευάζεται από το ξύλο ή το βαμβάκι, που είναι σχεδόν καθαρή κυτταρίνη. Είναι σώμα λευκό με χαρακτηριστική ινώδη υφή και αδιάλυτο σε όλα τα διαλυτικά μέσα. Το μοριακό βάρος της είναι άγνωστο, πάντως είναι μεγάλο. Η κυτταρίνη χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ως καύσιμη ύλη (π.χ. ξύλο), ως υφαντική ύλη, στην παρασκευή νιτροκυτταρίνης, χαρτιού, τεχνητού μεταξιού και τσελβόλ.

Φωτοσύνθεση:

Η φωτοσύνθετική διαδικασία γίνεται στους χλωροπλάστες των πράσινων μερών των φυτών. Η διαδικασία καθώς και οι βιοχημικές αντιδράσεις είναι πολύπλοκες, αλλά μπορούν να παρασταθούν με μία γενική εξίσωση:

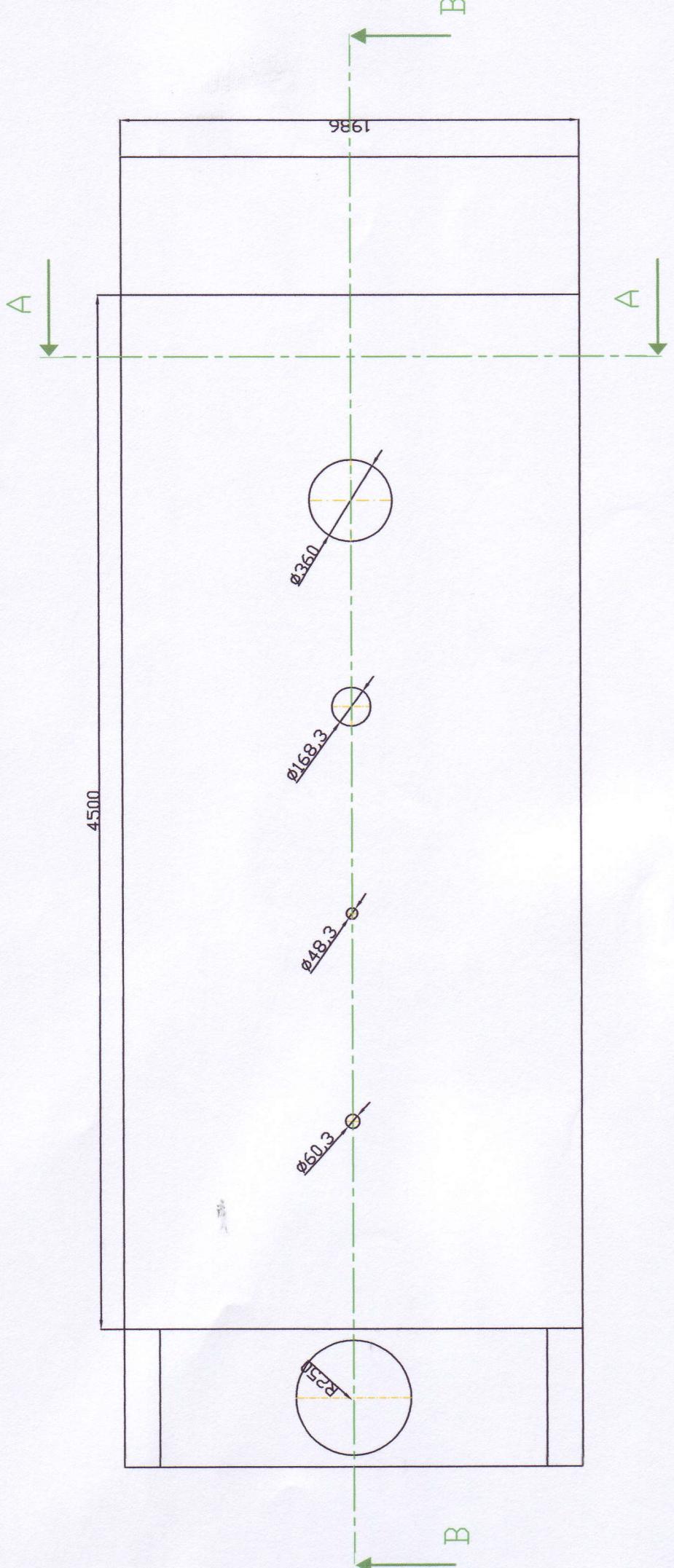


Δηλαδή στη διαδικασία αναγωγής ενός μορίου CO_2 προς βιομάζα και οξείδωσης του μορίου του νερού σε οξυγόνο χρειάζονται 8 φωτόνια κατάλληλης ενέργειας ($\lambda \leq 700\text{nm}$)

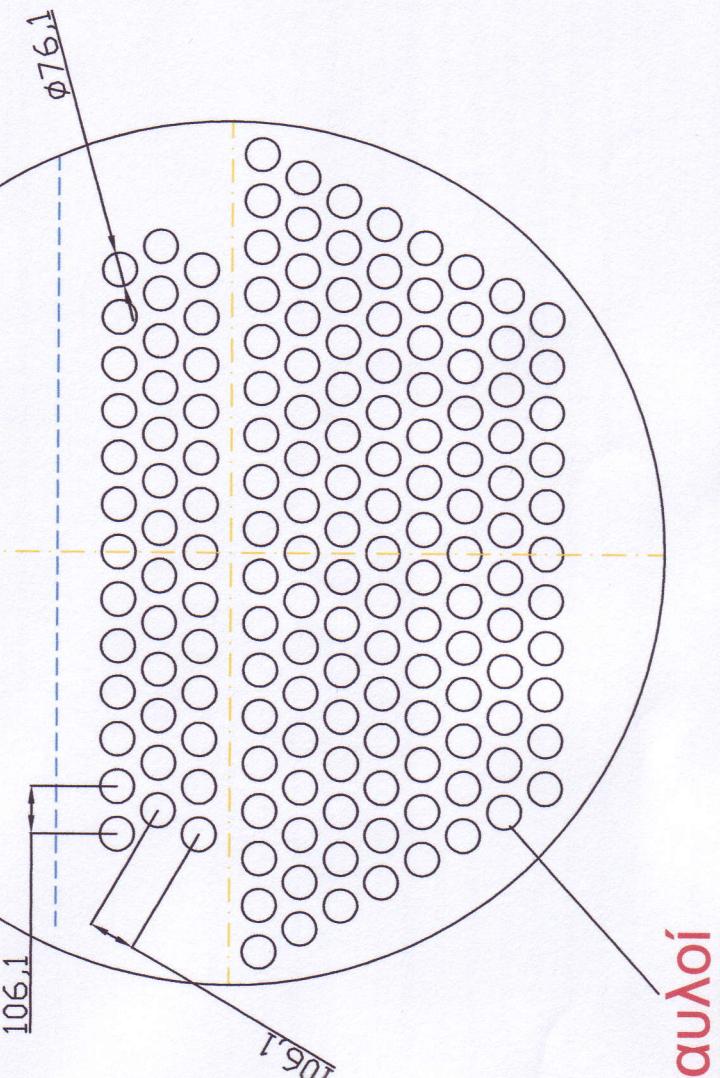
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Σχέδια ατμολέβητα

ΚΑΤΟΨΗ



Καθρέφτης



Αεριαλοί

Καπνοδόχος

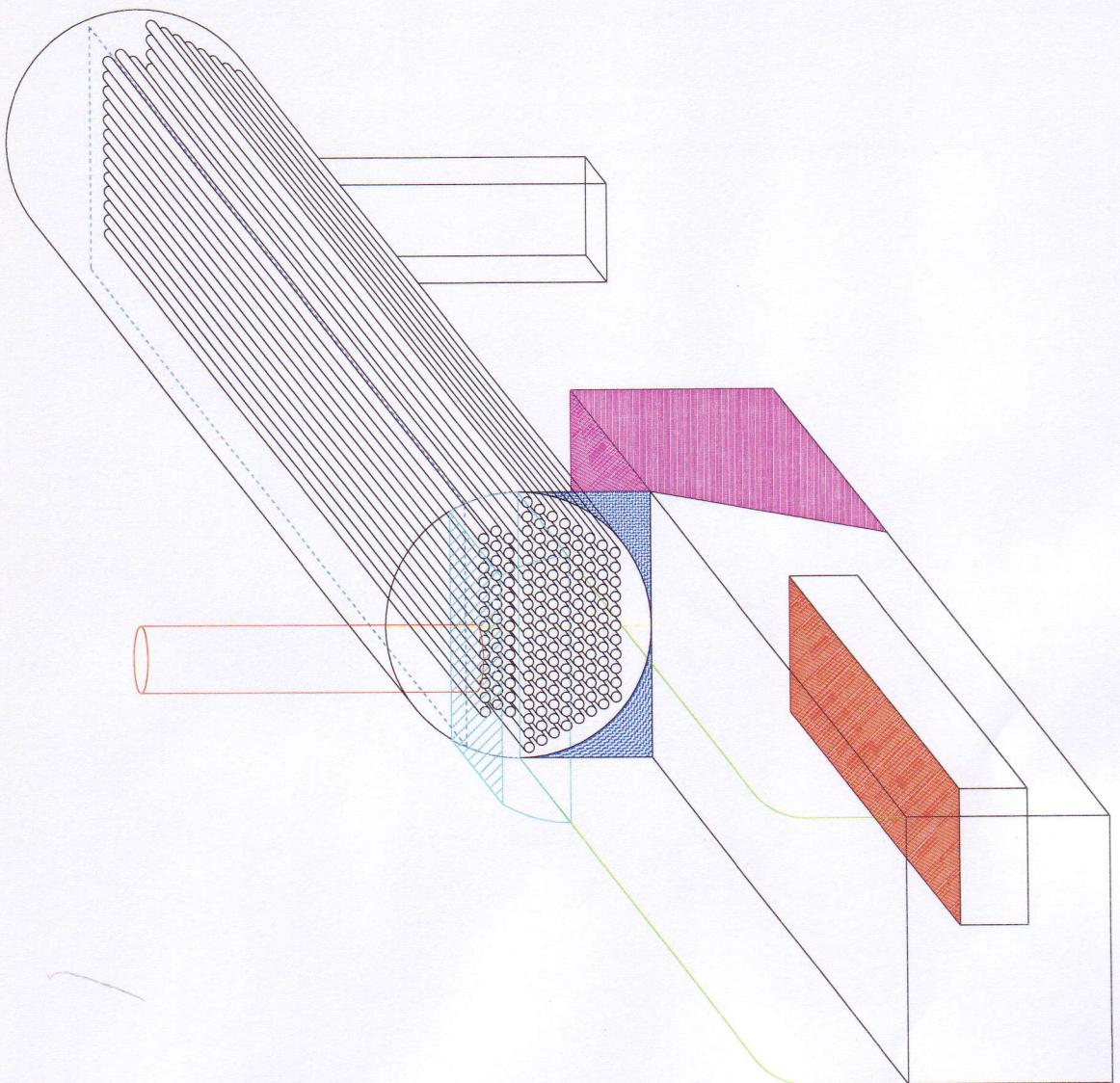
TOMH B - B

Βαλβίδα ασφαλείας Νερό τροφοδοσίας Παροχή ατυου Ανθρωποθυρίδα

Ελεγχος στάθμης

The figure shows a technical drawing of a concrete column section. The overall width is 600 mm, indicated by a dimension line on the right. A vertical dimension line on the left indicates a height of 2500 mm. A horizontal dimension line at the bottom indicates a thickness of 26 mm. The column is divided into 12 vertical sections by dashed lines. Each section contains two vertical bars, one yellow and one black, representing longitudinal reinforcement. A circular callout on the right side specifies a hole diameter of $\varnothing 60,3$. The text "Απομάστευση νερού" is written vertically along the right edge of the drawing.

Απόμαστευση
νερού



Βιβλιογραφία

- [1] Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος
- [2] www.eubia.org
- [3] www.ECN.NL
- [4] Γιώργος Τσιλιγκιρίδης, «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διδακτικές σημειώσεις» Θεσσαλονίκη, 2001
- [5] Β.Α. Σωτηρόπουλος, «Τεχνική φυσικών διεργασιών II, Εξατμιστήρες» Θεσσαλονίκη, 1996
- [6] Β.Α. Σωτηρόπουλος, «Τεχνική φυσικών διεργασιών II, Ατμοπαραγωγικές εγκαταστάσεις (λέβητες)» Θεσσαλονίκη, 1997
- [7] Κωσταντίνος Γ. Πασπαλάς, «Μετάδοση Θερμότητας» Θεσσαλονίκη, 2005
- [8] European Standard EN 12953-3