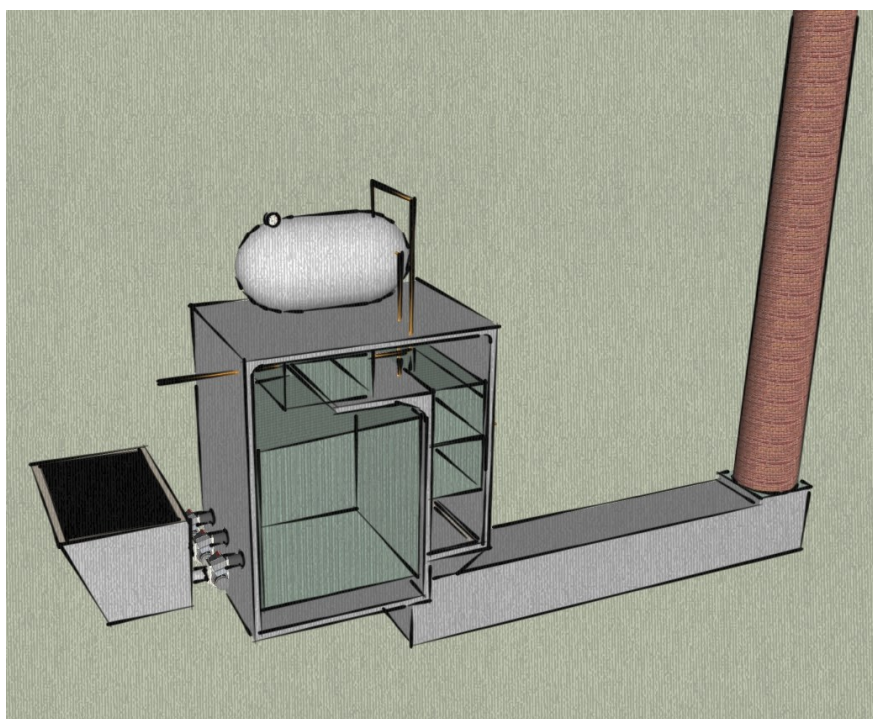


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΤΜΟΛΕΒΗΤΑ ΥΠΕΡΘΕΡΜΟΥ ΑΤΜΟΥ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 30 MW.



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΤΑΜΠΟΥΛΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (Α.Μ. 5877)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας. Αναφέρεται σε ένα ατμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ένα από τα πιο εφαρμόσιμα μέχρι και σήμερα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στους υπολογισμούς μελετάται ένας ατμολέβητας που να μπορεί να ανταποκριθεί σε γεννήτρια 30 MW.

Αρχικά αναφέρεται το καύσιμο που χρησιμοποιείται στον ατμολέβητα και πιο συγκεκριμένα τα αποθέματα στην Ελλάδα καθώς και η επεξεργασία που δέχεται ο λιγνίτης πριν καεί. Επίσης γίνεται λόγος για κάποιες βασικές έννοιες που βοηθούν να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού. Στη συνέχεια αναλύεται κάθε τμήμα που αποτελεί το σταθμό και τέλος πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί του ατμολέβητα που θα κινεί το στρόβιλο.

Για να ολοκληρωθεί αυτή η Πτυχιακή Εργασία χρειάστηκε η πολύτιμη βοήθεια του Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ανδρέα Γιαννόπουλου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας, και τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Ταμπουλίδης Αντώνιος
Μάιος 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή αναφέρεται σε ένα ατμοηλεκτρικό σταθμό ισχύος 30 MW. Μια ατμοηλεκτρική μονάδα παράγει το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιείται στα σπίτια , στη βιομηχανία κ.τ.λ.. Η παραγωγή του γίνεται με μια γεννήτρια που περιστρέφεται από το στρόβιλο και αυτός με την σειρά του από το ατμό που παράγει ο ατμολέβητας. Αυτές οι μονάδες παράγουν μέχρι και σήμερα τη μεγαλύτερη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παγκοσμίως και θα αργήσει η αντικατάστασή τους με άλλες πηγές ενέργειας. Αυτός είναι και ο λόγος που αξίζει να πραγματοποιηθεί μία τέτοια μελέτη. Τα υπάρχοντα Κεφάλαια σε αυτήν την Πτυχιακή είναι επτά από τα οποία τα έξι πρώτα είναι θεωρητικά ενώ στο τελευταίο γίνεται ο υπολογισμός του ατμολέβητα.

Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στο λιγνίτη. Ξεκινά με τα αποθέματα που υπάρχουν στο ελλαδικό χώρο και συνεχίζει με την κονιοποίηση και την ξήρανση του καυσίμου. Η ξήρανση και κονιοποίηση αποτελούν μια σημαντική διαδικασία λόγω του ότι αυξάνεται η θερμογόνος δύναμη του λιγνίτη.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο περιγράφονται οι φάσεις του νερού μέσα στον ατμολέβητα και τη δομή που μπορεί να έχει ο σταθμός. Οι καταστάσεις αυτές φαίνονται στο διάγραμμα Rankine και αναλύονται λεπτομερώς ενώ η δομή που μπορεί να έχει ένας σταθμός διαφέρει ανάλογα με τη περίπτωση που υπάρχει και το αποτέλεσμα που επιθυμείται. Δηλαδή μπορεί να υπάρχει ένα σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης, απομάστευσης και θέρμανσης του ατμού από εξωτερική πηγή. Πάντως σε κάθε περίπτωση θα υπάρχει ένας ατμολέβητας και ένας στρόβιλος που θα κινεί μια γεννήτρια.

Αφού έχει γίνει η πιθανή περιγραφή της δομής ενός σταθμού, από το τρίτο Κεφάλαιο μέχρι και το έκτο αναλύεται ξεχωριστά το κάθε τμήμα της μονάδας. Έτσι στο τρίτο Κεφάλαιο γίνεται λόγος για τον ατμολέβητα που παράγει τον ατμό και αποτελεί την κινητήρια δύναμη του όλου συστήματος. Επίσης γίνεται μία περιγραφή και απεικόνιση των εσωτερικών τμημάτων του λέβητα και πιο συγκεκριμένα του υπερθερμαντήρα, του προθερμαντήρα νερού και του προθερμαντήρα αέρα καύσης (LUVO). Ένα άλλο σημαντικό σύστημα που υπάρχει στο λέβητα είναι ο καυστήρας για τον οποίο αναφέρονται μονάχα τα συστήματα καύσης.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο περιγράφεται ο ατμοστρόβιλος. Αρχικά παρουσιάζονται τα μέρη που το αποτελούν και στη συνέχεια τα πτερύγια τα οποία είναι από τις πιο σημαντικότερες παραμέτρους ενός στρόβιλου. Αν και από κατασκευαστικής άποψης υπάρχει μεγάλη δυσκολία στη κατασκευή της κλίσης και του σχήματος των πτερυγίων, εντούτοις καθορίζουν σημαντικά το βαθμό απόδοσης του στρόβιλου. Τέλος αναφέρονται τα είδη ροής που υπάρχουν.

Στο πέμπτο Κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα ψύξης. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μια αναφορά στο συμπυκνωτή που αποτελεί και το μέσο με το οποίο απάγεται η θερμότητα του ατμού, ώστε να έρθει σε υγρή κατάσταση ενώ παράλληλα τονίζεται και η διαφοροποίηση ενός ανοιχτού συστήματος ψύξης με ένα κλειστού

τύπου. Κάθε ένα από αυτά τα συστήματα περιέχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Στο έκτο Κεφάλαιο γίνεται μία γενική περιγραφή στα υπόλοιπα μέρη μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας όπως ο κύριος μετασχηματιστής, τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, η γεννήτρια και τα εξαρτήματα.

Στο έβδομο και τελευταίο Κεφάλαιο γίνονται οι υπολογισμοί που είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι αυτής της πτυχιακής καθώς πραγματοποιείται ο υπολογισμός των εξωτερικών και εσωτερικών στοιχείων του ατμολέβητα για να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του προβλήματος.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι: α) Για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια μελέτη απαιτούνται πολλές γνώσεις και κυρίως θερμοδυναμικής β) Ο υπολογισμός ενός ατμολέβητα απαιτεί πολλές επαναλήψεις και βελτιώσεις καθώς πρέπει να ταιριάζουν όλα τα μέρη που τον συνθέτουν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΛΙΓΝΙΤΗΣ

1.1 Ο Ελλαδικός λιγνίτης.....	13
1.2 Συστήματα ξήρανσης και κονιοποίησης του λιγνίτη.....	15
1.2.1 Ξήρανση.....	16
1.2.1.1 Ξήρανση με θερμό αέρα- καυσαέρια.....	16
1.2.1.2 Περιστροφικός ξηραντήρας.....	17
1.2.2 Κονιοποίηση.....	18

2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

2.1 Γενικά.....	21
2.2 Ο κύκλος Rankine.....	22
2.2.1 Ανάλυση ιδανικού κύκλου Rankine.....	23
2.2.2 Ο κύκλος Rankine με αναθέρμανση.....	24
2.2.3 Αποκλίσεις του πραγματικού κύκλου Rankine από τον αντίστοιχο ιδανικό.....	24
2.2.4 Δυνατότητες αύξησης του βαθμού απόδοσης του κύκλου Rankine.....	25
2.3 Τα υπάρχοντα συστήματα αμοστροβίλου.....	28
2.3.1 Σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο αντίθλιψης.....	28
2.3.2 Σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο απομάστευσης.....	29
2.3.3 Σύστημα συμπαραγωγής με θέρμανση του ατμού από εξωτερική πηγή..	29
2.4 Περιγραφή μιας αμοηλεκτρικής μονάδας λιγνίτη.....	30

3. ΑΤΜΟΛΕΒΗΤΑΣ

3.1 Τμήματα αμολέβητα.....	35
3.1.1 Υπερθερμαντήρες.....	37
3.1.2 Προθερμαντήρες νερού.....	37
3.1.3 Προθερμαντήρας αέρα καύσης (LUVO).....	38
3.2 Τύποι καυστήρων άνθρακα.....	39

4. ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ

4.1 Μέρη αμοστροβίλου.....	42
4.2 Τμήματα και πτερύγια.....	42
4.3 Κατηγορίες στροβίλων.....	44
4.4 Είδη ροής.....	45

5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ	
5.1 Συμπυκνωτής.....	47
5.1.1 Είδη συμπυκνωτών.....	48
5.2 Ανοιχτό και κλειστό ψυκτικό σύστημα.....	49
5.2.1 Παρουσίαση ανοικτών συστημάτων.....	51
5.2.2 Παρουσίαση κλειστών συστημάτων.....	52
6. ΛΟΙΠΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	
6.1 Γενικά.....	55
7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	
7.1 Δεδομένα.....	59
7.2 Θερμογόνος δύναμη- Περίσσεια αέρα.....	61
7.3 Θερμοδυναμικός κύκλος RANKINE.....	64
7.4 Κατανάλωση καύσιμου- Παραγόμενος ατμός - Βαθμός απόδοσης.....	68
7.5 Διαστάσεις- Επιφάνειες- Θερμοκρασίες.....	70
7.6 Διατομή καπνοδόχου- Ισχύς αντλίας.....	89
7.7 Απεικόνιση ατμολέβητα σε 3Δ.....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

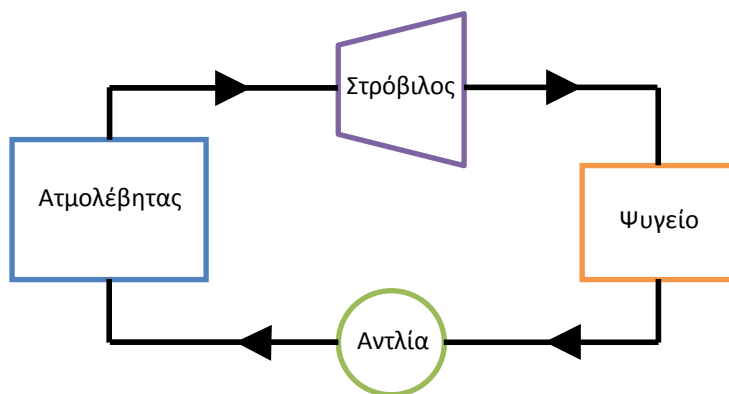
Ο ατμοηλεκτρικός σταθμός χαρακτηρίζεται ως ένας από τους πιο οικονομικούς τρόπους για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα για την λειτουργία του χρησιμοποιείται ως καύσιμο κυρίως ο λιγνίτης και λιγότερο το πετρέλαιο. Αν και έχει πολλά πλεονεκτήματα π.χ. να λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να σταματά για συντήρηση εντούτοις έχει και πολλά μειονεκτήματα όπως το μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την κατασκευή του.

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά μέρη.

Τα κύρια μηχανολογικά μέρη είναι: α) Ο ατμολέβητας που μετατρέπει το νερό σε ατμό. Η μετατροπή αυτή γίνεται με την καύση του καύσιμου (που στην περίπτωση μας είναι ο αποξηραμένος λιγνίτης) στο εσωτερικό της εστίας. β) Ο στρόβιλος που στα περύγια του εκτονώνεται ο ατμός και παράγεται κινητική ενέργεια. γ) Ο συμπυκνωτής που βρίσκεται μετά το στρόβιλο και συμπυκνώνει το εργαζόμενο μέσο.

Τα κύρια ηλεκτρολογικά μέρη είναι: α) Η ηλεκτρογεννήτρια που ενώνεται με το στρόβιλο και μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αξίζει να αναφερθεί ότι μια ηλεκτρογεννήτρια έχει πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης. β) Ο μετασχηματιστής που μετασχηματίζει την παραγόμενη τάση στην επιθυμητή.

Μια σύντομη περιγραφή στο πως λειτουργεί μια ατμοηλεκτρική μονάδα είναι η εξής : Ο ατμολέβητας παράγει τον ατμό και με σωληνώσεις στέλνεται στο στρόβιλο εκεί εκτονώνεται και προκαλεί την περιστροφική κίνηση του στρόβιλου και μετέπειτα της γεννήτριας. Το εργαζόμενο μέσο που έχει εκτονωθεί μεταφέρεται στο ψυγείο αποβάλλοντας θερμότητα και από εκεί πάλι στον ατμολέβητα μέσω της αντλίας για να αναθερμανθεί. Αυτός ο κύκλος επαναλαμβάνεται συνέχεια παράγοντας συνέχεια ηλεκτρική ενέργεια.



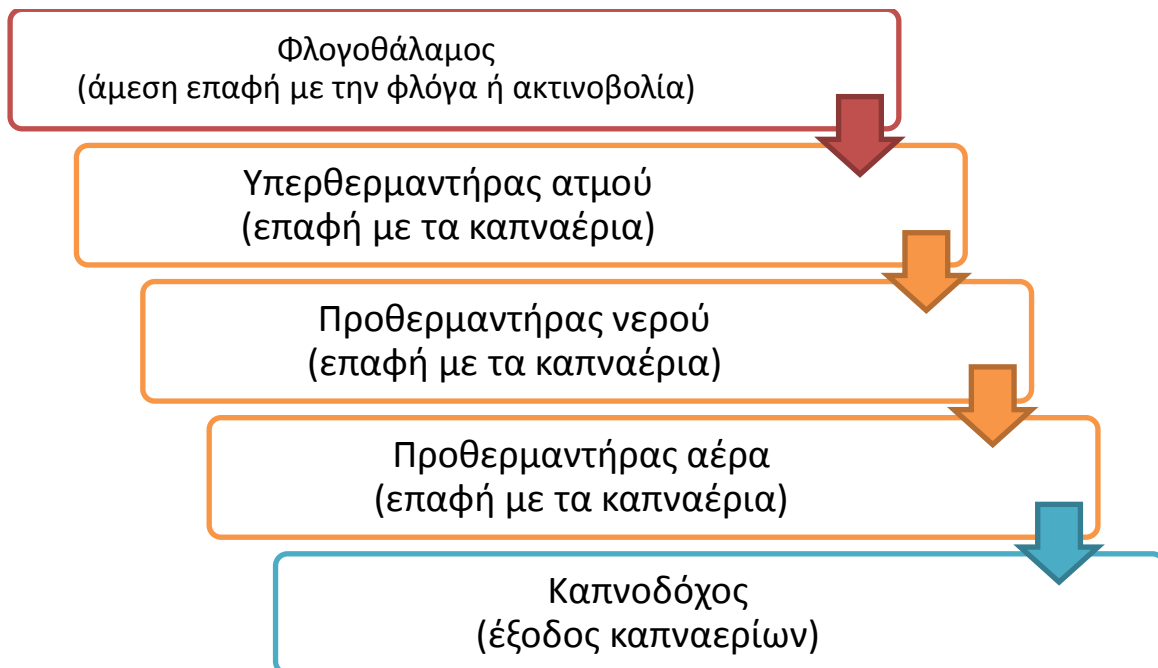
Εικόνα 1: Βασική λειτουργία ατμοηλεκτρικού σταθμού.

Μια ατμοηλεκτρική μονάδα δεν μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε τοποθεσία. Απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού για την ψύξη του εργαζόμενου μέσου και για αυτό πρέπει να βρίσκεται κοντά σε κάποια λίμνη ή θάλασσα ή διαφορετικά χρησιμοποιούνται μεγάλοι πύργοι ψύξης. Βέβαια και τα αποθέματα του καυσίμου πρέπει να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση ώστε να μην χρειάζονται μεγάλα και περίπλοκα συστήματα μεταφοράς αυξάνοντας δραματικά το κόστος. Τέλος άλλα προβλήματα που μπορούν να επηρεάσουν την τοποθεσία της εγκατάστασης είναι περιβαλλοντολογικοί λόγοι, κλιματικοί κ.τ.λ..

Ένας ατμολέβητας αποτελείται από τμήματα που συντελούν στην ατμοποίηση του νερού. Αυτά είναι:

- α) Ο φλογοθάλαμος, που γίνεται η καύση του καυσίμου.
- β) Ο υπερθερμαντήρας, που υπερθερμαίνει το ατμό.
- δ) Ο προθερμαντήρας νερού, που γίνεται η προθέρμανση του νερού
- ε) Ο προθερμαντήρας αέρα, που γίνεται η προθέρμανση του αέρα

Μια σύντομη περιγραφή για το τι γίνεται στο εσωτερικό του ατμολέβητα είναι η εξής: Ο προθερμασμένος αέρας ξηραίνει το λιγνίτη και εισέρχεται μαζί με αυτόν στην εστία όπου πραγματοποιείται η καύση. Τονίζεται ότι λόγω της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών, στο εσωτερικό της εστίας χρησιμοποιούνται ειδικά υλικά. Στο φλογοθάλαμο γίνεται η προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου που εν συνεχεία φτάνει στο υπερθερμαντήρα για να υπερθερμανθεί με τα καυσαέρια τα οποία ακολούθως μεταφέρονται στο προθερμαντήρα νερού για να μην είναι σε χαμηλή θερμοκρασία το εργαζόμενο μέσο όταν εισχωρήσει ξανά στο φλογοθάλαμο. Στο επόμενο τμήμα είναι ο προθερμαντήρας αέρα που προθερμαίνει τον αέρα για την ξήρανση του λιγνίτη και εισέρχεται μαζί του στο φλογοθάλαμο. Ενώ στο τέλος της διαδικασίας έχουμε την εξαγωγή των καπναερίων από την καμινάδα.



Εικόνα 2: Τυπική διάταξη ατμολέβητα.

Μέσω των υπολογισμών του έβδομου κεφαλαίου γίνεται μια προσπάθεια να βρεθούν όλα τα χαρακτηριστικά του κάθε τμήματος αλλά και τα υπόλοιπα μέρη του ατμολέβητα. Αν και φαίνεται απλή κατασκευή, εντούτοις όταν μελετάται αποδεικνύεται ότι πρέπει να έχει κανείς πολλές γνώσεις, αφού συνδυάζει πολλούς τομείς μαζί.

1. ΛΙΓΝΙΤΗΣ

1.1 Ο ΕΛΛΑΔΙΚΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗΣ

Ο λιγνίτης χαρακτηρίζεται ως μια μαύρη άμορφη μάζα. Είναι οργανικής προέλευσης πέτρωμα που έχει κύριο χαρακτηριστικό του τον άνθρακα. Για την Ελλάδα αποτελεί μέχρι και σήμερα ένα από τα πιο ανταγωνιστικά πρωτεύοντα καύσιμα λόγω των αποθεμάτων που υπάρχουν αλλά και της θερμογόνου δύναμης του που έχει αυξηθεί. Βέβαια πρόσφατα έχει εμφανιστεί και το φυσικό αέριο, προερχόμενο κυρίως από την Ρωσία, χωρίς όμως να μπορεί ακόμη να εκτοπίσει το λιγνίτη.

Η χώρα μας έφτασε σήμερα να είναι πολύ εξαρτημένη από το λιγνίτη σε ποσοστό μεγαλύτερο του 44% (από το νερό 5,9%, από το πετρέλαιο 7,7%, από το φυσικό αέριο 24%, από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 7,8% και από τις εισαγωγές ρεύματος 10%^[1]). Αυτό προέκυψε λόγω της αλματώδους αύξησης στην εξόρυξη του λιγνίτη οδηγώντας με την σειρά του στην δημιουργία περισσότερων ατμοηλεκτρικών μονάδων.

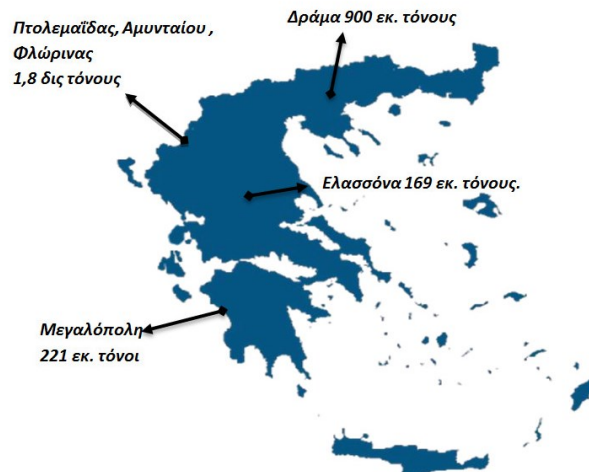
Τα λιγνιτικά αποθέματα στη Ελλάδα

Αν και έχει πολύ φτωχά κοιτάσματα σε ποιότητα εντούτοις υπάρχουν πολύ μεγάλες ποσότητες δίνοντας έτσι ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Η ΔΕΗ αναφέρει ότι τα αποθέματα λιγνίτη στη χώρα ανέρχονται σε περίπου 5 δις. τόνους. Με τα σημερινά τεχνικό - οικονομικά δεδομένα τα κοιτάσματα που είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση, ανέρχονται σε 3,2 δις τόνους περίπου και ισοδυναμούν με 450 εκ. τόνους πετρελαίου .

Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στις περιοχές της Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας με υπολογισμένο απόθεμα 1,8 δις τόνους, στην περιοχή της Δράμας με απόθεμα 900 εκ. τόνους και στην περιοχή της Ελασσόνας με 169 εκ. τόνους. Επίσης στην περιοχή της Μεγαλόπολης, υπάρχει λιγνιτικό κοιτάσμα με απόθεμα περίπου 233 εκ. τόνους. Στη Εικόνα 3 φαίνονται τα μεγαλύτερα κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελλάδα.

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι για την περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας αλλά και για την Μεγαλόπολη τα κοιτάσματα φτάνουν για 20 και 40 χρόνια αντίστοιχα, με τους σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης. Έτσι κάποια στιγμή θα πρέπει να γίνει στροφή σε άλλες πηγές ενέργειας.

^[1] Πηγή: <http://www.real.gr/DefaultArthro.aspx?page=arthro&id=177969&catID=5> στις 5/10/2012.



Εικόνα 3: Αποθέματα λιγνίτη στην Ελλάδα (Μάρτιος 2009^[2]).

Ποιότητα λιγνίτη στη Ελλάδα

Τα κοιτάσματα λιγνίτη που διαθέτει η Ελλάδα χαρακτηρίζονται από τα πιο φτωχά σε ποιότητα. Υπάρχει μία διαφοροποίηση στην ποιότητα τόσο από ορυχείο σε ορυχείο, αλλά και μεταξύ των γεωλογικών στρωμάτων του ίδιου ορυχείου.

Η θερμογόνος ικανότητα των ελληνικών λιγνιτών κυμαίνεται μεταξύ 4.390 – 5.440 KJ/kg στα κοιτάσματα της Μεγαλόπολης, μεταξύ 7.536 – 9.630 KJ/kg στα κοιτάσματα της Φλώρινας, μεταξύ 5.440-5.860 KJ/kg στα κοιτάσματα της Πτολεμαΐδας (Κυρίου Πεδίου, Νοτίου Πεδίου και Καρδιάς) και μεταξύ 4.390 – 5.440 KJ/kg στα κοιτάσματα του Αμυνταίου. Συνοπτικά στο Πίνακα 1 φαίνεται η χαμηλότερη θερμογόνος δύναμη ανά περιοχή.

Κοίτασμα	Θερμ. δύναμη KJ/kg
Πτολεμαΐδα	5440
Αμύνταιο	4390
Μεγαλόπολη	4390
Φλώρινα	7536
Δράμα	4315

Πίνακας 1: Θερμογόνος δύναμη λιγνίτη σε κάθε περιοχή.

Ο λιγνίτης που υπάρχει στην Ελλάδα αποτελείται από ένα υψηλό ποσοστό υγρασίας (περίπου 55%) και τέφρας (περίπου 15-30%). Θα πρέπει επίσης, να σημειωθεί ότι ο λιγνίτης των κοιτασμάτων της Δυτικής Μακεδονίας περιέχει χαμηλά ποσοστά θείου και υψηλά ποσοστά οξειδίων του ασβεστίου, με αποτέλεσμα να ευνοείται η φυσική αποθείωση. Σε αντίθεση ο λιγνίτης της Μεγαλόπολης παρουσιάζει υψηλά επίπεδα θείου, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αυξημένες εκπομπές SO₂ που καθιστούν απαραίτητη την λειτουργία μονάδας αποθείωσης (FGD).

^[2] Πηγή: http://h2matters.weebly.com/uploads/8/3/3/8/8338743/mourouzis_thesis_final.pdf.

Η ποιότητα του ελληνικού λιγνίτη αν συγκριθεί από τις αρχές της εξόρυξης του μέχρι σήμερα θα παρατηρηθεί μια μεγάλη διαφορά στη θερμογόνο δύναμη του. Αυτή η διαφορά οφείλεται στις μεθόδους επεξεργασίας του πριν καεί στο λέβητα αλλά και στην ανάμειξη του με άλλα συστατικά. Με τον ίδιο λιγνίτη μπορεί να αυξηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνοντας με τα χρόνια τεράστια εξοικονόμηση καθώς και καλύτερο βαθμό απόδοσης των ατμοηλεκτρικών μονάδων (μικρότερη συντήρηση, μικρότερες μονάδες κ.τ.λ.).

1.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ

Η ξήρανση και κονιοποίηση του λιγνίτη έχει σαν σκοπό κυρίως την βελτίωση της ποιότητας της καύσης. Με την ξήρανση επιτυγχάνεται η απομάκρυνση της υγρασίας ώστε να υπάρξει καλύτερη καύση. Η αφαίρεση της υγρασίας του λιγνίτη γίνεται συνήθως κατά την διάρκεια που μεταφέρεται από το σιλό^[2] προς τους μύλους κονιοποίησης. Δηλαδή πρώτα ξηραίνεται και μετά θρυμματίζεται.

Οι μέθοδοι ξήρανσης συνήθως είναι με θερμό αέρα ή καυσαέριο ή σε περιστρεφόμενα τύμπανα. Με αέρα γίνεται όταν υπάρχει υγρασία μικρότερη από 40% ενώ με καυσαέρια για μεγαλύτερες περιεκτικότητες. Η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης μπορεί να φτάνει και τους 360°C, ειδικά σε περιπτώσεις πολύ μικρής περιεκτικότητας σε πτητικά. Ιδιαίτερη σημασία έχει η θερμοκρασία του μείγματος καυσαερίων-υδρατμών. Όταν τα καυσαέρια φτάσουν στο σημείο κορεσμού τους δεν μπορούν να απορροφήσουν άλλη υγρασία με αποτέλεσμα να παραμένει το καύσιμο, γι' αυτό προτιμάται η θερμοκρασία του μείγματος να είναι πάνω από 100°C, προς αποφυγή υγροποίησης των υδρατμών των καυσαερίων. Συνήθως τα καυσαέρια λαμβάνονται από το ανώτερο σημείο του θαλάμου καύσης, δηλαδή σε θερμοκρασία 800-1100°C, ώστε ανάλογα με το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας και της διαθέσιμης επιφάνειας συναλλαγής του καυσίμου να μην υπάρξει πτώση της θερμοκρασίας τους κάτω των 100°C. Αντίθετα για να αφαιρεθεί η υγρασία με το τύμπανο χρησιμοποιείται η περιστροφική κίνηση. Η λειτουργία του είναι σαν το πλυντήριο ρούχων αλλά με την διαφορά ότι στο εσωτερικό του είναι ο λιγνίτης και υπάρχουν σωληνώσεις που διέρχεται ατμός.

Η κονιοποίηση δίνει ένα ορισμένο μέγεθος στο λιγνίτη (κοκκομετρία μικρότερη του 1mm και μέσες διαμέτρους περίπου της τάξης των 200μm) ώστε κατά την είσοδο του στο λέβητα να γίνεται μια σωστή ανάμειξη. Μια κονιοποίηση για να πραγματοποιηθεί μέχρι να καεί το καύσιμο περνά από τα εξής τμήματα : το σιλό, το μύλο κονιοποίησης, το διανομέα του καυσίμου, το διαχωριστή του κονιοποιημένου καυσίμου και το φυσητήρα (ή ανεμιστήρα). Υπάρχουν διάφοροι τύποι μύλων ώστε ανάλογα με το καύσιμο (ποιότητα, μέγεθος κ.τ.λ.) να επιλέγεται ο κατάλληλος.

^[2] Σιλό: Τα σιλό είναι κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία (φόρτωση, εκφόρτωση) και την αποθήκευση χύδην στερεών υλικών. Στη περίπτωση μας είναι ο λιγνίτης.

1.2.1 Ξήρανση

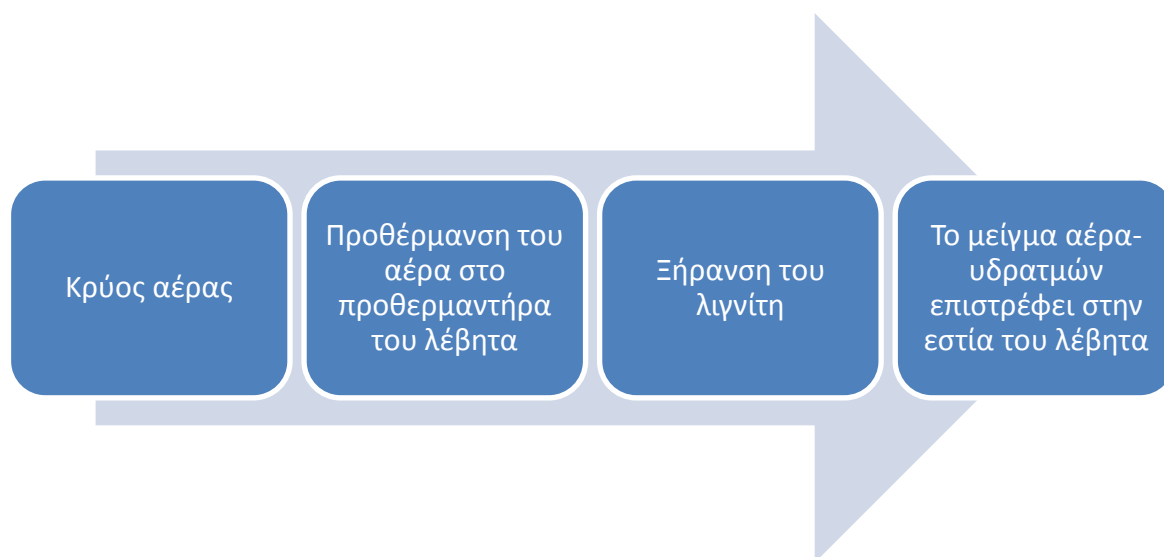
Η ξήρανση του λιγνίτη μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους που ο καθένας έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του.

1.2.1.1 Ξήρανση με θερμό αέρα- καυσαέρια

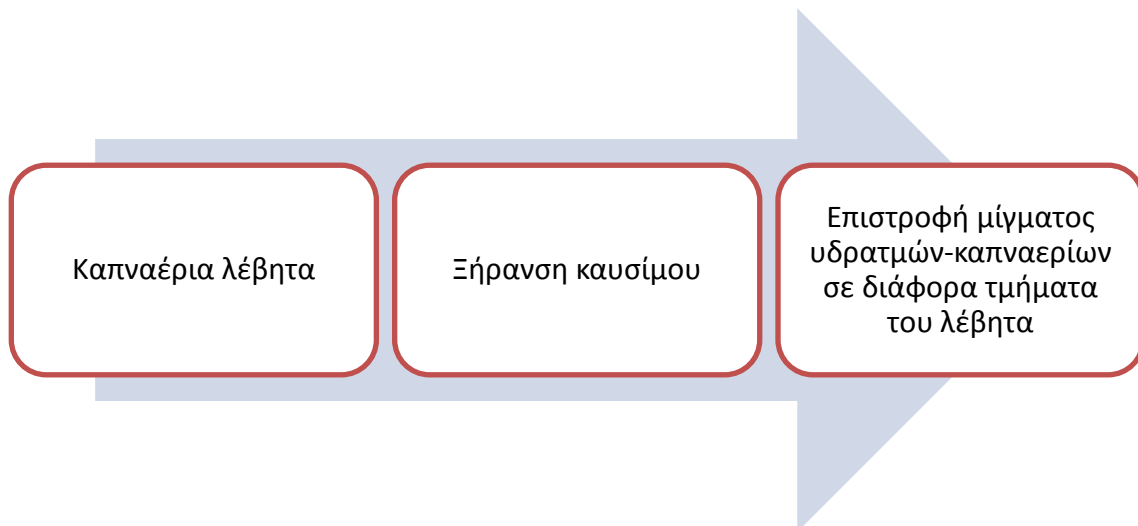
Η ξήρανση πραγματοποιείται με θερμό αέρα ή τα καυσαέρια. Επίσης υπάρχει ο διαχωρισμός σε κλειστό ή ανοιχτό κύκλωμα.

Στο κλειστό κύκλωμα ότι μπαίνει επιστρέφεται. Δηλαδή αρχικά ο αέρας προθερμαίνεται στον προθερμαντήρα αέρα αυξάνοντας την θερμοκρασία του ώστε ερχόμενος σε επαφή με το λιγνίτη να απορροφά την υγρασία του. Έπειτα δεν εξάγεται (το μίγμα αέρα - υδρατμών) στο περιβάλλον αλλά εισάγεται στη εστία μαζί με το κονιοποιημένο καύσιμο (Εικόνα 4). Η ίδια διαδικασία γίνεται και με τα καυσαέρια με την διαφορά ότι αυτά δημιουργούνται στην εστία, ξηραίνουν το λιγνίτη και ξανά εισάγονται σε διάφορα τμήματα του λέβητα (Εικόνα 5).

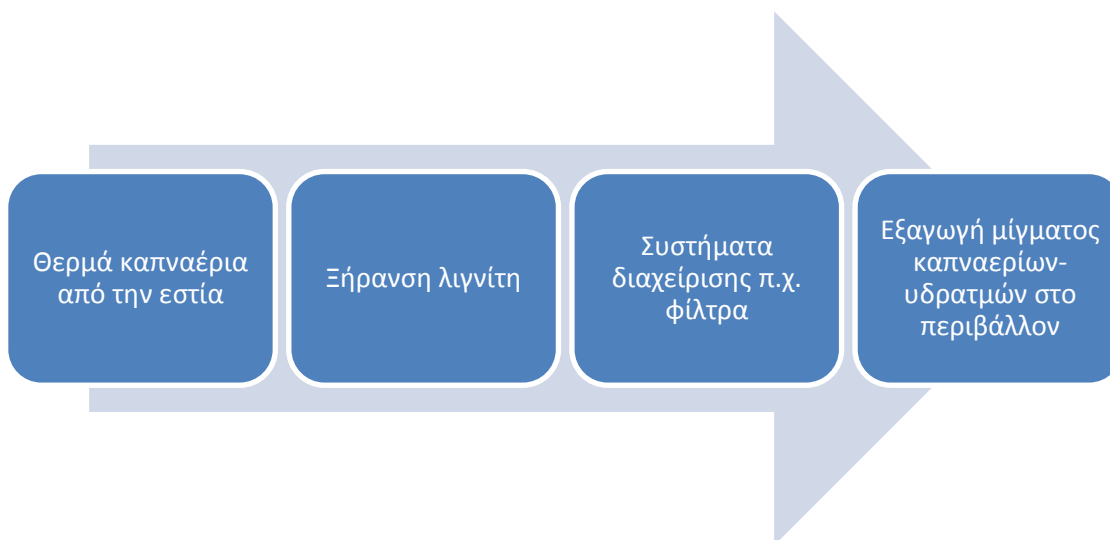
Στη ξήρανση σε ανοιχτό κύκλωμα υπάρχει εξαγωγή στο περιβάλλον. Τα καυσαέρια αφού ξηράνουν το λιγνίτη δημιουργούν ένα μείγμα υδρατμών-καυσαερίων. Το μείγμα αφού δεχθεί μια επεξεργασία για την αφαίρεση της σκόνης οδηγείται στην ατμόσφαιρα μέσω της καπνοδόχου (Εικόνα 6). Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ξήρανσης είναι ότι το μείγμα εξάγεται στο περιβάλλον και δεν αναθερμαίνεται απορροφώντας έτσι θερμότητα από το λέβητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η Μεγαλόπολη.



Εικόνα 4: Κλειστός κύκλος με θερμό αέρα.



Εικόνα 5: Κλειστός κύκλος με θερμά καυσαέρια.

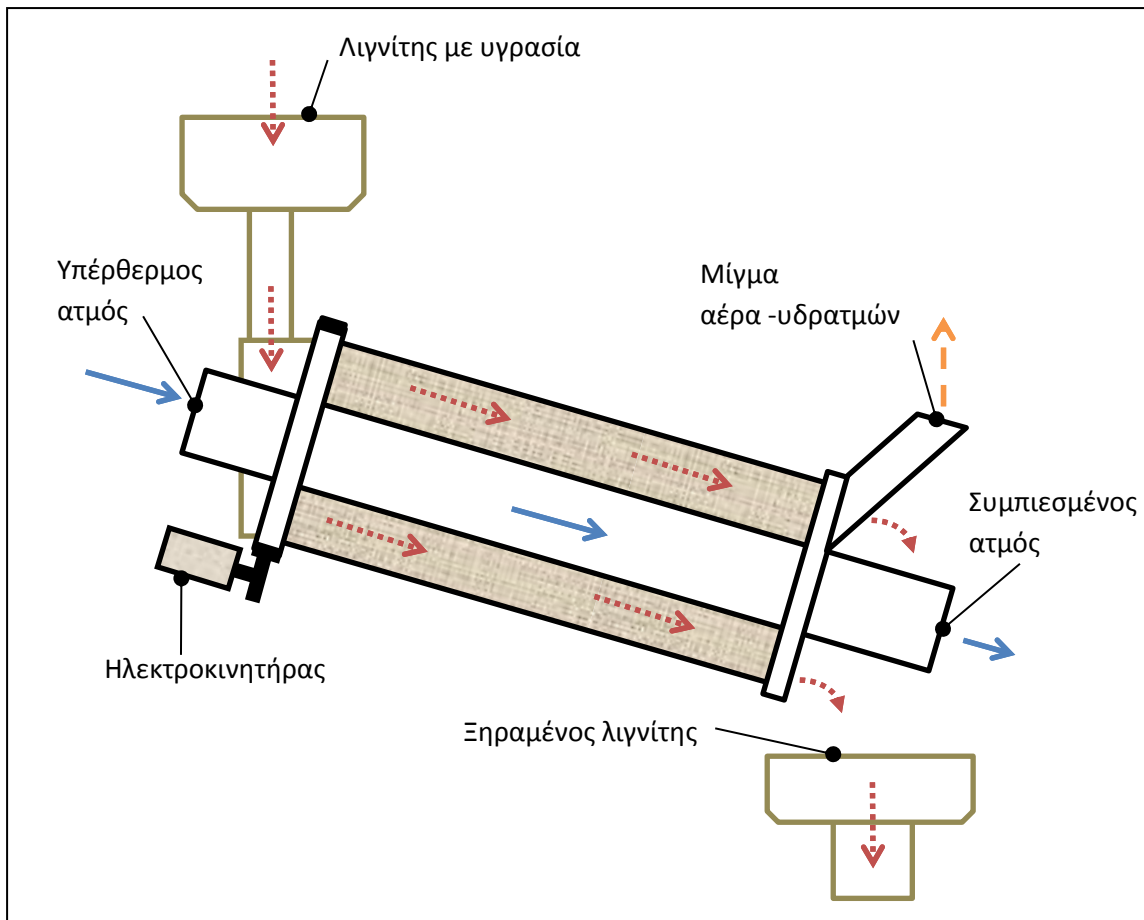


Εικόνα 6: Ξήρανση σε ανοιχτό κύκλο κονιοποίησης.

1.2.1.2 Περιστροφικός ξηραντήρας

Μια άλλη μέθοδος ξήρανσης είναι με το περιστροφικό ξηραντήρα. Αποτελείται από ένα περιστροφικό κύλινδρο με μήκος περίπου 7.5-15m και διάμετρο 2-6m που στο εσωτερικό του έχει σωλήνες μικρής διαμέτρου (περίπου 1600 ώστε να υπάρχει μια επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας της τάξης των 4000 m²) στους οποίους ρέει κονιοποιημένος φυσικός λιγνίτης. Η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: Εισάγεται υπέρθερμος ατμός που κυκλοφορεί ανάμεσα στους αγωγούς με το φυσικό λιγνίτη. Η υγρασία του λιγνίτη ερχόμενη σε επαφή με τους θερμούς αυλούς ατμοποιείται και εξάγεται από το πάνω μέρος του κυλίνδρου. Αυτός ο υδρατμός οδηγείται σε

ηλεκτροστατικά φίλτρα για να καθαριστεί από τα σωματίδια του καυσίμου και στη συνέχεια απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 7). Η όλη διαδικασία γίνεται με την περιστροφική κίνηση του τυμπάνου από ένα σύστημα οδοντωτών τροχών καθώς και με κατάλληλα έδρανα στήριξης. Αυτή η μέθοδος ξήρανσης μας παρέχει μικρότερο κόστος, ικανοποιητική θερμική απόδοση και ενδείκνυται κυρίως για στερεά καύσιμα μικρής σχετικά κοκκομετρίας.



Εικόνα 7: Τυπική διάταξη περιστροφικού ξηραντήρα. Τα συνεχή βέλη δείχνουν την κατεύθυνση του ατμού, με τις τελείες του λιγνίτη και με τις παύλες του υδρατμού που προκύπτει από την ξήρανση.

1.2.2 Κονιοποίηση

Με την κονιοποίηση επιτυγχάνεται η μετατροπή του λιγνίτη σε μικρούς κόκκους (αύξηση επιφάνειας) ώστε να μεταφερθεί με τον αέρα και να καεί ολοκληρωτικά στο λέβητα. Έτσι βελτιώνεται η καύση και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του ατμοπαραγωγού. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κονιοποίησης και οι πιο συνηθισμένοι είναι οι εξής:

- Μύλος με σφαιρίδια (Ball-Tube Mills)

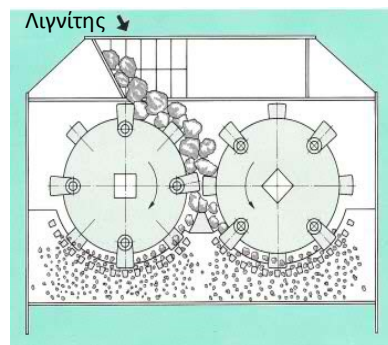
Ο μύλος με σφαιρίδια αποτελείται από ένα κύλινδρο στηριζόμενο σε κατάλληλα έδρανα για να μπορεί να περιστρέφεται. Η κονιοποίηση επιτυγχάνεται εισάγοντας αρχικά το λιγνίτη από δυο κοίλες εισόδους. Καθώς το τύμπανο αρχίζει να περιστρέφεται τα σφαιρίδια έρχονται σε επαφή με το καύσιμο και το θρυμματίζουν. Στη διπλανή Εικόνα φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα.



Εικόνα 8: Μύλος με σφαιρίδια.

- Μύλος πρόσκρουσης (Impact Mills)

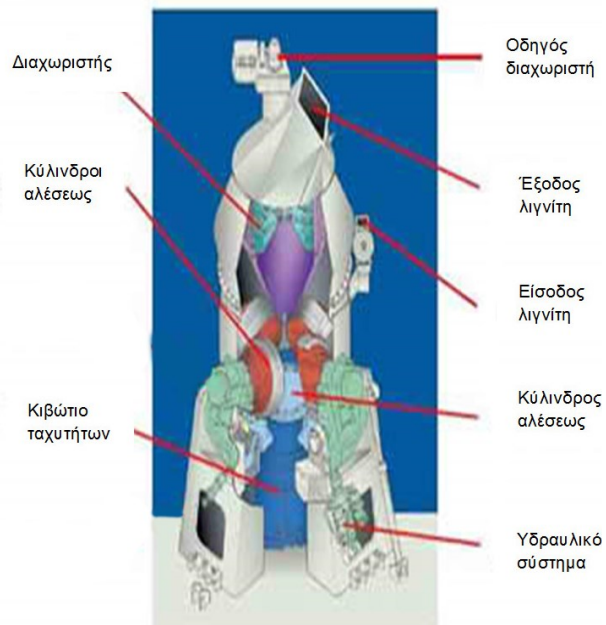
Αυτό το σύστημα κονιοποίησης αποτελείται από δυο περιστρεφόμενους κυλίνδρους που περιφερειακά τους έχουν αρθρωτές ή σταθερές προεξοχές (σφυριά). Καθώς ο λιγνίτης εισάγεται ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους (από το άνωθεν τμήμα) αρχίζει να θρυμματίζεται. Η περαιτέρω κονιοποίηση επιτυγχάνεται καθώς τα μικρότερα μόρια λιγνίτη αλέθονται μέσω της τριβής το ένα με το άλλο. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο θάλαμος είναι μεταλλικός και παρουσιάζει ιδιαίτερη αντοχή στη φθορά. Στη διπλανή Εικόνα φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα.



Εικόνα 9 : Μύλος πρόσκρουσης.

- Μύλοι κάθετων κυλίνδρων (Vertical Roller Mills)

Τα κύρια μέρη που αποτελείται είναι το κιβώτιο ταχυτήτων, το υδραυλικό σύστημα, οι μύλοι και ο διαχωριστής. Η λειτουργία του είναι η εξής: Ο λιγνίτης που εισάγεται πηγαίνει στους μύλους όπου τεμαχίζεται. Αφού έχει μετατραπεί σε μικρούς κόκκους ο εισαγόμενος θερμαινόμενος αέρας το ανυψώνει προς τα πάνω επιτυγχάνοντας έτσι την εξαγωγή του από το μύλο αλλά και ταυτόχρονα την ξήρανση του. Τα πιο πρόσφατα συστήματα κονιοποίησης είναι των «Κάθετων Κυλίνδρων». Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στη διπλανή Εικόνα.



Εικόνα 10 : Μύλοι κάθετων κυλίνδρων.

2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός αποτελείται από το στρόβιλο, τον ατμοπαραγωγό, το ψυγείο και την αντλία. Με το κύκλο Rankine απεικονίζονται οι εσωτερικές καταστάσεις του εργαζόμενου μέσου σε κάθε τμήμα. Βέβαια υπάρχουν και άλλοι όπως ο κύκλος αναθέρμανσης, αναγέννησης, και ο συνδυασμένος. Σε αυτό όμως το Κεφάλαιο περιγράφεται ο ιδανικός κύκλος Rankine επειδή μπορεί να εφαρμοστεί πρακτικά χωρίς πολλές αποκλίσεις.

Μια διάκριση που γίνεται σε μια ατμοηλεκτρική μονάδα είναι η αναφορά σε συμβατικά συστήματα ή συστήματα συμπαραγωγής. Στα συμβατικά συστήματα υπάρχει μια μονομερής χρήση του ατμού δηλαδή για ηλεκτρισμό ή για θέρμανση. Στα συστήματα συμπαραγωγής γίνεται ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) ενέργειας και θερμότητας. Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη παραγωγική διαδικασία και γενικότερα στην κάλυψη αναγκών για θέρμανση.

Τα συμβατικά συστήματα χρησιμοποιούνται περισσότερο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επειδή μπορούν να παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες. Μια σημαντική διαφορά από τα συστήματα συμπαραγωγής είναι ότι ένα μέρος της θερμότητας που παράχθηκε αποβάλλεται στο περιβάλλον και δεν χρησιμοποιείται.

Τα συστήματα συμπαραγωγής χαρακτηρίζονται είτε ως συστήματα κορυφής (topping systems) είτε ως συστήματα βάσης (bottoming systems). Στα συστήματα κορυφής παράγεται πρώτα ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια θερμική. Μερικές χρήσεις της θερμικής ενέργειας είναι στη θέρμανση χώρων, σε θερμικές διεργασίες κ.λπ. Στα συστήματα βάσης παράγεται πρώτα θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας, όπως συμβαίνει σε εγκαταστάσεις υαλουργείων, στους φούρνους των χαλυβουργείων κ.λπ, και μετά η αποβαλλόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα συστήματα συμπαραγωγής η πίεση του ατμού είναι περίπου 100 bar και για μεγαλύτερες μονάδες μπορεί να την ξεπεράσει ενώ μπορούν να αναπτυχθούν θερμοκρασίες που να φτάνουν τους 540°C. Ο βαθμός απόδοσης φθάνει το 60-85% και δεν πέφτει έντονα κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο (δηλ. φορτίο μικρότερο του ονομαστικού). Όμως ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός (15-20%), που συντελεί σε μικρό λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα ($PHR = 0.1-0.5$). Γενικά όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του ατμού που απαιτείται για τις θερμικές διεργασίες, τόσο χαμηλότερος είναι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης μέχρι ενός σημείου μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της πίεσης και θερμοκρασίας του ατμού στην είσοδο του αμοστροβίλου.

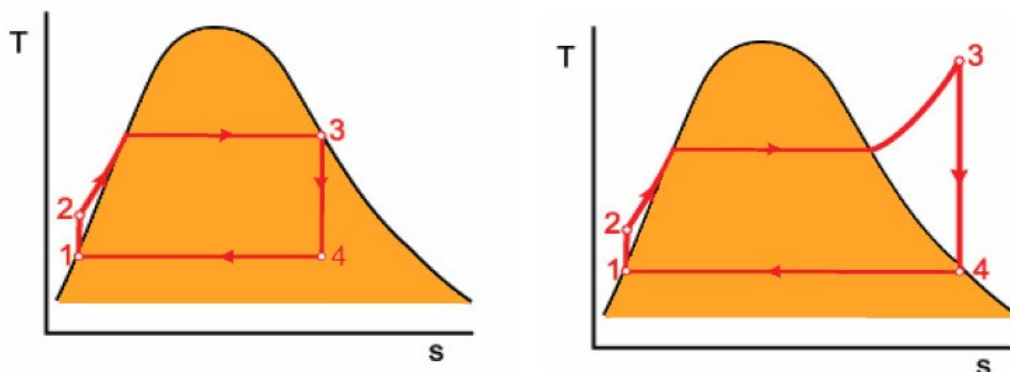


Εικόνα 11: Βαθμοί απόδοσης δύο διαφορετικών συστημάτων.

Αν και απαιτείται μεγάλος χρόνος για να κατασκευαστεί ένα σύστημα ατμοστρόβιλου (1-1,5 έτη) , εντούτοις έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως υψηλή αξιοπιστία, που φτάνει το 95%, υψηλή διαθεσιμότητα (90-95%) και μεγάλη διάρκεια ζωής (25-35 έτη).

2.2 Ο ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

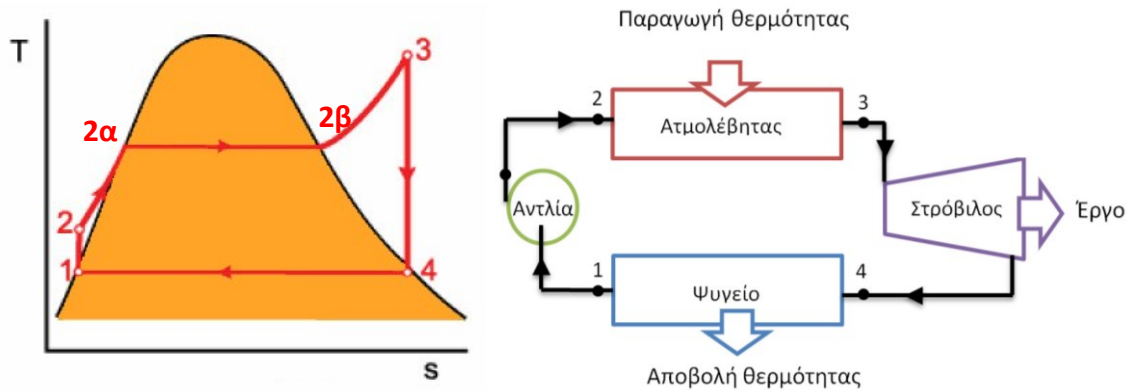
Για να γίνει αντιληπτό το πως παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια από ένα ατμοηλεκτρικό σταθμό θα πρέπει πρώτα να γίνει κατανοητός ο κύκλος Rankine . Είναι ένας από τους βασικούς πρότυπους κύκλους που χρησιμοποιούνται για να παραχθεί ισχύς με το ατμό. Ο λόγος είναι ότι δεν έχει μεγάλες δυσκολίες εφαρμογής αλλά και αντιστρεπτότητες. Η Εικόνα 12 μας δείχνει ένα απλό ιδανικό κύκλο Rankine και ένα με υπερθέρμανση σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας και εντροπίας.



Εικόνα 12: Ένας απλός ιδανικός κύκλος Rankine (αριστερά) και ένας με υπερθέρμανση (δεξιά) σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας και εντροπίας

2.2.1 Ανάλυση ιδανικού κύκλου Rankine

Στη παρούσα ανάλυση παρουσιάζεται ένας ιδανικός κύκλος Rankine με υπερθέρμανση δηλ. το εργαζόμενο μέσο έχει ατμοποιηθεί πλήρως και συνεχίζεται η θέρμανση του. Στην Εικόνα 13 απεικονίζεται η κάθε διεργασία καθώς και σε ποιο τμήμα αντιστοιχεί.



Εικόνα 13: Ο ιδανικός κύκλος Rankine

Οι διεργασίες που γίνονται σε κάθε τμήμα περιγράφονται παρακάτω:

- 1-2 Ισεντροπική συμπίεση σε αντλία

Στο σημείο 1 έχουμε την είσοδο του κορεσμένου υγρού που συμπιέζεται ισεντροπικά (η εντροπία παραμένει σταθερή) από την αντλία αυξάνοντας λίγο την θερμοκρασία.

- 2-3 Προσθήκη θερμότητας στον ατμοποιητή υπό σταθερή πίεση

Στο σημείο 2 το εργαζόμενο μέσο υπό μορφή υγρού θερμαίνεται στο ατμοπαραγωγό. Έτσι στο 2α έχει φτάσει στο σημείο βρασμού, στο 2β έχει κορεστεί (δεν έχουμε υγρό) και στο σημείο 3 έχουμε υπέρθερμο ατμό.

- 3-4 Ισεντροπική εκτόνωση σ' ένα στρόβιλο

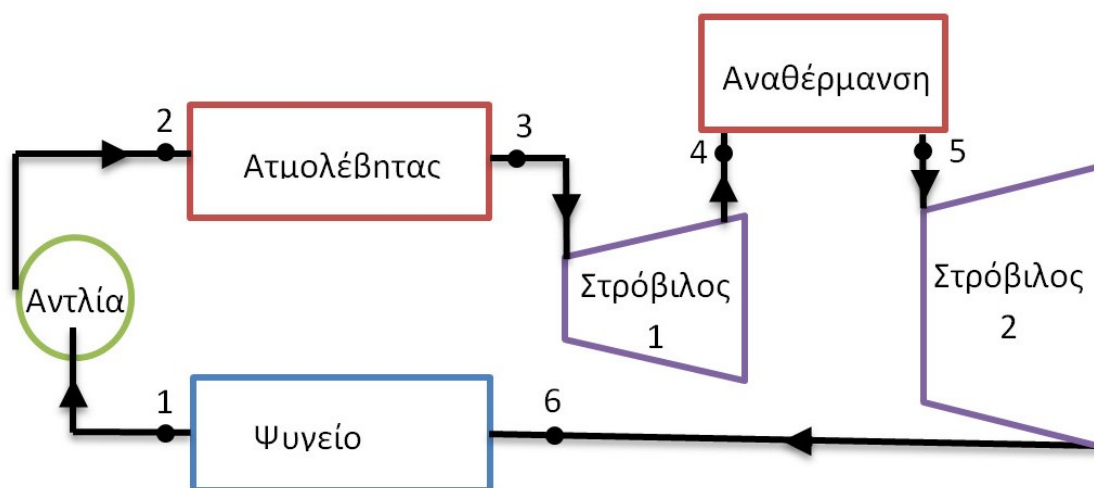
Ο υπέρθερμος ατμός στο σημείο 3 εκτονώνεται ισεντροπικά σε ένα στρόβιλο παράγοντας έργο. Έχουμε μια απότομη πτώση της θερμοκρασίας μέχρι το σημείο 4.

- 4-1 Απόρριψη θερμότητας στο συμπυκνωτή υπό σταθερή πίεση

Αφού εκτονωθεί στο στρόβιλο καταλήγει στο ψυγείο όπου το μείγμα ατμού-υγρού φτάνει στο σημείο 1 σε κορεσμένη υγρή μορφή. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή.

2.2.2 Ο κύκλος Rankine με αναθέρμανση

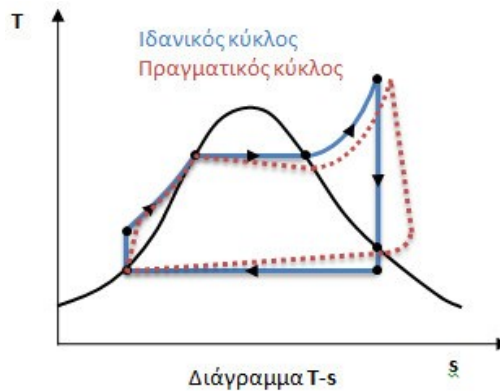
Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από δύο στρόβιλους και ακολουθεί ένα παρόμοιο κύκλο με ένα κλασικό σύστημα. Ο κύκλος Rankine με αναθέρμανση καθώς και το κάθε τμήμα της διεργασίας φαίνεται στην Εικόνα 14. Μια περιγραφή της λειτουργίας του είναι η εξής: Αρχικά δημιουργείται υπέρθερμος ατμός από τον ατμολέβητα (Σημείο 3). Στη συνέχεια εισχωρεί στο πρώτο στρόβιλο και εκτονώνεται (Σημείο 4). Αφού περάσει το πρώτο στρόβιλο ο ατμός αναθερμαίνεται ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του (Σημείο 5). Στη συνέχεια πηγαίνει στο δεύτερο στρόβιλο όπου ξανά εκτονώνεται (Σημείο 6). Έπειτα συνεχίζει στο ψύκτη για να αποβάλλει την θερμότητα του (Σημείο 1) και να μετατραπεί σε νερό, οπότε μετά διαμέσου της αντλίας ξανά στο ατμολέβητα (Σημείο 2) για να ατμοποιηθεί. Μια τέτοια εγκατάσταση πλεονεκτεί γιατί παράγονται μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας άλλα αυξάνεται το κόστος κατασκευής.



Εικόνα 14: Σύστημα αναθέρμανσης.

2.2.3 Αποκλίσεις του πραγματικού κύκλου Rankine από τον αντίστοιχο ιδανικό

Όπως έχει προαναφερθεί στο κύκλο Rankine εμφανίζονται κάποιες αντιστρεπτότητες που αποκλίνουν από αυτό του ιδανικού. Κυρίως αυτή η απόκλιση εμφανίζεται στο στρόβιλο και στην αντλία, που υπάρχει μια μη ισεντροπική μεταβολή. Στην Εικόνα 15 εμφανίζονται αυτές οι διαφορές.



Εικόνα 15: Οι διαφορές του ιδανικού κύκλου Rankine (συνεχής γραμμή) από τον πραγματικό (διακεκομμένη γραμμή).

Δυο από τις βασικότερες αιτίες αντιστρεπτότητας είναι η τριβή, που εμφανίζεται σε διάφορα μέρη του συστήματος και οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον.

Καθώς το ρευστό έρχεται σε επαφή με τα υλικά του συστήματος, δημιουργείται τριβή και προκαλείται πτώση της πίεσης. Για να μπορέσει να αντισταθμιστεί αυτή η κατάσταση το εργαζόμενο μέσο αντλείται με μεγαλύτερη πίεση από το προβλεπόμενο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται μεγαλύτερη αντλία αυξάνοντας έτσι την κατανάλωση του ρεύματος.

Η δεύτερη σημαντική αιτία είναι οι απώλειες από τον ατμό προς το περιβάλλον. Ο ατμός καθώς ρέει στις σωληνώσεις χάνει ένα τμήμα της θερμότητας του εκτός του συστήματος. Μια λύση είναι η αύξηση της θερμότητας που θα μεταφέρει ο ατμός με το μειονέκτημα ότι θα μειωθεί ο βαθμός απόδοσης του κύκλου.

Βέβαια υπάρχουν και άλλοι παράγοντες γι' αυτές τις αποκλίσεις όπως η αποφυγή της δημιουργίας σπηλαίωσης στην αντλία κ.τ.λ. που δεν θα αναλυθεί περαιτέρω. Πάντως αυτό που γίνεται αντιληπτό είναι ότι ο ιδανικός κύκλος Rankine δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αλλά υπάρχει σαν μέσο σύγκρισης ώστε να βελτιώνεται μια εγκατάσταση.

2.2.4 Δυνατότητες αύξησης του βαθμού απόδοσης του κύκλου Rankine

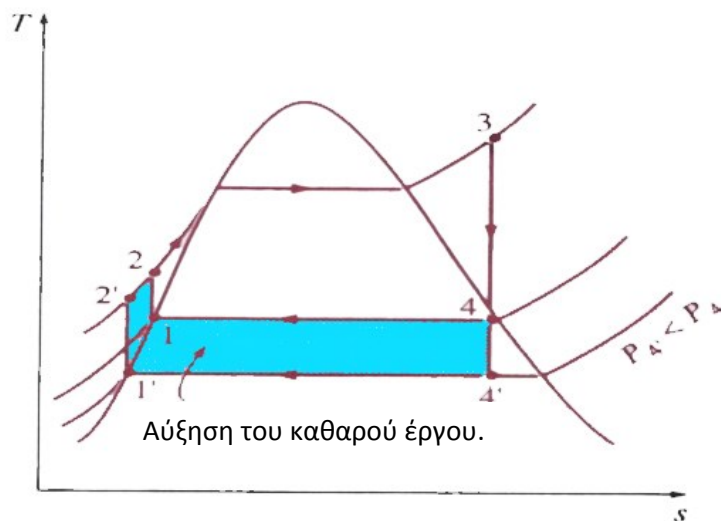
Όπως προαναφέρθηκε βασικός σκοπός είναι η αύξηση της απόδοσης του κύκλου Rankine ώστε να μπορεί το σύστημα να αποδώσει μεγαλύτερη ενέργεια. Οι βασικές ιδέες που κρύβονται πίσω από αυτήν την βελτίωση είναι οι εξής:

- Αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στην οποία η θερμότητα μεταφέρεται από τον ατμοποιητή στο εργαζόμενο μέσο.
- Μείωση της μέσης θερμοκρασίας στην οποία η θερμότητα απορρίπτεται από το ρευστό λειτουργίας μέσα στο συμπυκνωτή.

Επιθυμείται όσο το δυνατό υψηλότερη θερμοκρασία κατά την προσθήκη θερμότητας και όσο το δυνατό χαμηλότερη θερμοκρασία κατά την απόρριψη. Στη συνέχεια αναφέρονται τρεις τρόποι σύμφωνα με τους οποίους είναι δυνατό να επιτευχθούν τα παραπάνω για τον ιδανικό κύκλο Rankine.

Μειώνοντας την πίεση στο συμπυκνωτή.

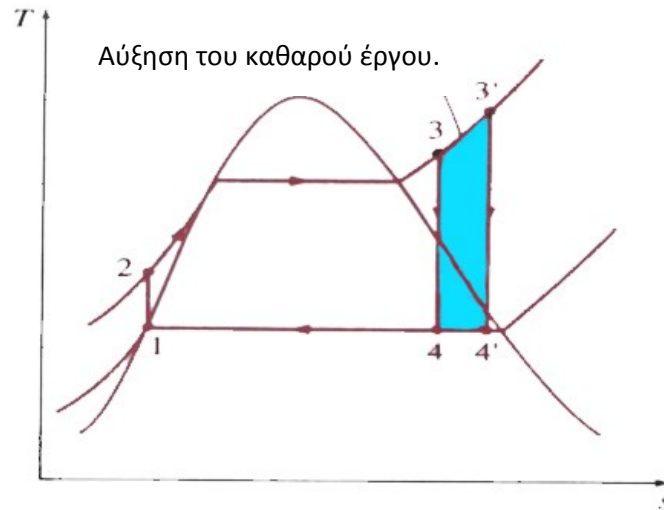
Σε αυτήν την περίπτωση η προσοχή δίνεται στο κομμάτι του συμπυκνωτή με την εξής λογική : Η άμεση σχέση του ατμού με την θερμοκρασία και την πίεση μέσα στο συμπυκνωτή μας βοηθά. Δηλαδή μειώνοντας την πίεση αυτόματα μειώνεται και η θερμοκρασία που απορρίπτεται στο περιβάλλον. Στην Εικόνα 16 φαίνεται αυτή η μείωση της πίεσης ($P_{4'} < P_4$) και ταυτόχρονα η ελάχιστη αύξηση για προσθήκη θερμότητας (παριστάνονται από την περιοχή κάτω από την καμπύλη $2'-2$). Το αποτέλεσμα με την πτώση της πίεσης είναι η αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου.



Εικόνα 16: Η επίδραση της μείωσης της πίεσης του συμπυκνωτή σ' έναν ιδανικό κύκλο Rankine.

Υπερθέρμανση του ατμού σε υψηλές θερμοκρασίες

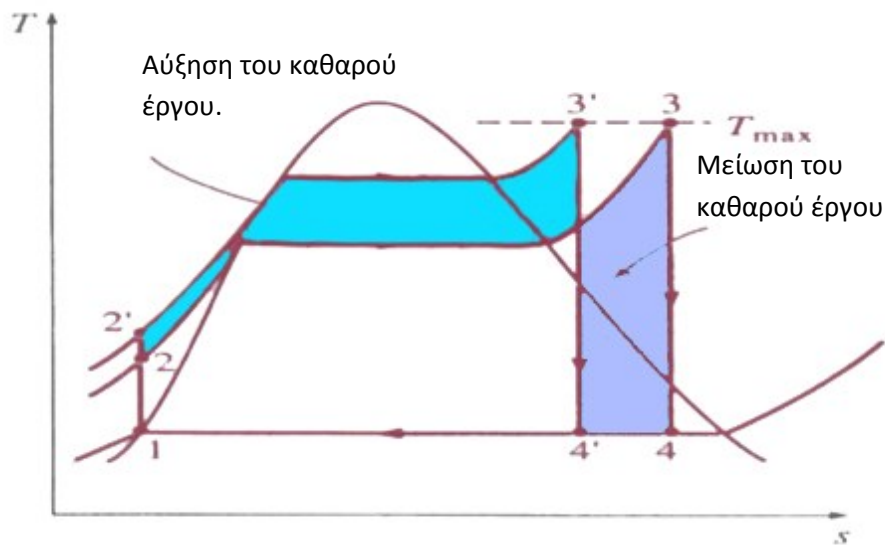
Για να επιτευχθεί αυτό δίνεται προσοχή στο στρόβιλο. Η λογική είναι να αυξηθεί η θερμοκρασία του ατμού χωρίς όμως να αυξάνεται η πίεση που ατμοποιείται. Έτσι στην Εικόνα 17 παρατηρείται η αύξηση της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού από το 3 στο 3'. Αντίθετα το υγρασιακό περιεχόμενο του ατμού στην έξοδο του στρόβιλου μειώνεται από το σημείο 4 στο σημείο 4'. Έτσι, το καθαρό έργο, η θερμότητα εισόδου και ο βαθμός απόδοσης στο ατμοηλεκτρικό σταθμό αυξάνονται λόγω της υπερθέρμανσης του ατμού σε υψηλότερη θερμοκρασία. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ότι δεν μπορεί να αυξηθεί πολύ η θερμοκρασία λόγω κατασκευαστικών λόγων π.χ. λόγω αντοχής των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν κ.τ.λ..



Εικόνα 17: Βελτίωση ιδανικού κύκλου Rankine με υπερθέρμανση του ατμού σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Αύξηση της πίεσης του ατμοποιητή

Η αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου Rankine επιτυγχάνεται ανεβάζοντας την πίεση στο ατμοπαραγωγό. Αυξάνοντας την πίεση αυξάνεται και η θερμοκρασία ταυτόχρονα “ανυψώνοντας” το διάγραμμα προς τα πάνω. Στην Εικόνα 18 φαίνονται τα προαναφερόμενα αλλά επίσης παρατηρείται και μια μείωση του έργου. Αν και αποτελεί μία ανεπιθύμητη παρενέργεια εντούτοις μπορεί να διορθωθεί αναθερμαίνοντας τον ατμό.



Εικόνα 18: Η επίδραση της αύξησης της πίεσης του ατμοποιητή στον ιδανικό κύκλο Rankine.

2.3 ΤΑ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

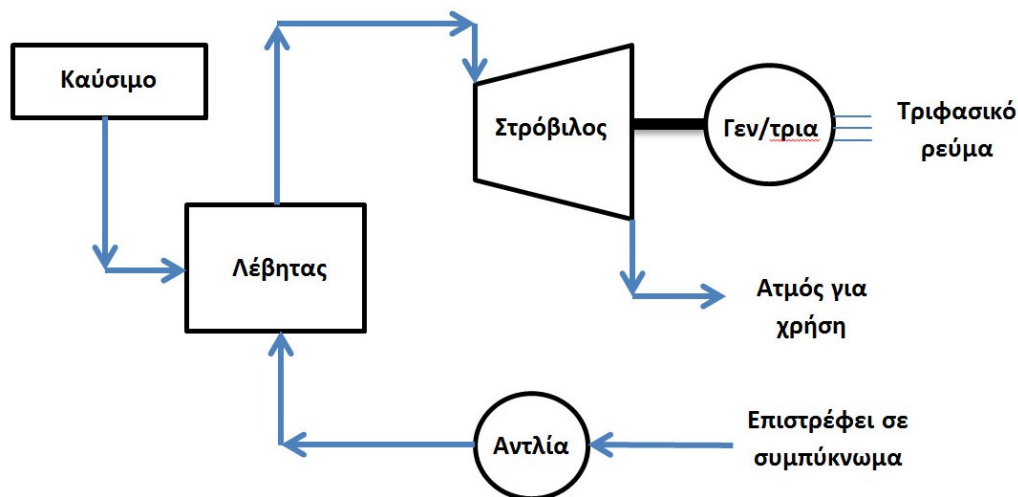
Υπάρχουν τρεις βασικές διατάξεις συστημάτων συμπαραγωγής:

- Το σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο αντίθλιψης (ο ατμός εξέρχεται του στρόβιλου σε πιέσεις υψηλότερες της ατμοσφαιρικής).
- Το σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο απομάστευσης (ο ατμός εξέρχεται του στρόβιλου από ενδιάμεσες βαθμίδες).
- Το σύστημα με θέρμανση του αμού από εξωτερική πηγή (Bottoming Cycle).

2.3.1 Σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο αντίθλιψης

Ένα τέτοιο σύστημα χαρακτηρίζεται από την έλλειψη του συμπυκνωτή. Έτσι ο ατμός που εκτονώνεται στο στρόβιλο πηγαίνει στην παραγωγική διαδικασία και αποβάλλεται η θερμότητα του. Ο ατμός βγαίνει από τον στρόβιλο σε πίεση και θερμοκρασία κατάλληλη για τις θερμικές διεργασίες. Αυτή η πίεση είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (3-20 bar) και σε αυτό οφείλεται ο όρος αντίθλιψη. Η υπόλοιπη κατασκευή είναι παρόμοια με ένα κλασικό αμοηλεκτρικό σταθμό δηλ. αποτελείται από το αμολέβητα, το στρόβιλο, τη γεννήτρια και την αντλία.

Μερικά πλεονεκτήματα που έχει είναι η απουσία ψυκτικού μέσου, το μικρό κόστος κατασκευής και ο υψηλός βαθμός απόδοσης (περίπου 85%). Εντούτοις έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα τη μη ελεγχόμενη παραγωγή - αποβολή της θερμότητας.

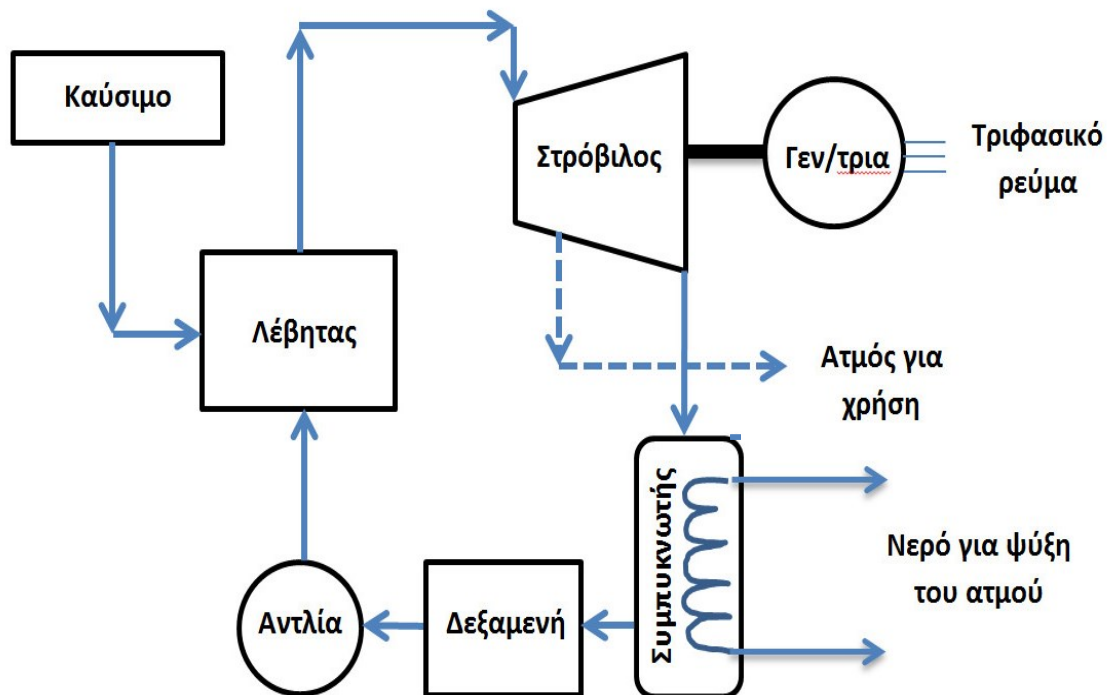


Εικόνα 19: Σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο αντίθλιψης.

2.3.2 Σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο απομάστευσης

Η απομάστευση είναι η αποδέσμευση ενός μέρους του ατμού από μια ενδιάμεση βαθμίδα του στρόβιλου για διάφορες χρήσεις. Ο υπόλοιπος ατμός εκτονώνεται στο στρόβιλο και μετά πηγαίνει στο συμπυκνωτή όπου ψύχεται.

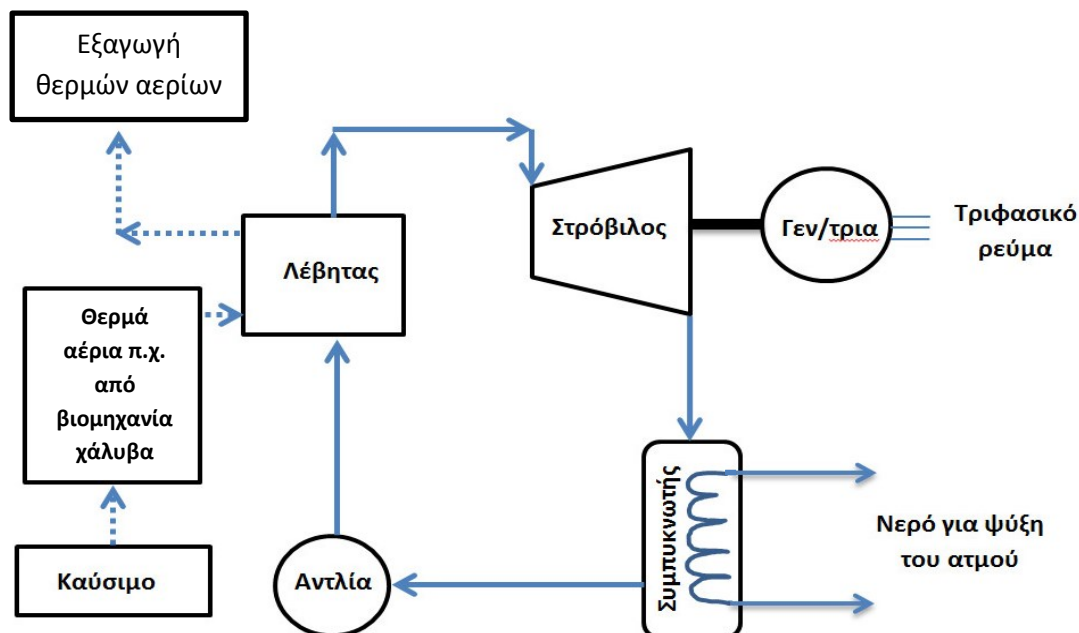
Μειονεκτεί ως προς το βαθμό απόδοσης (φτάνει περίπου το 80%) και το κόστος κατασκευής σε σχέση με το σύστημα αντίθλιψης. Έχει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο είναι η ανεξάρτητη μέσα σε ορισμένα όρια ρύθμιση της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος.



Εικόνα 20: Σύστημα συμπαραγωγής με αμοστρόβιλο απομάστευσης.

2.3.3 Σύστημα συμπαραγωγής με θέρμανση του ατμού από εξωτερική πηγή

Η θέρμανση του ατμού γίνεται από μία εξωτερική πηγή δηλ. μπορεί να υπάρχουν αέρια απόβλητα από μια βιομηχανία χάλυβα, κεραμικών κ.τ.λ. Έτσι μετά από μία επεξεργασία που δέχονται τα αέρια φτάνουν στο λέβητα ώστε να παραχθεί ατμός. Το μόνο βασικό στοιχείο που το διαφοροποιεί από αυτό του συστήματος απομάστευσης είναι ότι υπάρχει μία εξωτερική πηγή θερμότητας.



Εικόνα 21: Σύστημα συμπαραγωγής με κύκλο βάσης ατμού.

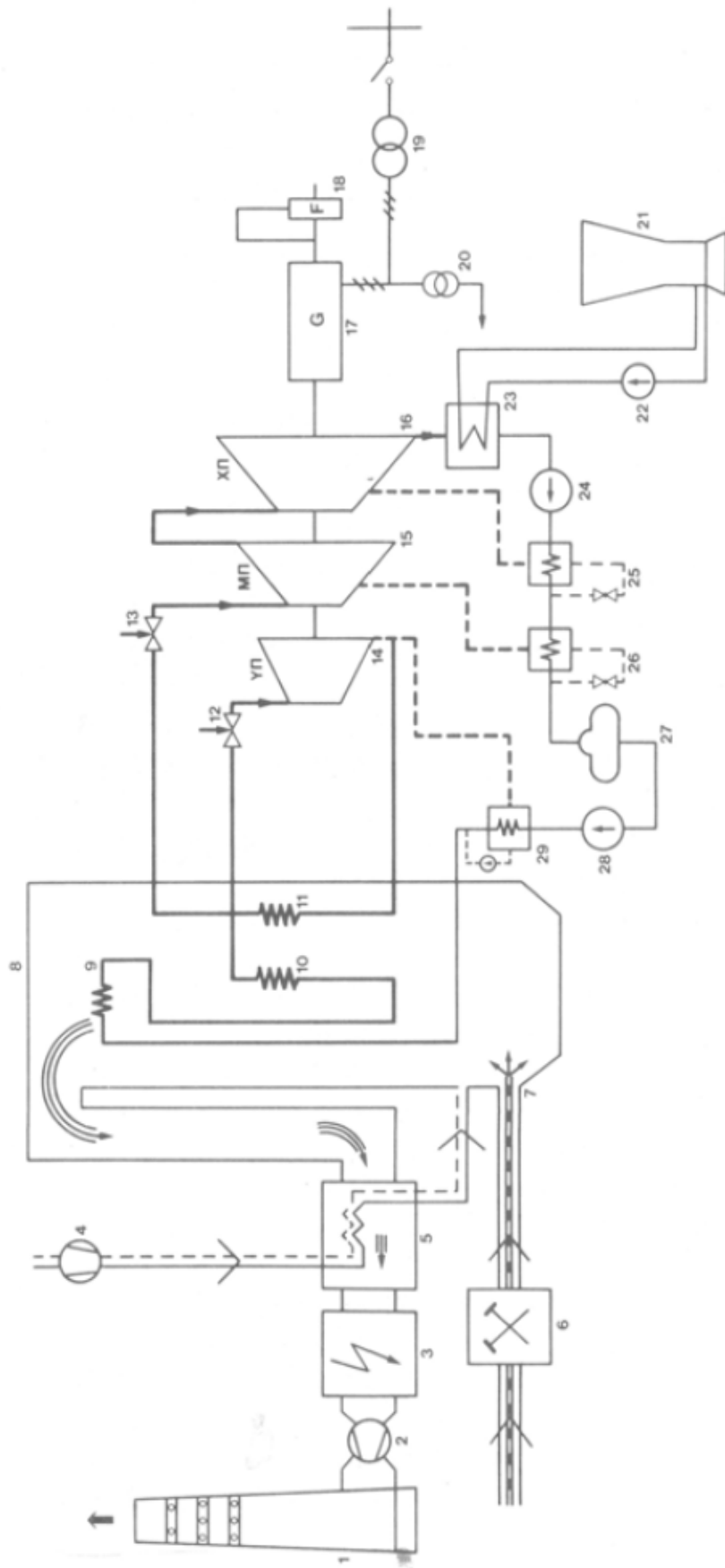
2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΙΑΣ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΛΙΓΝΙΤΗ

Στη περιγραφή του κύκλου Rankine παρατηρούνται τα βασικά τμήματα που αποτελείται μια ατμοηλεκτρική μονάδα καθώς και σε τι φάσεις βρίσκεται το εργαζόμενο μέσο. Εντούτοις μια πραγματική μονάδα (Εικόνα 22) αποτελείται από πολλά τμήματα που το καθένα εξυπηρετεί μία ορισμένη εργασία. Η περιγραφή των τμημάτων φαίνεται στο παρακάτω Πίνακα.

Νούμερο	Τμήμα	Περιγραφή
1	Καμινάδα	Από αυτήν εξάγονται τα καυσαέρια
2	Ανεμιστήρας καπναερίων	Για την αποβολή των καπναερίων
3	Φίλτρο	Φίλτρο αιωρημάτων. Μπορεί να είναι μηχανικό ή ηλεκτροστατικό
4	Ανεμιστήρας	Αέρα καύσης
5	Προθερμαντήρας	Για την προθέρμανση του αέρα
6	Μύλοι	Για τον θρυμματισμό του λιγνίτη
7	Καυστήρες	Καύση του λιγνίτη
8	Ατμολέβητας	Παραγωγή ατμού
9,10,11	Σωληνώσεις	Εναλλάκτες θερμότητας Υπερθερμαντήρας- Αναθερμαντήρας

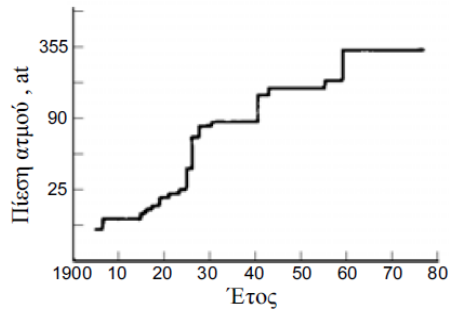
14,15,16	Τμήματα στροβίλου	Υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης
17	Γεννήτρια	Μετατρέπει τη μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια
19,20	Μετασχηματιστής	Για το μετασχηματισμό της τάσης
21	Πύργος ψύξης	Αποβολή της μη χρησιμοποιηθείσας θερμότητας
23	Συμπυκνωτής	Συμπύκνωση ατμού
24	Κυκλοφορητής	Μεταφορά συμπυκνώματος
25,26,29	Προθερμαντές	Προθέρμανση νερού
28	Αντλία	Μεταφορά συμπυκνώματος

Πίνακας 2: Μερικά τμήματα της ατμοηλεκτρικής μονάδας

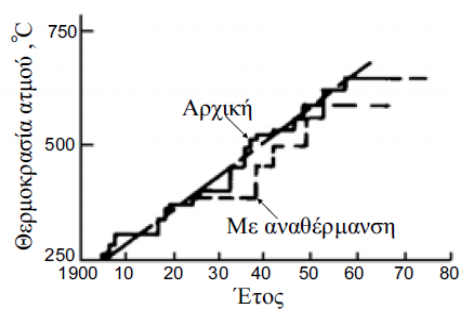


Εικόνα 22: Συγκρότηση ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού (ΑΗΣ).

Βέβαια μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ατμό εξελίσσεται συνέχεια ώστε να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης της. Έτσι καταργούνται , βελτιώνονται ή τοποθετούνται καινούρια εξαρτήματα - τμήματα. Παρακάτω φαίνονται κάποια διαγράμματα αυτής της βελτίωσης.



Η επιτευχθείσα μέγιστη πίεση ατμού με το χρόνο.



Η επιτευχθείσα μέγιστη θερμοκρασία ατμού με το χρόνο.

3. ΑΤΜΟΛΕΒΗΤΑΣ

Ο ατμολέβητας ή ατμοπαραγωγός είναι ένα σύστημα παραγωγής ατμού, με καθορισμένα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά. Είναι κατασκευασμένος κυρίως από μέταλλο και το ύψος του στις σύγχρονες μονάδες φτάνει και τα εκατό (100) μέτρα. Στο χαμηλότερο μέρος του βρίσκεται η τεφρολεκάνη (ανάλογα με το καύσιμο), μετά ακολουθεί το σύστημα καύσης, οι σωληνώσεις για την μεταφορά θερμότητας και ο σωλήνας εξαγωγής των καυσαερίων.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη ατμολεβήτων: οι υδραυλωτοί και αεριαυλωτοί. Στους υδραυλωτούς το νερό κυκλοφορεί μέσα στους αυλούς και τα καυσαέρια περνούν εξωτερικά. Στους αεριαυλωτούς τα καυσαέρια κινούνται μέσα στους αυλούς και το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται εξωτερικά.

Ο ατμολέβητας είναι από τα πιο χρησιμοποιούμενα συστήματα για την παραγωγή ατμού σε μεγάλες ατμοηλεκτρικές μονάδες. Αυτό οφείλεται στο ότι μπορεί να λειτουργεί με οποιοδήποτε καύσιμο π.χ. πετρέλαιο, λιγνίτη, φυσικό αέριο κ.τ.λ. και να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Βέβαια παρουσιάζει και ελαττώματα π.χ. μεγάλο κόστος-χρόνος κατασκευής, σχετικά μεγάλες απώλειες, υψηλό κόστος συντήρησης, δεν μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε περιοχή κ.τ.λ..

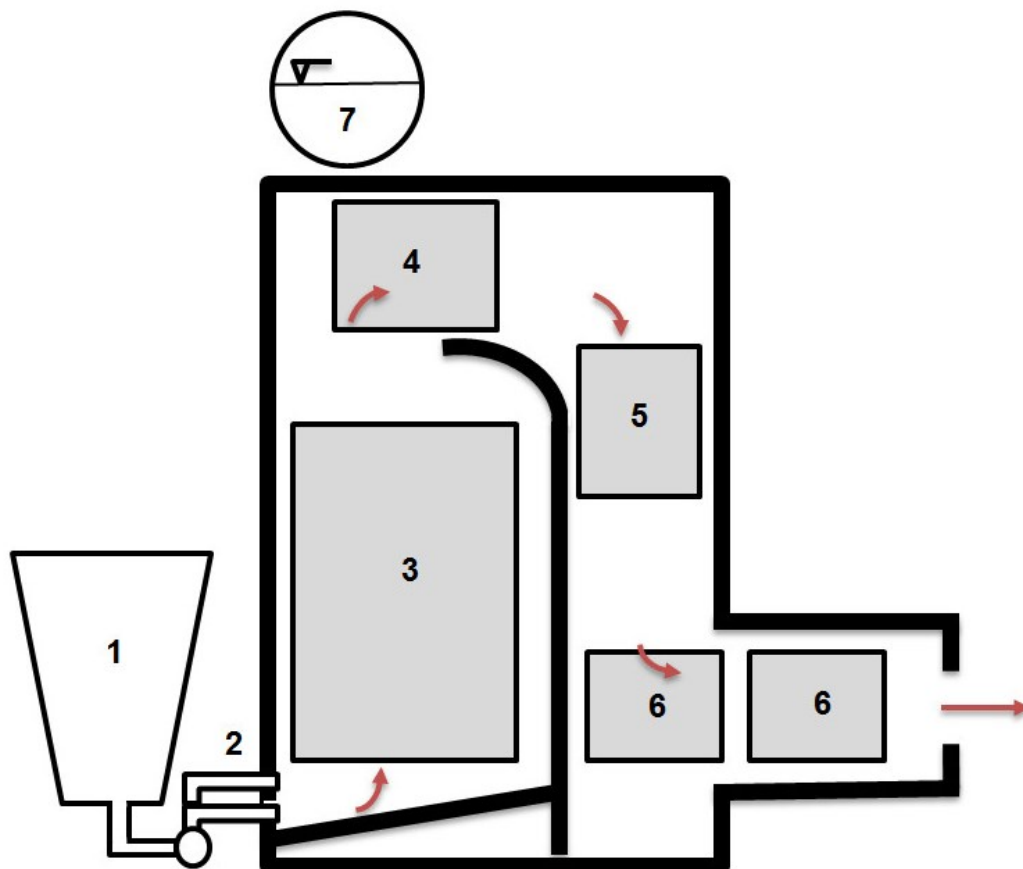
Μια κατηγοριοποίηση τους μπορεί να γίνει με βάση την κυκλοφορία του νερού δηλ. :

- Ατμοπαραγωγοί με φυσική κυκλοφορία
- Ατμοπαραγωγοί με τεχνητή κυκλοφορία
- Ατμοπαραγωγοί εξαναγκασμένης ροής

3.1 ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΤΜΟΛΕΒΗΤΑ

Ένας ατμολέβητας αποτελείται από πολλά τμήματα και συστήματα (βάνες, μανόμετρα κ.τ.λ.) που συντελούν στην σωστή λειτουργία του. Μια απλή απεικόνιση ενός ατμολέβητα φαίνεται στην Εικόνα 23. Στο παρακάτω Πίνακα αναλύεται το κάθε τμήμα.

Νούμερο	Τμήμα	Περιγραφή
1	Καύσιμο	Το καύσιμο είναι λιγνίτης σε σκόνη και δεν απαιτείται εσχάρα.
2	Καυστήρας	Εκτοξεύει το καύσιμο με τον αέρα.
3	Αρχικό τμήμα	Είναι κατασκευασμένο από υλικό υψηλής αντοχής για να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες. Το πρώτο στάδιο θέρμανσης του νερού.
4	Υπερθερμαντήρας ατμού	Μετατρέπει το νερό σε υπέρθερμό ατμό.
5	Προθερμαντήρας νερού	Προθερμαίνει το νερό ώστε να μην εισαχθεί στο αρχικό τμήμα πολύ κρύο.
6	Προθερμαντήρας αέρα	Προθερμαίνει τον αέρα για την καύση. Επίσης χρησιμοποιείται ο προθερμ/νος αέρας για την ξήρανση του λιγνίτη.
7	Τύμπανο	Χρησιμοποιείται ως ατμοθάλαμος.



Εικόνα 23: Σχέδιο ατμολέβητα.

Τα κύρια τμήματα που ξεχωρίζουν σε ένα ατμολέβητα είναι : ο Υπερθερμαντήρας, ο Προθερμαντήρας νερού και ο Προθερμαντήρας αέρα καύσης.

3.1.1 Υπερθερμαντήρας

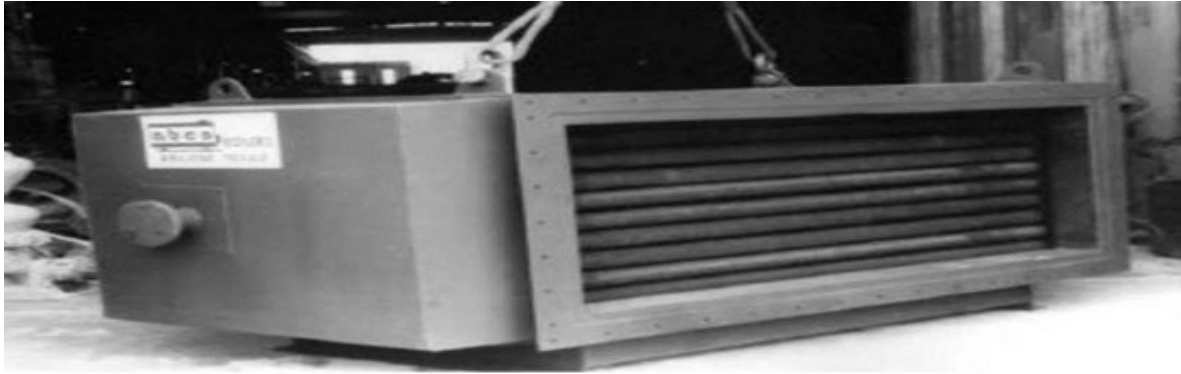
Με τον υπερθερμαντήρα (superheater, SH) υπερθερμαίνεται ο κορεσμένος ατμός που έχει δημιουργηθεί από το σύστημα ατμοποίησης. Αποτελείται από σωληνώσεις που παίρνουν "διάφορα" σχήματα. Έτσι αυξάνεται η επιφάνεια με την οποία έρχονται σε επαφή τα καυσαέρια ώστε να γίνει γρήγορη μεταφορά θερμότητας προς το εργαζόμενο μέσο . Συνήθως έχει ορθογώνιο σχήμα γιατί βολεύει στην τοποθέτηση του μέσα στο λέβητα. Είναι κατασκευασμένο από ειδικό υλικό γιατί έρχεται σε επαφή με υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος διακρίνεται σε ακτινοβολίας και μεταφοράς.



Εικόνα 24: Υπερθερμαντήρας

3.1.2 Προθερμαντήρες νερού

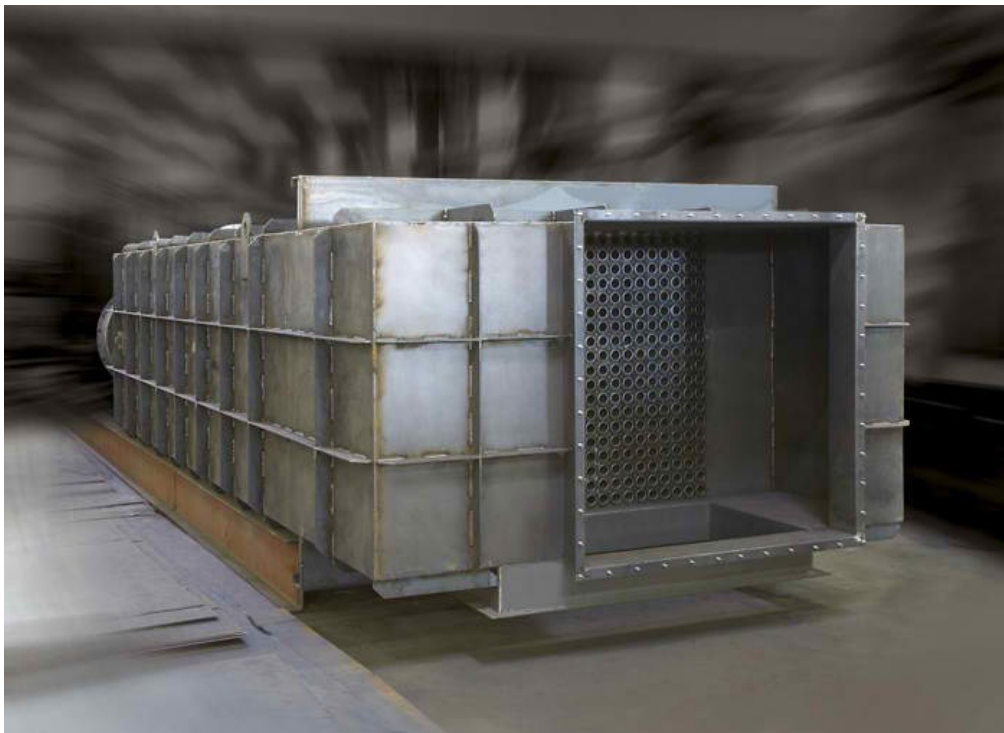
Συνήθως μετά τον υπερθερμαντήρα βρίσκεται ο προθερμαντήρας νερού ή οικονομητήρας (economizer, ECO). Σκοπός του είναι να προθερμάνει το νερό (περίπου κατά 30 - 50 °C) ώστε πηγαίνοντας στον ατμοποιητή να έχουμε καλύτερη λειτουργία του συστήματος. Είναι κατασκευασμένος από μέταλλο και αποτελείται από ένα σύστημα με σερπαντίνες ώστε να αυξηθεί η επιφάνειά του. Συνδέεται με το τύμπανο για τις διαστολές και τις συστολές που υπάρχουν. Το μέγεθος του ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις και την κατασκευή που υπάρχει.



Εικόνα 25: Προθερμαντήρας (ABCO Industries, Abilene, TX.).

3.1.3 Προθερμαντήρας αέρα καύσης (LUVO)

Με τον προθερμαντήρα αέρα καύσης προθερμαίνεται ο αέρας που θα πάει στον καυστήρα. Αυτή η προθέρμανση γίνεται με τα καυσαέρια που τον διαπερνούν. Ο ρόλος της προθέρμανσης του αέρα είναι τριπλός, δηλ.: α) Να υπάρχει καλύτερη καύση (άρα καλύτερος βαθμός απόδοσης) β) Να ξηραίνει το λιγνίτη από την πολλή υγρασία και γ) Να μειώνει την θερμοκρασία των καπναερίων, αφού είναι από τα τελευταία τμήματα του ατμολέβητα. Είναι παρόμοια κατασκευή με τον προθερμαντήρα νερού με την διαφορά μόνο ως προς το ρευστό που προστίθεται θερμότητα. Διακρίνονται σε προθερμαντήρες με πλάκες, περιστρεφόμενοι προθερμαντήρες, ή προθερμαντήρες αέρα με σωλήνες. Τέλος ο αριθμός που είναι τοποθετημένοι ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του λέβητα.



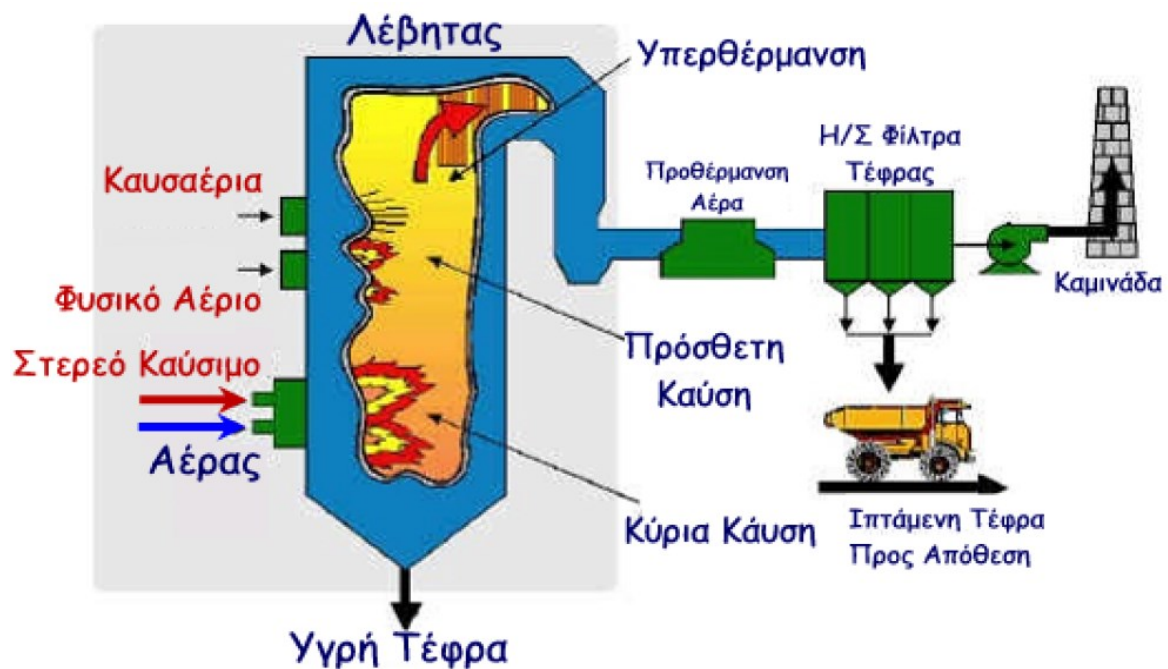
Εικόνα 26: Προθερμαντήρας αέρα LUVO.



Εικόνα 27: Προθερμαντήρας αέρα.

3.2 ΤΥΠΟΙ ΚΑΥΣΤΗΡΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

Όπως είναι γνωστό για να πραγματοποιηθεί μια καύση είναι απαραίτητο το καύσιμο (ο λιγνίτης στην περίπτωση μας), το οξειδωτικό (ο αέρας και πιο συγκεκριμένα το οξυγόνο) και ένας σπινθήρας για να γίνει η χημική ένωση. Όταν το καύσιμο είναι ο λιγνίτης η ανάφλεξη δεν μπορεί να γίνει εύκολα και κυρίως αν γίνεται για πρώτη φορά. Για αυτό χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές ένας επιπλέον καυστήρας για να κάνει την αρχή. Στην Εικόνα 28 φαίνεται ένα σύστημα καύσης.



Εικόνα 28: Σύστημα καύσης.

Οι καυστήρες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Καυστήρες Σταθερής Κλίνης.

Αποτελεί ίσως ένα από τα παλαιότερα συστήματα καύσης που χρησιμοποιούνται συνήθως για την καύση κονιοποιημένων στερεών καυσίμων. Ουσιαστικά υπάρχει ο χώρος που γίνεται η καύση και αυτό που χρειάζεται είναι να εισάγεται συνέχεια το στερεό καύσιμο και το οξυγόνο για να παραχθεί θερμότητα. Λόγω της φύσης του συστήματος θα πρέπει να είναι στο κατώτερο σημείο του λέβητα. Επίσης πρέπει να έχει ένα επιπλέον σύστημα ανάφλεξης ώστε να γίνει η αρχή κατά την εκκίνηση. Ο αέρας από την άλλη μπορεί να εισάγεται πάνω από το καύσιμο ή από κάτω του.

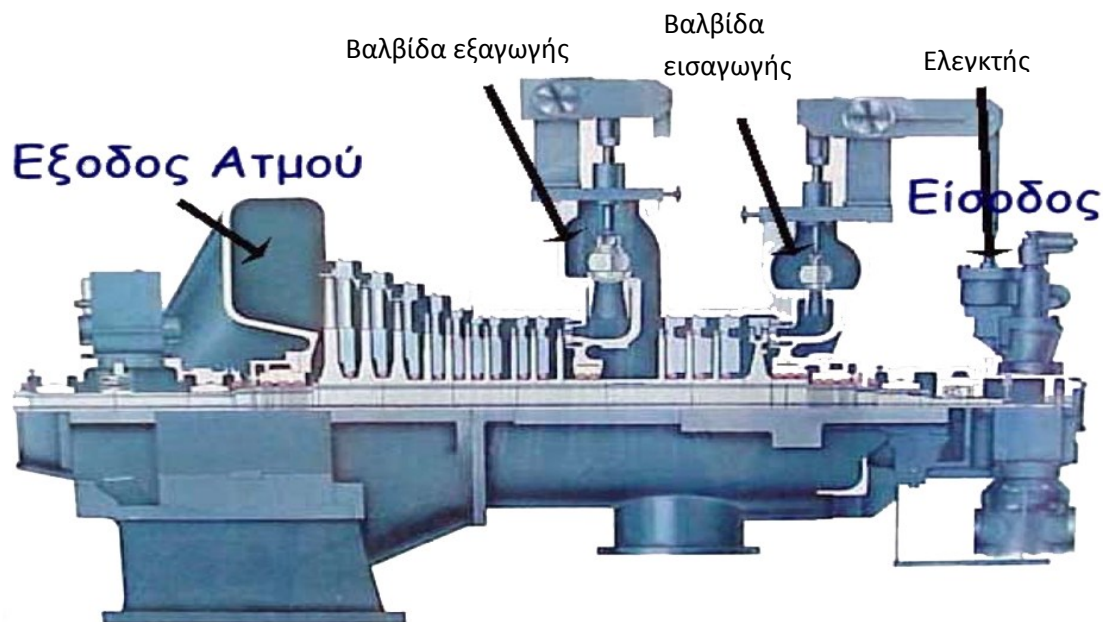
2. Καυστήρες Ρευστοποιημένης Κλίνης (Fluidized bed combustors)

Εδώ με την χρήση ανερχόμενου ρεύματος αέρα ο άνθρακας (που είναι σε μορφή κόκκων περίπου 2-3 mm) διοχετεύεται στο καυστήρα όπου και καίγεται. Έτσι, λόγω της συνεχής ανάδευσης που υπάρχει καταφέρνεται να επιτευχθούν χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου 800-850 °C) αλλά και μεγάλη μετάδοση της θερμότητας με αγωγή. Βέβαια αν και έχει κάποια πλεονεκτήματα υπάρχουν και κάποια βασικά μειονεκτήματα. Δυο από αυτά είναι το κόστος και η απαίτηση συμπιεστών. Το κόστος οφείλεται στα επιπλέον συστήματα που απαιτούνται π.χ. για το φιλτράρισμα του αέρα κατά την έξοδο κ.τ.λ. Το σύστημα συμπιεστών χρειάζεται για την εισαγωγή του αέρα και απαιτεί ενέργεια, συντήρηση κ.τ.λ..

4. ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΣ

Με τον ατμοστρόβιλο μετατρέπεται η ενέργεια του ατμού που έχει παραχθεί στον ατμοπαραγωγό σε κινητική ενέργεια. Αφού αποκτήσει την περιστροφική του κίνηση, με την σειρά του κινεί κυκλικά την γεννήτρια που παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Η μορφή του είναι κωνική (φαίνεται στην Εικόνα 29). Αυτό οφείλεται στις διαβαθμίσεις που υπάρχουν, δηλαδή στη είσοδο τα πτερύγια είναι μικρότερα και στη συνέχεια το μέγεθος τους αυξάνεται σταδιακά. Ακόμα υπάρχει μια άμεση σύνδεση του βαθμού απόδοσης του στρόβιλου με την ταχύτητα περιστροφής του. Γενικά ο στρόβιλος δεν μπορεί να ξεπεράσει μια ορισμένη ταχύτητα λόγω των φθορών που θα υπάρξουν αλλά και πιθανόν της καταστροφής του.

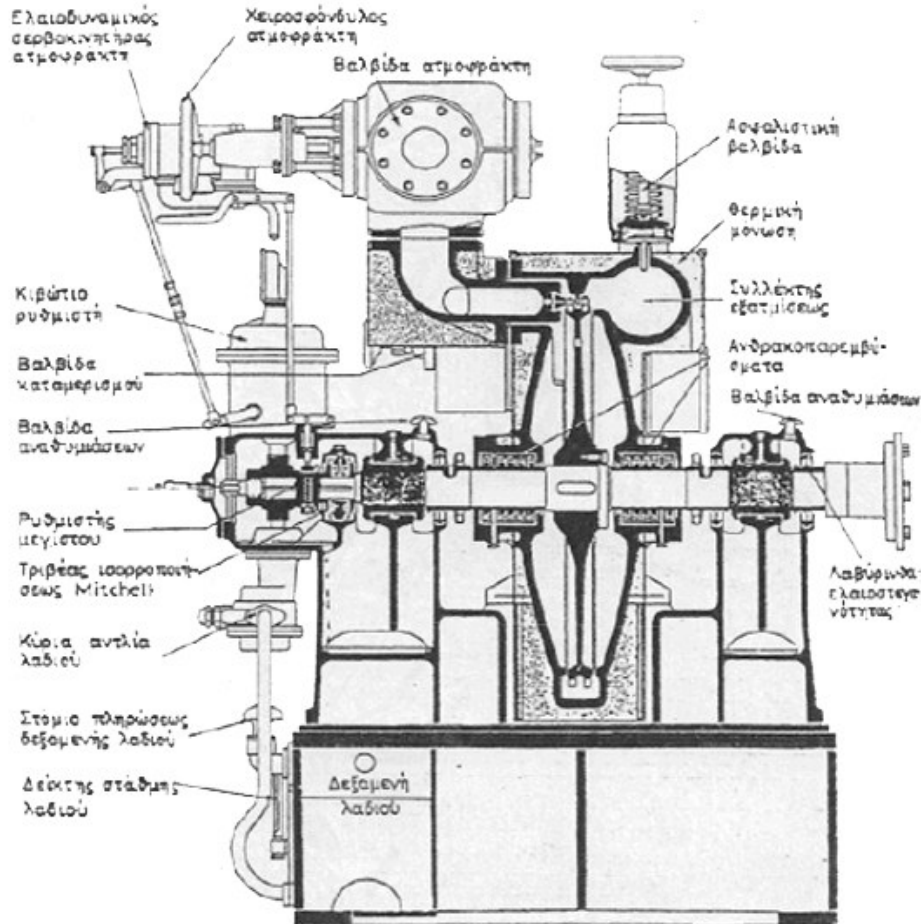
Αν και είναι μεγάλος σε μέγεθος απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στην κατασκευή του ώστε να αποδίδει στο μέγιστο. Έτσι απαιτούνται πολλές ώρες εργασίας με τεχνίτες που να έχουν μεγάλη εμπειρία.



Εικόνα 29: Τομή ατμοστρόβιλου.

4.1 ΜΕΡΗ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

Για να λειτουργήσει σωστά ένας ατμοστρόβιλος απαιτούνται πολλά εξαρτήματα και συστήματα ασφαλείας. Ο λόγος είναι ότι κάθε στρόβιλος είναι μοναδικός και η αντικατάσταση του είναι δύσκολη. Μερικά από τα εξαρτήματα είναι η αντλία λαδιού, η ασφαλιστική βαλβίδα, ο τριβέας ισοροπήσεως κ.τ.λ. Στην Εικόνα 30 φαίνονται τα μέρη που αποτελείται.

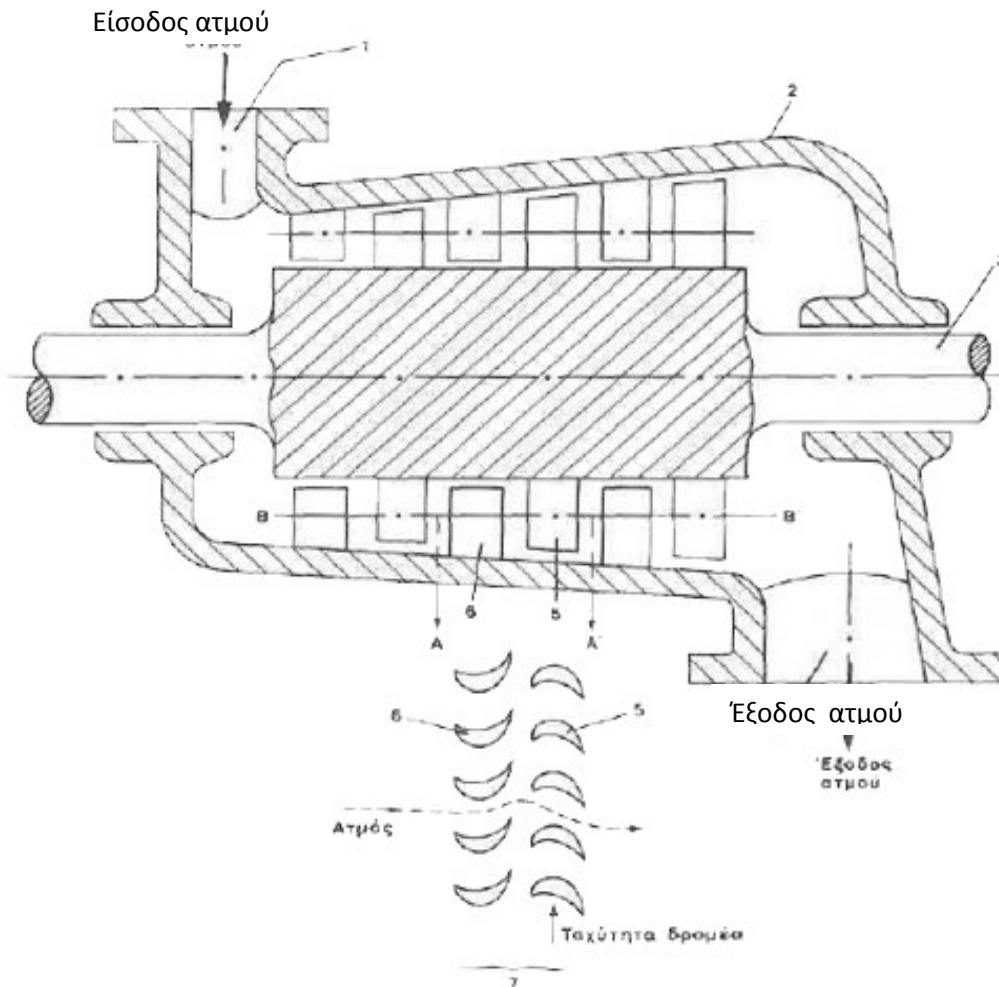


Εικόνα 30: Μέρη ατμοστρόβιλου.

4.2 ΤΜΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΤΕΡΥΓΙΑ

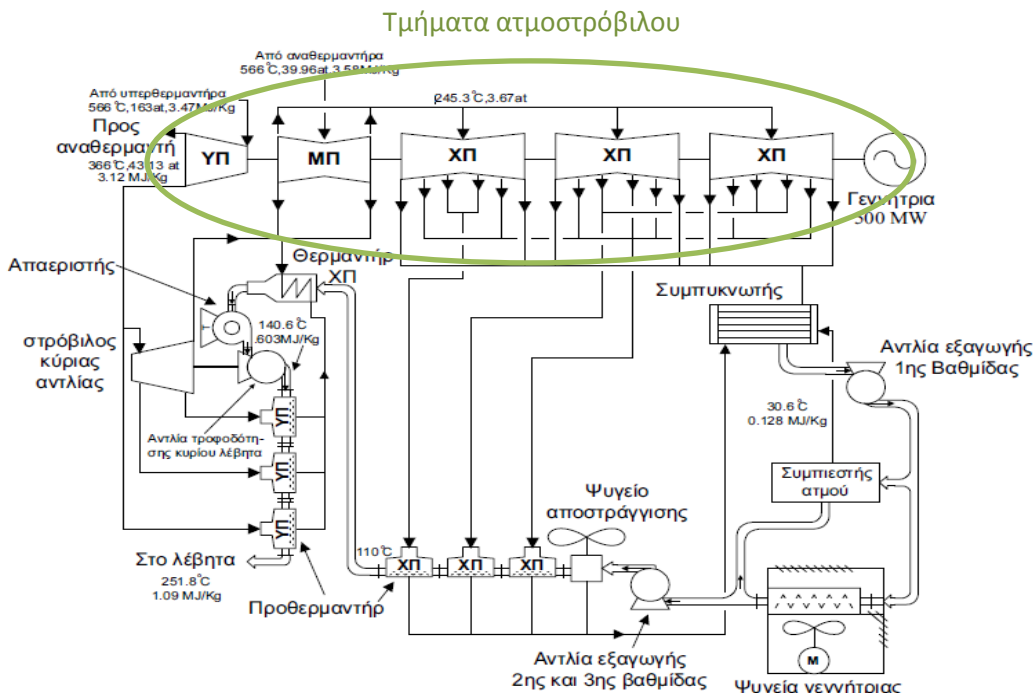
Επειδή η πίεση του ατμού είναι πολύ υψηλή, χρησιμοποιούνται πτερύγια που στην είσοδο είναι μικρά σε μέγεθος και στη έξοδο σταδιακά αυξάνονται. Αυτό γίνεται για να αυξηθεί η επιφάνεια και να μην υπάρχουν μεγάλες ταχύτητες και μη σωστή κατανομή του ατμού. Έτσι η εκτόνωση γίνεται σταδιακά σε πολλές βαθμίδες.

Για να μην έχει ένα μεγάλο συνεχές μήκος ο στρόβιλος χωρίζεται σε τμήματα. Κάθε τμήμα αποτελείται από βαθμίδες διαφορετικών πτερυγίων (ανάλογα με την πίεση που χρησιμοποιείται). Ένα τέτοιο τμήμα παρουσιάζεται στη Εικόνα 31.



Εικόνα 31: Τμήμα ατμοστρόβιλου . Διακρίνονται : 1. Στόμιο εισόδου 2. Κέλυφος 3. Δρομέας 4. Στόμιο εξόδου 5. Κινητό πτερύγιο 6. Σταθερό (οδηγό πτερύγιο) 7. Ανάπτυγμα μιας κυλινδρικής τομής BB' που δείχνει ένα ζεύγος κινητών και σταθερών πτερυγίων, δηλαδή μια βαθμίδα.

Υπάρχουν συνήθως τρία τμήματα (Εικόνα 32): υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης. Κάθε τμήμα επεξεργάζεται μια ορισμένη διαφορά πίεσης. Ένα τμήμα αποτελείται από τον άξονα με τα κινητά πτερύγια και τα οδηγά πτερύγια που οδηγούν τον ατμό. Οι καμπυλότητες των πτερυγίων είναι τέτοιες ώστε το εξερχόμενο ρεύμα ατμού από τα σταθερά πτερύγια να πέφτει πάνω στα κινούμενα και να μην δημιουργούνται στροβιλισμοί και κρούσεις στις επιφάνειες. Ο αριθμός των πτερυγίων διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του στρόβιλου. Τα ζεύγη σταθερών-κινητών πτερυγίων μπορεί να φτάσουν τα είκοσι σε ένα τμήμα υψηλής πίεσης. Κάθε ζεύγος πτερυγίων επεξεργάζεται και μια ορισμένη μικρή διαφορά πίεσης.



Εικόνα 32: Διακρίνουμε τα τρία τμήματα του ατμοστρόβιλου δηλ. τμήμα υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης.

4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Ανάλογα με το που γίνεται η εκτόνωση χωρίζουμε τους στροβίλους σε δύο κατηγορίες οι οποίες είναι:

Στρόβιλοι δράσεως ή ίσης πίεσης (Impulse Turbines)

Η εκτόνωση γίνεται κυρίως στα σταθερά πτερύγια. Δηλαδή ο βαθμός αντίδρασης είναι μηδενικός. Η κατασκευή των πτερυγίων είναι τέτοια ώστε να επιταχύνεται η ροή και να μειώνεται η πίεση. Έτσι η ροή που έχει υψηλή ταχύτητα κινεί τα πτερύγια με την δύναμη της αλλαγής που δέχεται.

Στρόβιλοι αντιδράσεως (Reaction Turbines, Parsons)

Σε σύγκριση με την παραπάνω περίπτωση, εδώ η εκτόνωση γίνεται και στα δύο πτερύγια. Επειδή υπάρχει διαφορετική πίεση στην είσοδο και στην έξοδο των κινητών πτερυγίων γίνεται λόγος για στροβίλους αντιδράσεως. Ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων δράσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερος απ' ό,τι στους στροβίλους αντίδρασης όσον αφορά το τμήμα των πτερυγίων. Αν ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες που διαμορφώνουν τον βαθμό απόδοσης, οι δυο μορφές στροβίλων είναι ισοδύναμες και έτσι κατασκευάζονται και οι δύο τύποι.

4.4 ΕΙΔΗ ΡΟΗΣ

Η ροή του ατμού κατά την είσοδο στο στρόβιλο δεν είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Κάθε μια έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στους κλασικούς στροβίλους η ροή του ατμού έχει μια κατεύθυνση. Αυτή η ροή ονομάζεται απλή και χαρακτηρίζεται από μια δύναμη που τείνει να σπρώξει το στρόβιλο. Αυτή η δύναμη δημιουργείται από την μονομερή κατεύθυνση που έχει ο ατμός και απαιτούνται “καλά” έδρανα στήριξης. Στην διπλή ροή ο ατμός εισέρχεται στη μέση και εξέρχεται από τα δύο άκρα συμμετρικά. Έτσι δεν παρατηρείται ανάπτυξη της οριζόντιας δύναμης επειδή αλληλοεξουδετερώνεται. Τέλος υπάρχει και η σύνθετη διάταξη όπου ο ατμός περνά από μια σειρά χωριστών μονάδων.

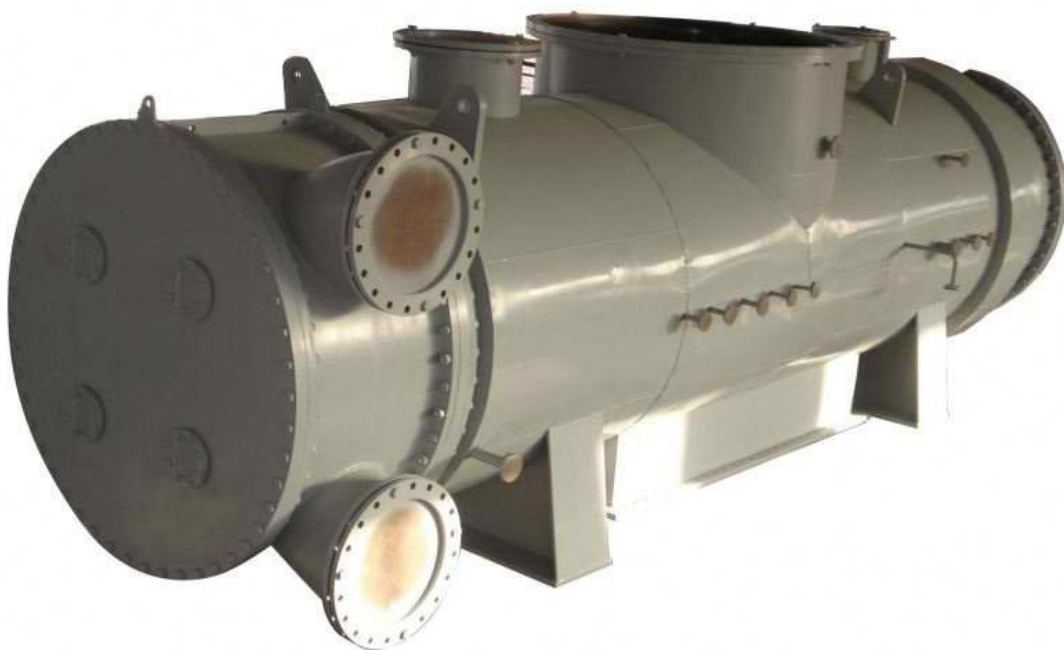


Εικόνα 33: Στρόβιλος διπλής ροής (Steam turbine double flow).

5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ

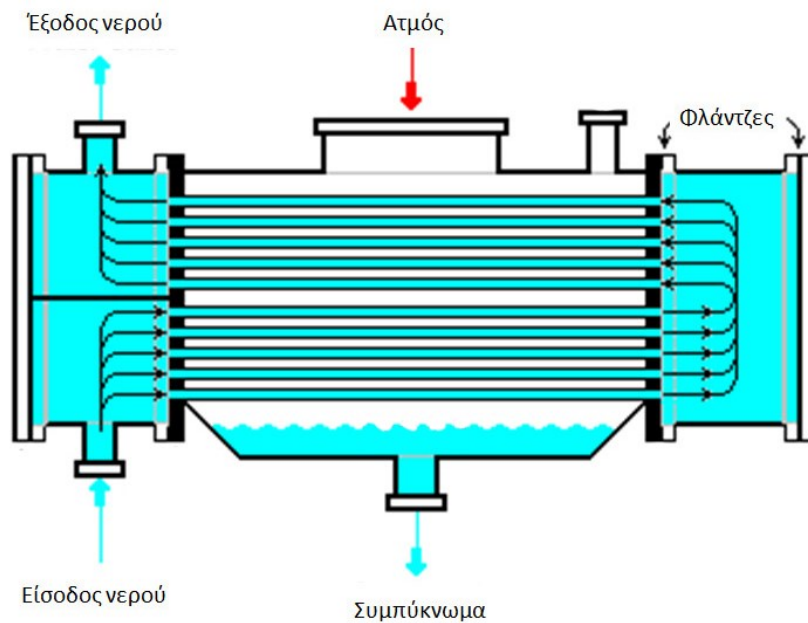
5.1 ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

Ο συμπυκνωτής είναι ένα δοχείο που χρησιμοποιείται για την ψύξη του εργαζόμενου μέσου. Είναι ένας εναλλάκτης που βρίσκεται ανάμεσα στο στρόβιλο και τον ατμοπαραγωγό. Έτσι μόλις το εργαζόμενο μέσο εκτονωθεί στο στρόβιλο πηγαίνει στο συμπυκνωτή όπου αφαιρείται θερμότητα και υγροποιείται του και στη συνέχεια στον ατμολέβητα με την βοήθεια της αντλίας. Αυτή η αφαίρεση θερμότητας γίνεται όταν το εργαζόμενο μέσο συναντά ένα πιο ψυχρό ρευστό στις σωληνώσεις που υπάρχουν στο εσωτερικό του συμπυκνωτή. Το ψυχρό ρευστό συνήθως ανατροφοδοτείται για δυο σημαντικούς λόγους. Ο πρώτος είναι ότι το νερό που χρησιμοποιείται έχει υποστεί επεξεργασία και θα ήταν τελείως ασύμφορο (οικονομικά και τεχνικά) να εισάγεται συνέχεια καινούριο και να επεξεργάζεται. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι κατά την συμπύκνωση δημιουργείται μια υποπίεση που είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για την απόδοση έργου από το στρόβιλο. Στην Εικόνα 34 φαίνεται ένας συμπυκνωτής της SINOMECC.



Εικόνα 34: Συμπυκνωτής της εταιρίας SINOMECC.

Αν και φαίνεται μια απλή κατασκευή, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή για να μπορεί να αποδώσει στο μέγιστο. Στην Εικόνα 35 φαίνεται το εσωτερικό ενός συμπυκνωτή καθώς και η αρχή λειτουργίας του.



Εικόνα 35: Ο τρόπος λειτουργίας ενός συμπυκνωτή.

Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται είναι τα εξής:

- Κύριο συμπυκνωτή
- Αντλίες ψυκτικού νερού ή ανεμιστήρες ψυκτικού αέρα
- Αντλίες συμπυκνώματος
- Συσσκευές αναρρόφησης του αέρα και δημιουργίας κενού
- Σωλήνες, βαλβίδες

5.1.1 Είδη συμπυκνωτών

Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σε ένα συμπυκνωτή συνήθως είναι το νερό και ο αέρας. Η επιλογή που θα γίνει είναι ανάλογα με τα αποτελέσματα που επιθυμούνται αλλά και από την υπάρχουσα εγκατάσταση. Μια πιο αναλυτική περιγραφή φαίνεται παρακάτω.

• Χρήση του νερού ως ψυκτικό μέσο.

Το νερό χρησιμοποιείται στους περισσότερους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς επειδή μπορεί να απορροφήσει περισσότερη θερμότητα από τον αέρα. Το μειονέκτημα του είναι ότι απαιτείται μια κοντινή πηγή νερού. Αυτή η πηγή μπορεί να είναι η θάλασσα (χρειάζεται ιδιαίτερη επεξεργασία), μια λίμνη, το έδαφος κ.τ.λ. Γενικά το ψυκτικό μέσο πρέπει να είναι σε μεγάλες ποσότητες ώστε να τροφοδοτεί το

συμπυκνωτή συνέχεια. Στην Εικόνα 36 φαίνεται ένα συμπυκνωτής ατμού με χρήση νερού ως ψυκτικό μέσο.



Εικόνα 36: Πλήρης εγκατάσταση ενός συμπυκνωτή.

- Χρήση του αέρα ως ψυκτικό μέσο.

Από την άλλη η ψύξη με αέρα δεν απαιτεί να υπάρχει κάποια πηγή. Με την χρήση του αέρα δεν μπορούν να απορροφηθούν μεγάλα ποσά θερμότητας λόγω της φύσης του (γι' αυτό χρησιμοποιείται κάποια ποσότητα νερού). Τέλος υπάρχουν τα συστήματα άμεσης (χρησιμοποιείται μόνο αέρας) και έμμεσης συμπύκνωσης (χρησιμοποιείται και ψεκασμένο νερό).

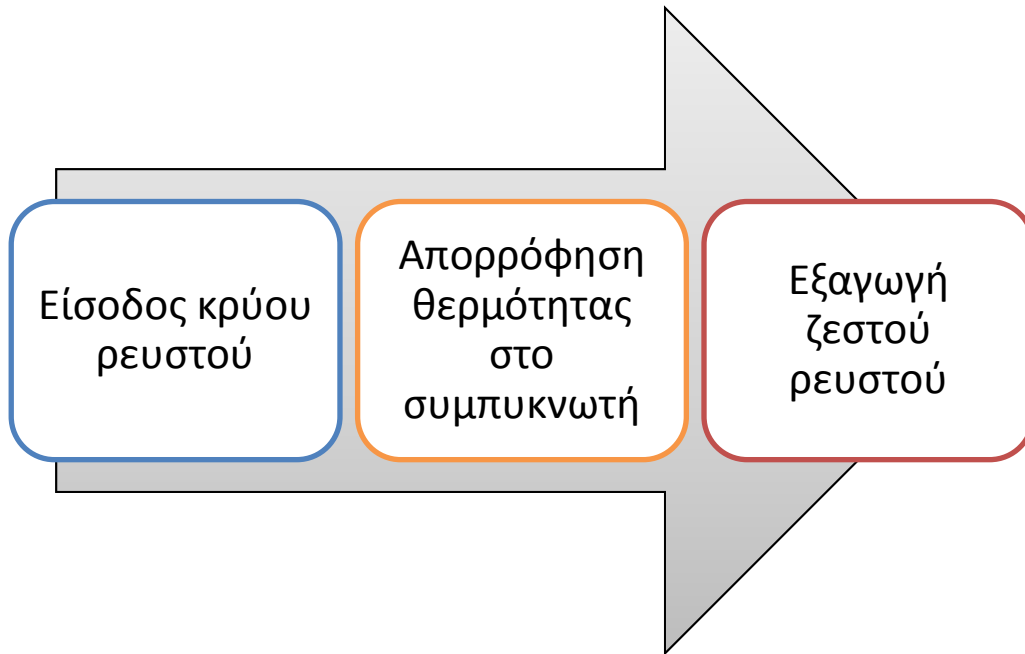
5.2 ΑΝΟΙΧΤΟ ΚΑΙ ΚΛΕΙΣΤΟ ΨΥΚΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ένας από τους σημαντικότερους διαχωρισμούς που μπορεί να γίνει είναι η αναφορά για ένα ανοιχτό ή κλειστό ψυκτικό σύστημα.

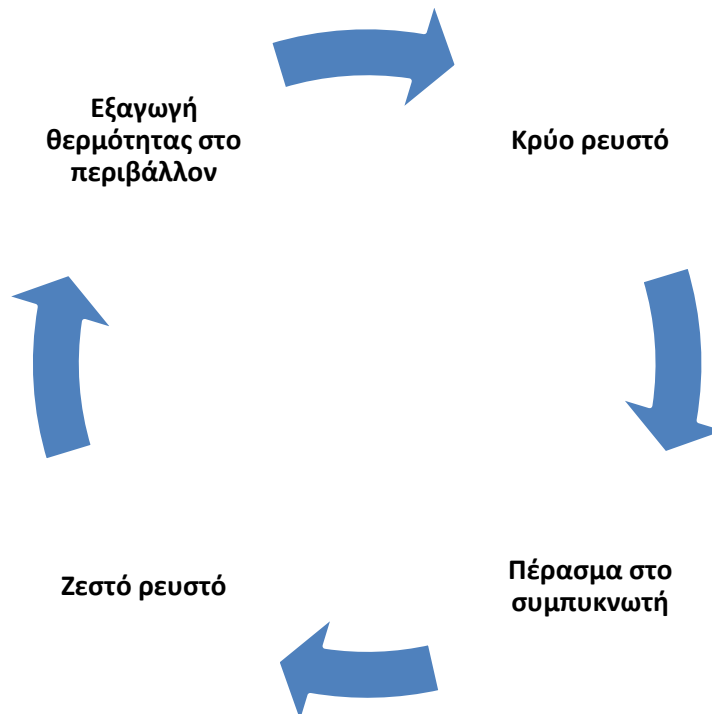
Στο ανοιχτό ψυκτικό σύστημα γίνεται απομάκρυνση της θερμότητας με την συνεχή εισροή ρευστού από το εξωτερικό περιβάλλον. Δηλαδή θα πρέπει να υπάρχει κοντά μια λίμνη, ένα ποτάμι κ.τ.λ. με χαμηλότερη θερμοκρασία ώστε να απομακρυνθεί η θερμότητα. Εδώ ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η αδρανειακή συμπεριφορά στη μεταβολή της θερμοκρασίας. Δηλαδή η χρησιμοποίηση νερού από την θάλασσα έχει σταθερότερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος.

Στο κλειστό ψυκτικό σύστημα δεν χρειάζεται η συνεχή ανανέωση του συστήματος με νερό παρά μόνο η συμπλήρωση όποτε απαιτείται. Εδώ υπάρχουν οι υγροί πύργοι ψύξης και τα αεροψυγεία. Στους υγρούς πύργους ψύξης χρησιμοποιείται ψεκασμένο νερό και με την χρήση αέρα η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον. Στα αεροψυγεία από την άλλη η αποβολή της θερμότητας γίνεται αποκλειστικά με τον αέρα.

Στην Εικόνα 37 φαίνεται το ανοιχτό σύστημα ψύξης ενώ στην Εικόνα 38 το κλειστό.



Εικόνα 37: Ανοιχτό σύστημα ψύξης.

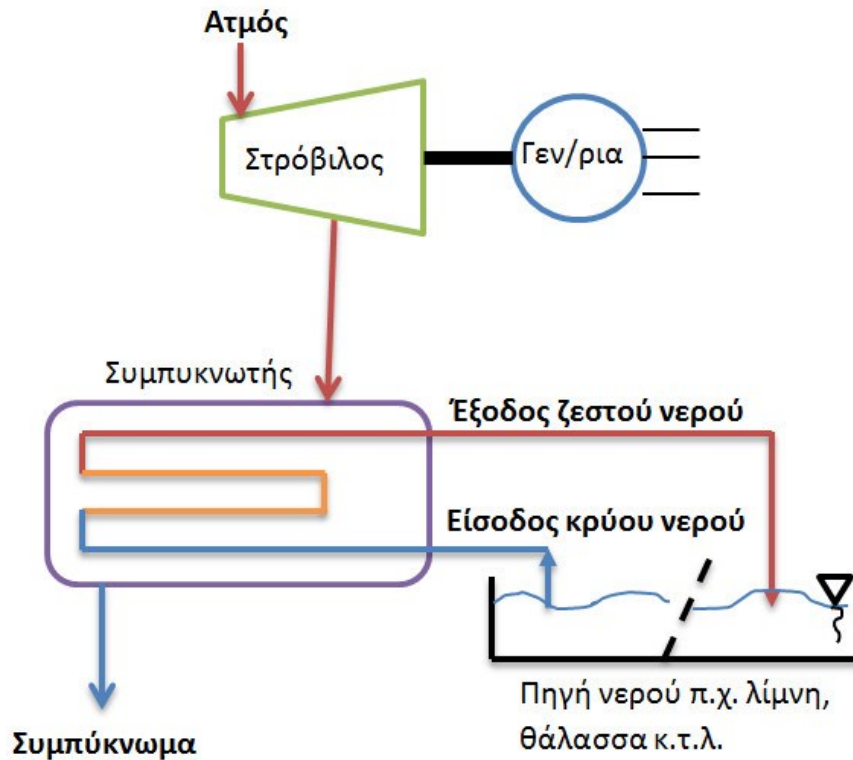


Εικόνα 38: Κλειστό σύστημα ψύξης.

5.2.1 Παρουσίαση ανοιχτών συστημάτων

Στο ανοιχτό κύκλωμα ψύξης το ψυκτικό μέσο εξάγεται στο περιβάλλον χωρίς να επαναφερθεί στο σύστημα. Παρακάτω θα αναλυθεί ένα σύστημα ψύξης με νερό ποταμού ή θάλασσας καθώς και με ένα πύργο ψύξης.

Σε ένα σύστημα χωρίς πύργο ψύξης ο ατμός που εξέρχεται από το στρόβιλο πηγαίνει στο συμπυκνωτή όπου ψύχεται και μετατρέπεται σε θερμό νερό. Στο συμπυκνωτή το νερό ψύξης που εισάγεται από μια πηγή, περνά από τις σωληνώσεις του συμπυκνωτή απορροφώντας θερμότητα και ξανά εξάγεται στην πηγή. Στη παρακάτω Εικόνα φαίνονται τα προαναφερόμενα.

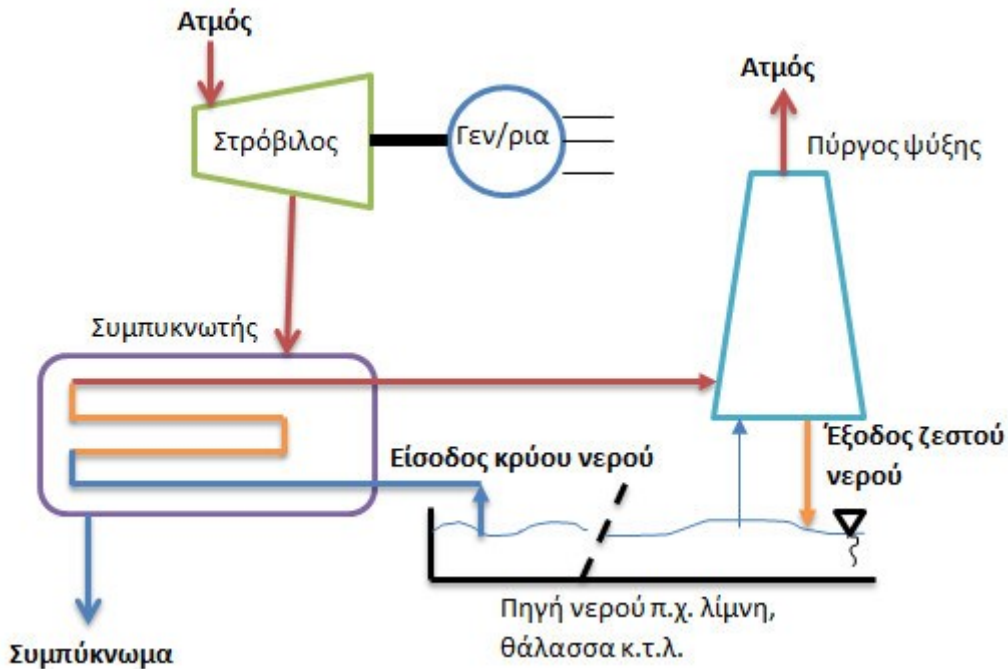


Εικόνα 39: Ψύξη με νερό από λίμνη κ.τ.λ.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το ψυκτικό νερό δέχεται μία επεξεργασία πριν μπει στο συμπυκνωτή για να μην γίνεται συγκέντρωση αλάτων και διάβρωση. Αν προέρχεται από τη θάλασσα η επεξεργασία είναι απαραίτητη γιατί θα συσσωρεύονται γρήγορα πολλά άλατα.

Το θετικό είναι ότι δεν είναι περίπλοκες κατασκευές που αυξάνουν το κόστος κατασκευής και συντηρήσεων. Βεβαίως τα πλεονεκτήματα μερικές φορές δεν ισοσταθμίζουν τα μειονεκτήματα στα οποία συγκαταλέγεται ότι πρέπει να υπάρχει μια μόνιμη και επαρκής πηγή. Επίσης οι περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις που υπάρχουν καθορίζουν και μια τέτοια επιλογή.

Στην ίδια εγκατάσταση μπορεί να μπει και ένας πύργος ψύξης που τοποθετείται μετά το συμπυκνωτή. Στο πύργο ψύξης η θερμότητα που έχει απομείνει μετά το συμπυκνωτή εξάγεται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην Εικόνα 40 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα.



Εικόνα 40: Ψύξη με νερό από λίμνη, θάλασσα κ.τ.λ. έχοντας και ένα πύργο ψύξης.

5.2.2 Παρουσίαση κλειστών συστημάτων

Εδώ υπάρχουν οι υγροί πύργοι ψύξης καθώς και τα αεροψυγεία. Κάθε ένα έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές περιπτώσεις.

Οι υγροί πύργοι ψύξης έχουν συνήθως κυκλικό σχήμα ώστε να μην δημιουργούνται στροβιλισμοί κατά την έξοδο του ατμού αλλά και για στατικούς λόγους. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: Ο ατμός που εξάγεται από το στρόβιλο πηγαίνει πρώτα σε ένα συμπυκνωτή αποβάλλοντας ένα μεγάλο ποσό θερμότητας. Στη συνέχεια πηγαίνει στο υγρό πύργο ψύξης όπου υπάρχουν σωληνώσεις που κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο. Έτσι πάνω σε αυτές τις σωληνώσεις ψεκάζεται νερό ατμοποιώντας το με αποτέλεσμα να διαφεύγει μια επιπλέον ποσότητα θερμότητας. Ο ατμός που δημιουργείται διαφεύγει στο περιβάλλον φυσικά (φυσικός ελκυσμός) ή με εξαναγκασμένη ροή (με ανεμιστήρα).

Η επιλογή στο αν θα χρησιμοποιηθεί φυσική ή εξαναγκασμένη ροή εξαρτάται από την μελέτη που έχει γίνει. Για φυσικό ελκυσμό η εγκατάσταση καταλαμβάνει περισσότερο χώρο (π.χ. διάμετρος 60 m και ύψος 100 m) και είναι κατάλληλοι για χώρες με εύκρατο κλίμα. Ενώ για εξαναγκασμένη ροή απαιτείται ενέργεια.

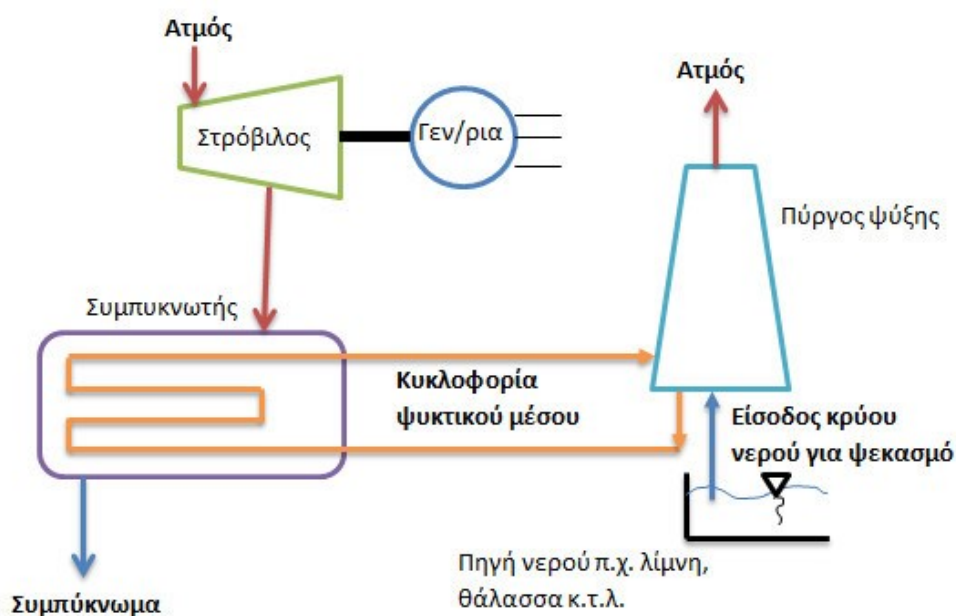
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πύργου είναι fiberglass (το περίβλημα), πλαστικό (το πληρωτικό υλικό) και ανοξείδωτο χάλυβα (τα στηρίγματα).

Οι ατμοί που εξάγονται ένα μέρος τους χάνεται στο περιβάλλον ενώ το υπόλοιπο πέφτει σε μορφή βροχής. Οι σύγχρονες μελέτες έχουν αποδείξει ότι δεν επηρεάζεται το τοπικό κλίμα από τους πύργους ψύξης.

Στην Εικόνα 41 φαίνεται ένας υγρός πύργος ψύξης ενώ στην Εικόνα 42 ο τρόπος λειτουργίας του.



Εικόνα 41: Υγροί πύργοι ψύξης.



Εικόνα 42: Λειτουργία κλειστού ψυκτικού συστήματος με υγρό πύργο ψύξης.

Τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρει είναι ότι δεν υπάρχει θερμική φόρτιση (μεγαλύτερη αποβολή θερμότητας) και μεγάλη εξάρτηση από μια μεγάλη πηγή νερού. Επίσης ο ατμός επιστρέφει στο περιβάλλον στη “σωστή” θερμοκρασία διάμεσου της βροχής και έτσι δεν υπάρχει περιβαλλοντική καταστροφή.

Στα μειονεκτήματα του συγκαταλέγεται το υψηλό κόστος κατασκευής αλλά και συντήρησης. Επίσης η διάβρωση που υφίσταται αποτελεί και αυτό ένα πρόβλημα.

Τα αεροσυγεία από την άλλη λειτουργούν με ένα ανεμιστήρα που δημιουργεί μια ροή αέρα. Ο αέρας περνά από σωληνώσεις που βρίσκεται το μέσο και αποβάλλει την θερμότητα του στο περιβάλλον. Ένα σημαντικό στοιχείο που πλεονεκτεί είναι ότι

μας δίνει ανεξαρτησία στην κατασκευή. Στην Εικόνα 46 φαίνεται ένα σύστημα αεροψυγείων.

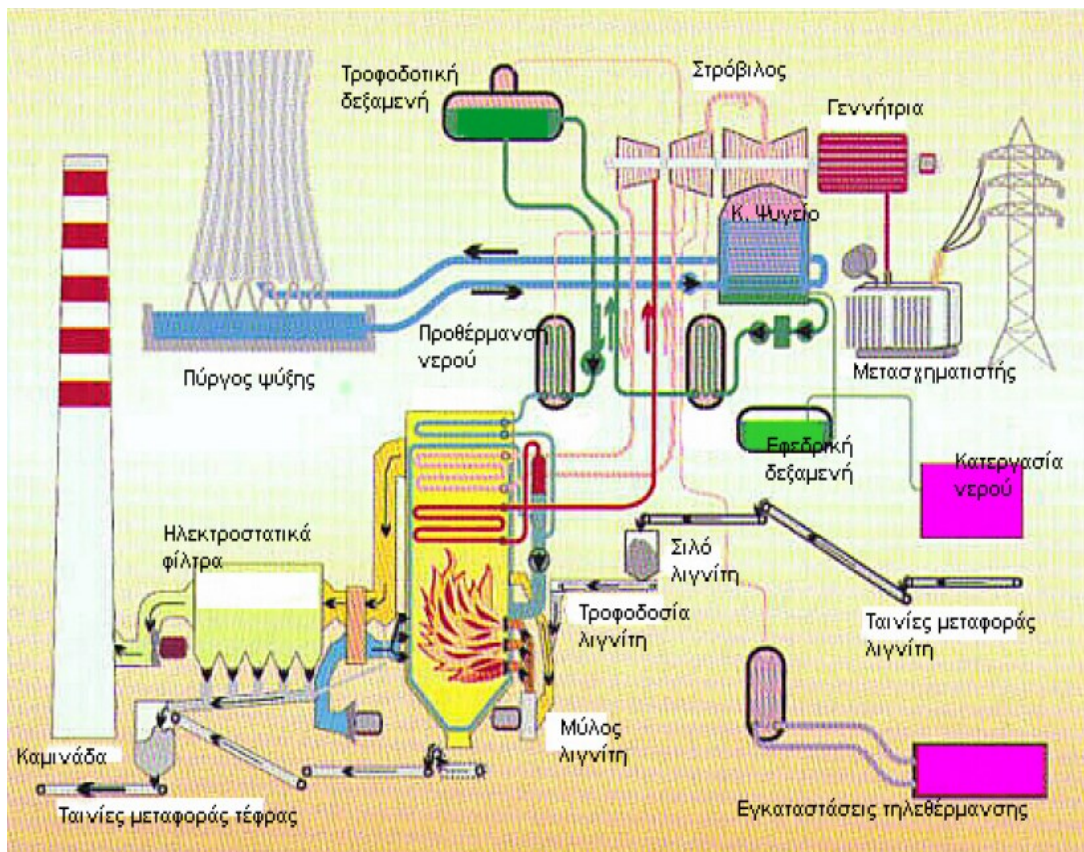


Εικόνα 46: Ένα σύστημα αεροψυγείων.

6. ΛΟΙΠΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για την σωστή λειτουργία μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει ένα πλήθος άλλων μηχανημάτων που εξυπηρετούν αυτό το σκοπό. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα από αυτά. Η Εικόνα 47 δείχνει έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό με καύση λιγνίτη σε σκόνη.



Εικόνα 47: Ατμοηλεκτρικό σταθμό με καύση λιγνίτη σε σκόνη

Κύριος μετασχηματιστής.

Ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Ο σκοπός του κύριου μετασχηματιστή (στην περίπτωση μας) είναι να ανυψώσει την τάση που παράγεται από την γεννήτρια, στην επιθυμητή τάση δηλ. του δικτύου. Στην Εικόνα 48 φαίνεται ένας μετασχηματιστής.



Εικόνα 48: Μετασχηματιστής.

Ηλεκτροστατικό φίλτρο.

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα βασίζουν την λειτουργία τους στην ηλεκτρική φόρτιση των σωματιδίων της τέφρας. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: Το πλέγμα που διαρρέεται από τάση 40-85 kV δημιουργεί στη τέφρα ηλεκτρική φόρτιση με αποτέλεσμα να κολλήσει πάνω του. Έτσι με μια ειδική διάταξη σφυριών χτυπιέται το πλέγμα και με την χρήση αέρα απομακρύνεται η τέφρα σε ένα σιλό. Αφού φτάσει στο σιλό μεταφέρεται με ταινιόδρομους σε ειδικούς χώρους απόθεσης (ανάπλαση του εδάφους).



Εικόνα 49: Ηλεκτροστατικό φίλτρο.

Η γεννήτρια.

Η γεννήτρια είναι ένα από τα σημαντικότερα τμήματα μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας λόγω του ότι παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Ο άξονα της είναι μεγάλος σε μήκος και διάμετρο και ο αριθμός των πόλων της είναι συνήθως δυο. Στην Εικόνα 50 φαίνεται η γεννήτρια του ΑΗΣ Λαυρίου.



Εικόνα 50: Γεννήτρια ΑΗΣ Λαυρίου.

Εξαρτήματα

Βέβαια σε μία ατμοηλεκτρική μονάδα υπάρχουν χιλιάδες εξαρτήματα που βοηθούν στην σωστή λειτουργία του . Από μανόμετρα, ρυθμιστές πίεσης, αντλίες, βάνες, συστήματα αυτοματισμού κ.τ.λ. Από αυτά μερικά είναι διπλά ώστε σε περίπτωση βλάβης να υπάρχει και εφεδρικό σύστημα.

7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

7.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για τον υπολογισμό των εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων του ατμολέβητα, τα δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη είναι τα εξής:

Γενικά	
Ισχύ γεννήτριας :	$W_{\text{γεν.}} = 30\text{MW}$
Απώλειες λόγω αγωγιμότητας σε κάθε τμήμα του λέβητα:	$x_c = 2,5 \%$
Καύσιμο:	Λιγνίτης σε σκόνη
Περίσσια αέρα καύσης:	$\lambda = 1,20$
Ξήρανση λιγνίτη σε ποσοστό υγρασίας:	$w_2 = 7 \%$
Η θερμότητα που αποδίδει το CO όταν καίγεται προς CO ₂ :	$q_{\text{CO}} = 3040 \text{ Kcal/Nm}^3$
Παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα κατά την καύση με τιμή CO ₂ :	$p = 0,5\%$
Ύψος καπνοδόχου:	$h_o = 55 \text{ m}$
Ταχύτητα καπναερίων στην έξοδο από την καπνοδόχο:	$u = 11 \text{ m/s}$
Συντελεστής ακτινοβολίας φλόγας:	$C = 4 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{°K})^4$

Θερμοκρασίες	
Θερμοκρασία υπέρθερμου ατμού:	$T_5 = 480\text{°C}$
Θερμοκρασία περιβάλλοντος:	$T_1 = 20\text{°C}$
Τελική θερμοκρασία ύδατος μετά τον προθερμαντήρα:	$T_o = 177\text{°C}$

Θερμοκρασία προθερμάνσεως αέρα:	$T_h = 220 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία αντοχής του χάλυβα στον υπερθερμαντήρα:	$T_{\text{αντ.χάλ.}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$
Πτώση της θερμοκρασίας κατά ύψος της καπνοδόχου:	$\Delta T = 0,3 \text{ }^\circ\text{C/m}$

Ειδική φόρτιση	
Ειδική φόρτιση του φλογοθαλάμου ανά μονάδα όγκου:	$q_f = 0,2 \cdot 10^6 \text{ Kcal/m}^3 \cdot \text{h}$
Ειδική φόρτιση του φλογοθαλάμου ανά μονάδα επιφάνειας οριζοντίου διατομής:	$q_F = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h}$

Πιέσεις	
Πίεση υπέρθερμου ατμού:	$P_\sigma = 80 \text{ atü}$
Πίεση στην επιστροφή του νερού στο λέβητα:	$P_1 = 1 \text{ bar}$

Ειδική θερμότητα	
Ειδική θερμότητα αέρα καύσεως στην θερμοκρασία προθερμάνσεως:	$c_{ph} = 0,315 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδική θερμότητα καπναερίων λιγνίτη στην θερμοκρασία φλογοθαλάμου:	$c_p = 0,37 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$
Μέση ειδική θερμότητα καπναερίων εντός του υπερθερμαντήρα ατμού:	$c_{pm} = 0,36 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδική θερμότητα των καπναερίων στο τελικό τμήμα:	$c_{pm} = 0,35 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδική θερμότητα των καπναερίων στον προθερμαντήρα νερού:	$c_{pm} = 0,34 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$

Συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας	
Συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας για το αρχικό τμήμα με επιφάνεια F_1 :	$K = 32 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$.
Συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας για τον υπερθερμαντήρα με επιφάνεια F_u :	$K = 25 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$.
Συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας για το τελικό τμήμα με επιφάνεια F_2 :	$K = 30 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$.
Συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας για τον προθερμαντήρα με επιφάνεια F_{π} :	$K = 18 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$.

7.2 ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ –ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ ΑΕΡΑ

1. Στοιχειομετρική σύσταση καυσίμου

Αφού ο λιγνίτης είναι το καύσιμο που χρησιμοποιεί ο ατμολέβητας θα πρέπει να υπολογιστεί η θερμογόνος δύναμη του. Αυτή θα βρεθεί από την παρακάτω σύσταση που έχει παρθεί από τη βιβλιογραφία [4].

Συστατικό	Σύμβολο	Ποσοστό [%]
Άνθρακας	c1	34,0
Υδρογόνο	h1	2,9
Οξυγόνο	o1	8,0
Άζωτο	n1	0,5
Θείο	s1	1,1
Τέφρα	A1	8,5
Υγρασία	w1	45,0
	Σύνολο	100%

Πίνακας 3: Σύσταση λιγνίτη από την Ελλαδική περιοχή.

2. Υπολογισμός συντελεστή ξήρανσης

Αν και δεν αναφέρεται, ο λιγνίτης που θα χρησιμοποιηθεί θα υποστεί μία ξήρανση για να αυξηθεί η θερμογόνος δύναμη του και να μην βγουν μεγάλα τα αριθμητικά νούμερα του ατμολέβητα. Έτσι από 45 % υγρασία θα φτάσει στο 7% (το 7% είναι ένα φυσιολογικό ποσοστό). Οπότε υπολογίζοντας το συντελεστή ξήρανσης μπορεί να βρεθεί η νέα σύσταση που θα έχει ο λιγνίτης μετά την ξήρανση.

$$f = \frac{100 - w_2}{100 - w_1} = \frac{100 - 7}{100 - 45} = 1,6909$$

3. Σύσταση ξηραμένου λιγνίτη

Για την εύρεση των νέων περιεκτικοτήτων θα πολλαπλασιαστούν τα συστατικά με το συντελεστή ξήρανσης, οπότε είναι:

Συστατικό		Ποσοστό [%]	Αριθμητικά
Άνθρακας	$c_2 = c_1 \cdot f = 34,0 \cdot 1,6909$	57,49	0,5749
Υδρογόνο	$h_2 = h_1 \cdot f = 2,9 \cdot 1,6909$	4,90	0,0490
Οξυγόνο	$o_2 = o_1 \cdot f = 8,0 \cdot 1,6909$	13,53	0,1353
Άζωτο	$n_2 = n_1 \cdot f = 0,5 \cdot 1,6909$	0,85	0,0085
Θείο	$s_2 = s_1 \cdot f = 1,1 \cdot 1,6909$	1,86	0,0186
Τέφρα	$A_2 = A_1 \cdot f = 8,5 \cdot 1,6909$	14,37	0,1437
Υγρασία	w_2	7,00	0,0700
	Σύνολο	100%	1

Πίνακας 4: Σύσταση λιγνίτη μετά την ξήρανση

4. Θερμογόνος δύναμη ξηραμένου λιγνίτη

Επόμενο βήμα είναι να βρεθεί η θερμογόνος δύναμη του ξηραμένου λιγνίτη. Ο υπολογισμός της θα γίνει με τον παρακάτω τύπο:

$$Hu = 8130 \cdot c + 24300 \cdot h + 1500 \cdot n + 4560 \cdot s - 2350 \cdot o - 600 \cdot w$$

Αντικαθιστώντας:

$$\begin{aligned} Hu_2 &= 8130 \cdot c_2 + 24300 \cdot h_2 + 1500 \cdot n_2 + 4560 \cdot s_2 - 2350 \cdot o_2 - 600 \cdot w_2 = \\ &= 8130 \cdot 0,5749 + 24300 \cdot 0,0490 + 1500 \cdot 0,0085 + 4560 \cdot 0,0186 - 2350 \cdot 0,1437 - \\ &600 \cdot 0,07 = 5582,51 \rightarrow \mathbf{Hu_2 = 5582 \text{ Kcal/Kg}} \end{aligned}$$

5. Ελάχιστη ποσότητα αέρα καύσης

Για την ελάχιστη ποσότητα του αέρα καύσης χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος.

$$\begin{aligned} L_o &= 8,89 \cdot c_2 + 26,7 \cdot \left(h_2 - \frac{o_2}{8} \right) + 3,33 \cdot s_2 = \\ &= 8,89 \cdot 0,5749 + 26,7 \cdot \left(0,0490 - \frac{0,1437}{8} \right) + 3,33 \cdot 0,0186 = \mathbf{6,00 \frac{Nm^3}{Kg}} \end{aligned}$$

6. Ποσότητα ξηρών καπναερίων

Τα καπναέρια χωρίς την υγρασία υπό μορφή υδρατμών ονομάζονται ξηρά καπναέρια. Στην μελέτη μας είναι

$$\begin{aligned}V_{ir} &= 8,89 \cdot c_2 + 21,1 \cdot \left(h_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 3,33 \cdot s_2 + 0,796 \cdot n_2 = \\ &= 8,89 \cdot 0,5749 + 21,1 \cdot \left(0,049 - \frac{0,1353}{8} \right) + 3,33 \cdot 0,0186 + 0,796 \cdot 0,0085 = \mathbf{5,86} \frac{\mathbf{Nm}^3}{\mathbf{Kg}}\end{aligned}$$

7. Ποσότητα υγρών καπναερίων

Με τον όρο ποσότητα ξηρών καπναερίων εννοούνται τα καπναέρια χωρίς την υγρασία υπό μορφή υδρατμών. Αντίστοιχα τα καπναέρια με την υγρασία (υπό μορφή υδρατμών) ονομάζονται υγρά και υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}V_o &= 8,89 \cdot c_2 + 32,29 \cdot h_2 - 21,1 \frac{O_2}{8} + 3,33 \cdot s_2 + 0,796 \cdot n_2 + 1,244 \cdot w_2 = \\ &= 8,89 \cdot 0,5749 + 32,29 \cdot 0,0490 - 21,1 \frac{0,1353}{8} + 3,33 \cdot 0,0186 + 0,796 \cdot 0,0085 + \\ &1,244 \cdot 0,0700 = \mathbf{6,50} \frac{\mathbf{Nm}^3}{\mathbf{Kg}}\end{aligned}$$

8. Περίσσεια αέρα καύσης

Η περίσσεια του αέρα είναι ένα άλλο σημαντικό στοιχείο. Όταν πραγματοποιείται μία πλήρη καύση ο αέρας με το καύσιμο αναμιγνύονται πλήρως δηλ. κάθε μόριο καυσίμου έρχεται σε επαφή με κάθε μόριο οξυγόνου και ενώνονται. Αυτό όμως λόγω του ότι είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί πρακτικά εισάγεται περισσότερος αέρας στο χώρο καύσης από αυτό του θεωρητικού απαιτούμενου στοιχειομετρικού για να υπάρξει πλήρη καύση. Η λιγότερη ποσότητα αέρα αποφεύγεται γιατί παράγεται διοξείδιο του άνθρακα απάγοντας άκαυστο καύσιμο υπό μορφή αιθάλης κ.τ.λ. Από ασκήσεις παρατηρήθηκε ότι η περίσσεια του αέρα για ατμολέβητα λιγνίτη ήταν κάπου στο 20 % δηλ. ο συντελεστής Λάμδα είναι $\lambda=1,20$. Οπότε και αυτός θα χρησιμοποιηθεί.

9. Ποσότητα πραγματικών υγρών καπναερίων (με περίσσεια αέρα)

Η ποσότητα των πραγματικών καπναερίων τα οποία περιλαμβάνουν και την περίσσεια του αέρα καύσης, υπολογίζονται από τον τύπο:

$$V_R = V_o + (\lambda - 1) \cdot L_o = 6,50 + (1,20 - 1) \cdot 6,00 = 7,70 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}}$$

7.3 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

1. Μετατροπή σχετικής πίεσης σε απόλυτη

Επειδή θα χρειαστεί η απόλυτη πίεση στους υπολογισμούς θα πρέπει να μετατραπεί. Η μετατροπή της σχετικής σε απόλυτη γίνεται προσθέτοντας μια μονάδα που αντιστοιχεί στη πίεση του περιβάλλοντος. Δηλαδή:

Σχετική πίεση : $P_\sigma = 80 \text{ atü}$

Απόλυτη πίεση : $P = 80 \text{ atü} + 1 = 81 \text{ bar}$

2. Θερμοδυναμικά μεγέθη

Για το υπολογισμό των θερμοδυναμικών μεγεθών στο κύκλο Rankine ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 1 πιο κάτω σε κάθε σημείο χρησιμοποιήθηκε για συντομία το λογισμικό WinSteam 4.0 από το <http://www.techwareeng.com/ProdWS.html>. Έτσι τοποθετώντας δυο γνωστά δεδομένα μας βρίσκει τα υπόλοιπα, ήτοι:

Για το Σημείο 1

Γνωστά δεδομένα	
Πίεση	$P_1 = 1 \text{ bar}$
Θερμοκρασία	$T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Υπολογισθέντα δεδομένα	
Ειδικός όγκος	$\tilde{v}_1 = 0,0010 \text{ m}^3/\text{Kg}$ $\approx 1,00 \text{ dcm}^3/\text{Kg}$
Ενθαλπία	$h_1 = 419,1 \text{ KJ/Kg}$
Εντροπία	$s_1 = 1,3071 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$

Σημείωση: Η μετατροπή από m^3/Kg σε dcm^3/Kg γίνεται πολλαπλασιάζοντας με το 1000.

Για το Σημείο 2

Γνωστά δεδομένα	
Πίεση	$P_2 = 81 \text{ bar}$
Εντροπία	$s_2 = s_1 = 1,3071 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$

Υπολογισθέντα δεδομένα	
Θερμοκρασία	$T_2 = 100,6 \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδικός όγκος	$\tilde{v}_2 = 0,0010 \text{ m}^3/\text{Kg}$ $\approx 1,00 \text{ dcm}^3/\text{Kg}$
Ενθαλπία	$h_2 = 427,4 \text{ KJ/Kg}$

Για το Σημείο 3

Γνωστά δεδομένα	
Πίεση	$P_3 = 81 \text{ bar}$

Το Σημείο 3 βρίσκεται πάνω στην καμπύλη κορεσμένου νερού. Οπότε εύκολα βρίσκονται και τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά.

Υπολογισθέντα δεδομένα	
Θερμοκρασία	$T_3 = 296 \text{ }^\circ\text{C}$
Ειδικός όγκος	$\tilde{v}_3 = 0,0014 \text{ m}^3/\text{Kg}$ $\approx 1,40 \text{ dcm}^3/\text{Kg}$
Ενθαλπία	$h_3 = 1321,8 \text{ KJ/Kg}$
Εντροπία	$s_3 = 3,216 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$

Για το Σημείο 4

Γνωστά δεδομένα	
Πίεση	$P_4 = 81 \text{ bar}$
Θερμοκρασία	$T_4 = 296 \text{ }^\circ\text{C}$

Υπολογισθέντα δεδομένα	
Ειδικός όγκος	$\tilde{v}_4 = 0,0232 \text{ m}^3/\text{Kg}$ $\approx 23,2 \text{ dcm}^3/\text{Kg}$
Ενθαλπία	$h_4 = 2759,4 \text{ KJ/Kg}$
Εντροπία	$s_4 = 5,732/\text{Kg}^\circ\text{K}$

Για το Σημείο 5

Γνωστά δεδομένα	
Πίεση	$P_5 = 81 \text{ bar}$
Θερμοκρασία	$T_5 = 480 \text{ }^\circ\text{C}$

Υπολογισθέντα δεδομένα	
Ειδικός όγκος	$\tilde{v}_5 = 0,0398 \text{ m}^3/\text{Kg}$ $\approx 39,8 \text{ dcm}^3/\text{Kg}$
Ενθαλπία	$h_5 = 3348,3 \text{ KJ/Kg}$
Εντροπία	$s_5 = 6,655 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$

Για το Σημείο 5 θα χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά και οι Πίνακες από την βιβλιογραφία [5] για επαλήθευση της ενθαλπίας και θα γίνει γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό της ενθαλπίας του Σημείου 5, ήτοι :

		1	2
	Θερμοκρασία [°C]	Πίεση [bar]	Ενθαλπία [KJ/Kg]
x	480	80	3347
y	480	90	3334

Ο γενικός τύπος της Γραμμικής Παρεμβολής είναι:

$$\frac{x_0 - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_0 - y_1}{y_2 - y_1}$$

Όπου $x_0=81 \text{ bar}$ και $y_0=h_5$

Αντικαθιστώντας γίνεται:

Σημείωση: Οι Πίνακες κορεσμένου και υπέρθερμου ατμού που θα χρησιμοποιηθούν στη μελέτη μας είναι από το Βιβλίο 5 στη βιβλιογραφία.

$$\frac{81-80}{90-80} = \frac{h_5-3347}{3334-3347} \Rightarrow h_5 = 3345,7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Η τιμή που βρέθηκε είναι περίπου ίδια με αυτή που έδωσε το λογισμικό WinSteam 4.0 , ήτοι $h_5= 3348,3 \text{ KJ/Kg}$.

Για το Σημείο 6

Γνωστά δεδομένα	
Πίεση	$P_6= 1 \text{ bar}$
Θερμοκρασία	$T_6= 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Εντροπία	$s_6= s_5= 6,655\text{KJ/Kg}^\circ\text{K}$

Υπολογισθέντα δεδομένα	
Ειδικός όγκος	$\tilde{v}_6= 1,4968 \text{ m}^3/\text{Kg}$ $\approx 1496,8 \text{ dcm}^3/\text{Kg}$
Ενθαλπία	$h_6= 2412,7 \text{ KJ/Kg}$

3. Θερμότητα για παραγωγή 1 kg ατμού

Η διαφορά ενθαλπίας Δh δείχνει τη θερμότητα που απαιτείται για να παραχθεί 1 Kg ατμός, δηλαδή:

$$\Delta h = h_5 - h_2$$

όπου: h_5 =η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού στην έξοδο του λέβητα.

h_2 =η ενθαλπία του νερού τροφοδοτήσεως στην είσοδο του λέβητα (μετά την αντλία)

Αντικαθιστώντας γίνεται: $\Delta h = h_5 - h_2 = 3348,3 - 427,4 = 2920,9 \text{ KJ/Kg}$

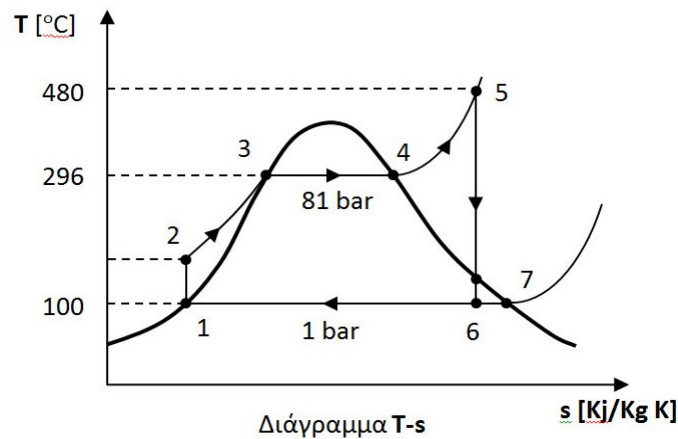
$\Delta h = 2920,9 / 4,187 = 697 \text{ Kcal/Kg}$

4. Σχεδίαση κύκλου Rankine

Για να σχεδιαστεί ο θερμοδυναμικός κύκλος Rankine θα ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα, ξεκινώντας από το κάτω αριστερό Σημείο 1, ως εξής:

- Ο ατμός που εκτονώνεται στο στρόβιλο και στην συνέχεια συμπυκνώνεται επιστρέφει στο λέβητα υπό ατμοσφαιρική πίεση 1 bar και θερμοκρασία 100 °C (Σημείο 1), όπως μας αναφέρουν τα δεδομένα.
- Στο Σημείο 2 η αντλία του τροφοδοτικού νερού ανεβάζει την πίεση του νερού στα 81 bar (Σημείο 2).
- Με την καύση στο λέβητα έχουμε σταδιακά:
 - α) Θέρμανση του νερού μέχρι την θερμοκρασία βρασμού (Σημείο 3).
 - β) Ατμοποίηση μέχρι τον κορεσμό (Σημείο 4).
 - γ) Υπερθέρμανση του ατμού μέχρι την θερμοκρασία $T=480^\circ\text{C}$ (Σημείο 5).
- Στην συνέχεια, στην περίπτωση του στρόβιλου έχουμε ισεντροπική εκτόνωση του ατμού μέχρι την πίεση 1 bar (Σημείο 6) και ακολουθείται συμπύκνωση αυτού στην πίεση 1 bar, μέχρι όπου μετατραπεί όλος ο ατμός σε θερμό νερό (Σημείο 1).

Ακολουθώντας τα παραπάνω γίνεται ο σχεδιασμός του διαγράμματος T-s όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 1: Ο κύκλος RANKINE

7.4 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ- ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΣ ΑΤΜΟΣ- ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

1. Συνολικός βαθμός απόδοσης του σταθμού

Ο βαθμός απόδοσης του σταθμού υπολογίζεται με το τύπο:

$$\eta_{στ.} = \frac{(h_5 - h_6) - (h_2 - h_1)}{h_5 - h_2}$$

Αντικαθιστώντας.

$$\eta_{στ.} = \frac{(h_5 - h_6) - (h_2 - h_1)}{h_5 - h_2} = \frac{(3348,3 - 2412,7) - (427,4 - 419,1)}{3348,3 - 427,4} = 0,31$$

Οπότε ο βαθμός απόδοσης είναι 31 %.

2. Υπολογισμός δείκτη f

Με τον δείκτη f θα υπολογιστεί η κατανάλωση του καυσίμου. Αποτελεί ένα από τους σημαντικότερους δείκτες αφού δείχνει πόση ενέργεια παράγεται σε σχέση με την κατανάλωση του καυσίμου που υπάρχει. Όπως είναι αντιληπτό όσο μεγαλύτερος είναι τόσο πιο πολύ ενέργεια μπορεί να παραχθεί. Ο τρόπος υπολογισμού του φαίνεται παρακάτω.

$$f = \frac{\eta \cdot H_{u2}}{860} = \frac{0,31 \cdot 5582 \frac{Kcal}{Kg}}{860} = 2,01 \frac{KWh}{Kg}$$

όπου: το 860 χρησιμοποιείται για την μετατροπή των μονάδων.

3. Κατανάλωση καυσίμου

Η κατανάλωση μας δείχνει πόση μάζα λιγνίτη καίγεται σε ένα χρονικό διάστημα. Ο υπολογισμός της μπορεί να γίνει μέσω του δείκτη f , όπως παρακάτω.

$$f = \frac{W_{\gamma\varepsilon\nu.}}{B} \rightarrow B = \frac{W_{\gamma\varepsilon\nu.}}{f} = \frac{30 \cdot 10^3 \text{ KW}}{2,01 \frac{\text{KWh}}{\text{Kg}}} \approx 15 \cdot 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = \mathbf{15 \frac{t}{h}}$$

4. Παραγόμενος ατμός από τον ατμολέβητα

Ο υπολογισμός του παραγόμενου ατμού θα γίνει με τον παρακάτω τύπο θεωρώντας ότι υπάρχει ιδανικός ατμοστρόβιλος.

$$D = \frac{W_{\sigma\tau.}}{(h_5 - h_6)}$$

Με μηδενικές απώλειες θεωρείται η παραγόμενη ισχύ από τον στρόβιλο μέχρι να φτάσει στη γεννήτρια. Οπότε αντικαθιστώντας στον παραπάνω τύπο βρίσκεται.

$$D = \frac{W_{\sigma\tau.}}{(h_5 - h_6)} = \frac{30 \cdot 10^3 \frac{\text{KJ}}{\text{sec}} \cdot 3600 \text{ sec}}{(3348,3 - 2412,7) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = 115434 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \approx \mathbf{115 \frac{t}{h}}$$

Σημείωση: 1 KW= 1 KJ/sec ή 1 MW= 10³ KJ/sec.

5. Συνολική προδιδόμενη θερμότητα στην εστία

Εκτός από την θερμότητα που παράγεται από το καύσιμο υπάρχει και η εισροή μίας μικρής θερμότητας (σε σχέση με την παραγόμενη) από την προθέρμανση του αέρα καύσεως σε μια εξωτερική μονάδα και έτσι θα πρέπει να υπολογιστεί η συνολική.

Η θερμότητα που μας δίνει ο προθερμαινόμενος αέρας στην εστία, βρίσκεται από τον τύπο:

$$q_{\pi} = L \cdot c_{ph} \cdot (T_h - T_l) = \lambda \cdot L_o \cdot c_{ph} \cdot (T_h - T_l) = 1,20 \cdot 6,00 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \cdot 0,42 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$(170 - 20)^\circ\text{C} = 453,6 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

- Ειδική θερμότητα αέρα καύσεως στην θερ/σία προθ/σεως: $c_{ph}=0,315\text{Kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$.
- Θερμοκρασία προθερμάνσεως αέρα: $T_{\text{προθ.}} = 220^\circ\text{C}$.

-Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_l = 20^\circ\text{C}$.

Και η συνολική θερμότητα είναι:

$$(H_{u2} + q_\pi) = (5582,0 + 453,6) \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} = 6036 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

6. Βαθμός απόδοσης ατμολέβητα

Ο βαθμός απόδοσης του ατμολέβητα θα επαληθευτεί στην πορεία των υπολογισμών. Έτσι για να προχωρήσει η μελέτη θα χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω τύπος.

$$\eta_{\text{ατμ.}} = \frac{D \cdot \Delta h}{(H_{u2} + q_\pi) \cdot B} = \frac{115 \frac{t}{h} \cdot 697 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}}{6036 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot 15 \frac{t}{h}} = 0,88$$

7.5 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ- ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα υπολογιστούν τα εσωτερικά τμήματα ενός ατμολέβητα. Η αρχή γίνεται από το φλογοθάλαμο, μετά στον υπερθερμαντήρα κ.τ.λ. ακολουθώντας την πορεία των καπναερίων από την αρχή (καύση) έως το τέλος (έξοδο ατμολέβητα).

1. Θερμότητα που απελευθερώνεται στον φλογοθάλαμο

Οι διαστάσεις του φλογοθαλάμου θα υπολογιστούν αφού πρώτα βρεθεί η απελευθερωμένη θερμότητα σε αυτόν. Έτσι η θερμότητα που υπάρχει στο φλογοθάλαμο είναι από την καύση του καύσιμου και από την εισροή του θερμαινόμενου αέρα. Οπότε βρίσκεται:

$$Q_f = B \cdot (H_{u2} + q_\pi) = 15000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot (5582 + 453,6) \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} = 90,53 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

2. Διαστάσεις φλογοθαλάμου

Οι διαστάσεις του φλογοθαλάμου θα βρεθούν με βάση την ειδική φόρτιση αυτού q_f ανά μονάδα όγκου και q_F ανά μονάδα επιφάνειας οριζόντιου διατομής.

Υπολογισμός όγκου φλογοθαλάμου

Ο όγκος του φλογοθαλάμου υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο.

$$V_f = \frac{Q_f}{q_f} = \frac{90,53 \cdot 10^6 \frac{Kcal}{h}}{0,2 \cdot 10^6 \frac{Kcal}{m^3 \cdot h}} = 453 m^3$$

Υπολογισμός επιφάνειας οριζόντιου διατομής φλογοθαλάμου

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας οριζόντιου διατομής χρησιμοποιείται ο εξής τύπος:

$$F_f = \frac{Q_f}{q_F} = \frac{90,53 \cdot 10^6 \frac{Kcal}{h}}{1,6 \cdot 10^6 \frac{Kcal}{m^2 \cdot h}} = 57 m^2$$

Λαμβάνοντας κατά προσέγγιση ίσο πλάτος και μήκος φλογοθαλάμου, βρίσκεται:

$$\text{-Πλάτος φλογοθαλάμου: } b_f = \sqrt{F_f} = \sqrt{57} = 7,5 m$$

$$\text{-Μήκος φλογοθαλάμου: } l_f = \sqrt{F_f} = \sqrt{57} = 7,5 m$$

Ενώ το ύψος του φλογοθαλάμου υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{-Ύψος φλογοθαλάμου: } h_f = \frac{V_f}{F_f} = \frac{453 m^3}{57 m^2} = 8,00 m$$

3. Θεωρητική θερμοκρασία του φλογοθαλάμου

Για τα υπόλοιπα τμήματα απαιτείται η θερμοκρασία του φλογοθαλάμου. Αρχικά υπολογίζεται η θεωρητική (για επιβεβαίωση) και στην συνέχεια η πραγματική. Ως θεωρητική θερμοκρασία φλογοθαλάμου εννοείται η βέλτιστη θερμοκρασία που θα αναπτυσσόταν αν δεν υπήρχε συναλλαγή θερμότητας με τα τοιχώματα του φλογοθαλάμου. Δηλαδή η πραγματική θερμοκρασία θα είναι σίγουρα μικρότερη από την θεωρητική. Με τον παρακάτω τύπο υπολογίζεται η θεωρητική θερμοκρασία:

$$T_u = \frac{H_{u2} + q_{\pi}}{c_p \cdot V_R} + T_l = \frac{6036 \frac{Kcal}{Kg}}{0,37 \frac{Kcal}{Nm^3 \cdot C} \cdot 7,70 \frac{Nm^3}{Kg}} + 20^{\circ} C = 2138^{\circ} C$$

4. Ακτινοβολούμενη επιφάνεια φλογοθαλάμου

Πριν υπολογιστεί η ακτινοβολούμενη επιφάνεια του φλογοθαλάμου θα πρέπει να επιλεγούν οι διαμέτροι των αυλών που είναι τοποθετημένοι. Μια συνήθη διάταξη είναι μια σειρά αυλών διαμέτρου $\Phi 82,9$ mm περιμετρικά του φλογοθαλάμου και σε επαφή με το τοίχωμα αυτού. Θα θεωρηθεί ότι υπάρχει μια αντίστοιχη διάταξη. Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ακτινοβολούμενης επιφάνειας φαίνεται παρακάτω:

$$F_s = \Sigma l_a \cdot d \left[1 + \frac{t-d}{2t} \right]$$

όπου: t = το βήμα των αυλών (σωλήνων)

l_a = το μήκος των αυλών

d = η εξωτερική διάμετρος των αυλών

Για τον υπολογισμό του βήματος των αυλών θα χρησιμοποιηθεί ο εμπειρικός τύπος:

$$t \approx \frac{\pi \cdot d}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot 82,9 = 130 \text{ mm}$$

Η περίμετρος του φλογοθαλάμου είναι:

$$\Gamma = 4 \cdot 7,5 = 30 \text{ m}$$

Για βήμα $t=0,130$ m και περίμετρο $\Gamma=30$ m προκύπτει ότι ο αριθμός των κατακόρυφων αυλών που θα τοποθετηθεί είναι:

$$n = \frac{\Gamma}{t} = \frac{30 \text{ m}}{0,13 \text{ m}} = 230 \text{ αυλοί}$$

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολούμενης επιφάνειας θα θεωρηθεί ότι το μήκος των αυλών είναι ίδιο με το ύψος του φλογοθαλάμου δηλ. $l_a = h_f = 8,00$ m. Οπότε γίνεται :

$$F_s = n \cdot l_a \cdot d \left(1 + \frac{t-d}{2t} \right) = 230 \cdot 8,00 \text{ m} \cdot 0,0829 \text{ m} \cdot \left(1 + \frac{130-82,9}{2 \cdot 130} \right) = 180 \text{ m}^2$$

5. Ακτινοβολούμενη θερμότητα στο φλογοθάλαμο

Η ανηγμένη θερμότητα που μεταδίδεται με ακτινοβολία στον φλογοθάλαμο, δηλ. ανά μονάδα ακτινοβολούμενης επιφάνειας υπολογίζεται με τον τύπο:

$$S = C \cdot \left[\left(\frac{t_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_w}{100} \right)^4 \right]$$

όπου: C= συντελεστής ακτινοβολίας ο οποίος εξαρτάται από την φωτεινότητα της φλόγας.

t_f = η πραγματική θερμοκρασία του φλογοθαλάμου σε Kelvin [K].

t_w =η θερμοκρασία της ακτινοβολούμενης επιφάνειας, δηλ. η εξωτερική θερμοκρασία των αυλών σε Kelvin [K].

Ο υπολογισμός κάθε μιας από αυτές της θερμοκρασίες γίνεται ως εξής:

-Για την t_f :

$$t_f = T_f + 273^\circ K$$

Η T_f είναι η πραγματική θερμοκρασία φλογοθαλάμου σε °C.

-Για την t_w :

$$t_w = t_o + 10^\circ K$$

Η t_o είναι η θερμοκρασία βρασμού του ύδατος στην πίεση λειτουργίας του λέβητα η οποία από τους Πίνακες κορεσμού για P=81 bar είναι:

$$t_o = 296 + 273 = 569^\circ K$$

Άρα είναι: $t_w = 569 + 10 = 579^\circ K$

Αντικαθιστώντας γίνεται:

$$S = 4 \cdot \left[\left(\frac{T_f + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{579}{100} \right)^4 \right] = 4 \cdot \left[\left(\frac{T_f}{100} + 2,73 \right)^4 - 5,79^4 \right] \frac{Kcal/h}{m^2}$$

6. Πραγματική θερμοκρασία του φλογοθαλάμου

Ο υπολογισμός της πραγματικής θερμοκρασίας του φλογοθαλάμου θα γίνει με το παρακάτω τύπο.

$$T_f = \frac{Q_f - F_s \cdot S}{B \cdot c_p \cdot V_R} + T_l$$

Αντικαθιστώντας γίνεται:

$$T_f = \frac{Q_f - F_s \cdot S}{B \cdot c_p \cdot V_R} + T_l = \frac{90,53 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} - 180 \text{m}^2 \cdot 4 \cdot \left[\left(\frac{T_f}{100} + 2,73 \right)^4 - 5,79^4 \right] \frac{\text{Kcal/h}}{\text{m}^2}}{15000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 0,37 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3 \text{C}} \cdot 7,70 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}}} + 20^\circ \text{C} \Rightarrow$$

$$T_f = \frac{91,34 \cdot 10^6 - 720 \cdot \left(\frac{T_f}{100} + 2,73 \right)^4}{42735} + 20^\circ \text{C} \quad (1)$$

Για τον υπολογισμό της τιμής T_f θα εφαρμοστεί η αλγεβρική και η γραφική μέθοδος, ήτοι:

Με την αλγεβρική μέθοδο

Τοποθετούνται συνέχεια διάφορες τιμές στο τύπο (1) για το T_f μέχρι να προκύψει το αποτέλεσμα του τύπου ίδιο με αυτό που τέθηκε αρχικά. Υπολογίζοντας βρίσκεται:

Για $T_f = 1235^\circ \text{C}$	βρίσκω	$T_f = 1286^\circ \text{C}$
Για $T_f = 1240^\circ \text{C}$	βρίσκω	$T_f = 1274^\circ \text{C}$
Για $T_f = 1245^\circ \text{C}$	βρίσκω	$T_f = 1262^\circ \text{C}$
Για $T_f = 1250^\circ \text{C}$	βρίσκω	$T_f = 1250^\circ \text{C}$
Για $T_f = 1255^\circ \text{C}$	βρίσκω	$T_f = 1238^\circ \text{C}$
Για $T_f = 1260^\circ \text{C}$	βρίσκω	$T_f = 1226^\circ \text{C}$

Άρα η πραγματική θερμοκρασία του φλογοθαλάμου είναι $T_f = 1250^\circ \text{C}$.

Με την γραφική μέθοδο

Σε αυτήν τη μέθοδο θα διαχωριστεί η σχέση (1) σε δυο μέλη κρατώντας στο ένα μέλος τους όρους με την παρένθεση στην τέταρτη δύναμη και στο άλλο μέλος όλους τους υπόλοιπους. Εφαρμόζοντας είναι :

$$12,80 \cdot 10^4 - 59,35 \cdot T_f = \left(\frac{T_f}{100} + 2,73 \right)^4 \quad (2)$$

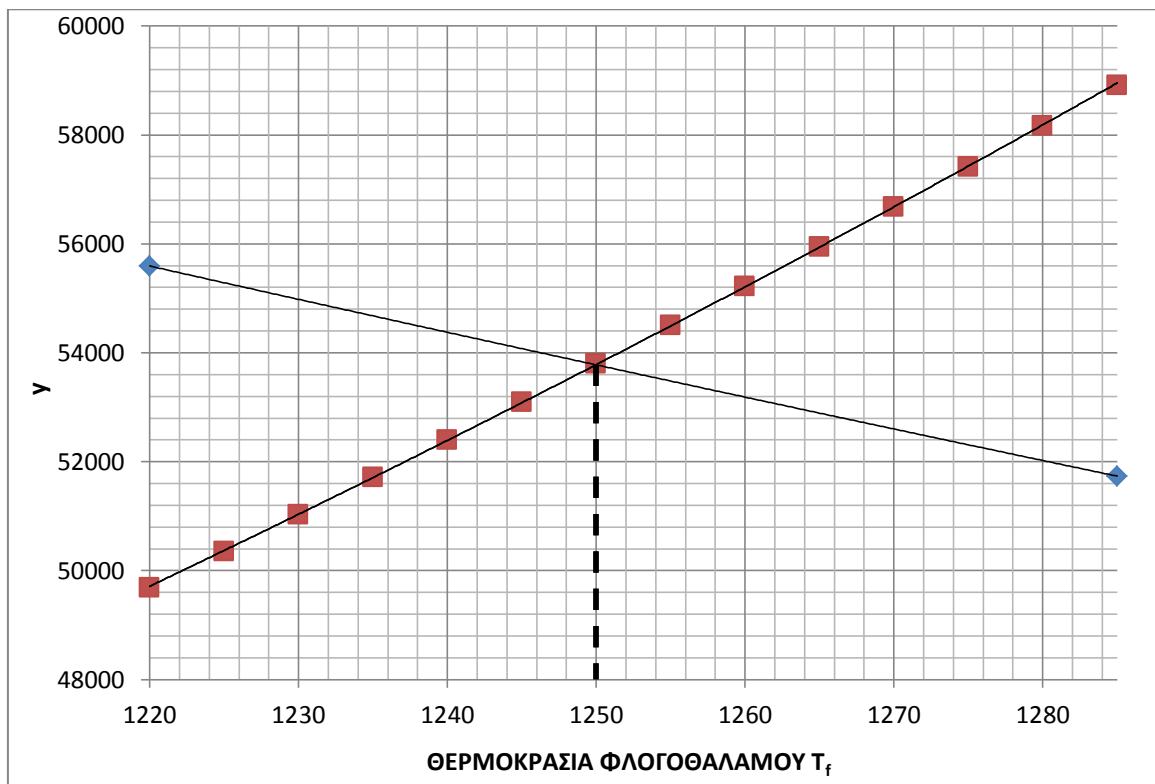
Επόμενο βήμα είναι να χωριστεί η εξίσωση (2) σε δυο εξισώσεις, ήτοι :

Α' μέλος: $y = 12,80 \cdot 10^4 - 59,35 \cdot T_f$

Β' μέλος: $y = \left(\frac{T_f}{100} + 2,73 \right)^4$

Τελευταίο βήμα είναι να τοποθετηθούν τιμές στο T_f στις δυο παραπάνω εξισώσεις από το $1220\text{ }^\circ\text{C}$ έως $1285\text{ }^\circ\text{C}$ και να υπολογιστεί το y . Θα σχεδιαστεί μια γραφική παράσταση που στο άξονα των x θα έχει τις τιμές του T_f και στο άξονα του y τις τιμές του y . Έτσι θα προκύψουν δυο γραμμές που στο σημείο τομής θα μας δίνει την θερμοκρασία.

Και πράγματι το σημείο τομής μας δίνει την ίδια θερμοκρασία με την Αλγεβρική μέθοδο, δηλαδή $T_f = 1250\text{ }^\circ\text{C}$.



Διάγραμμα 1: Γραφική απεικόνιση της πραγματικής θερμοκρασίας.

7. Αποδιδόμενη θερμότητα με ακτινοβολία στο φλογοθάλαμο

Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων τμημάτων θα χρειαστεί να υπολογιστεί η αποδιδόμενη ακτινοβολία στον φλογοθάλαμο. Ο συλλογισμός που ακολουθείται φαίνεται παρακάτω.

Κατά την καύση στο φλογοθάλαμο εκλύεται θερμότητα που μεταδίδεται:

- α) με ακτινοβολία στους αυλούς του φλογοθαλάμου (δημιουργεί ατμοποίηση) και
- β) στα άλλα τμήματα του λέβητα διαμέσου των θερμών καπναερίων.

Βέβαια ένα μέρος της χάνεται λόγω απωλειών ακτινοβολίας και αγωγιμότητας σε κάθε τμήμα του λέβητα. Περιληπτικά είναι:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Εκλυόμενη θερμότητα} \\ \text{στην εστία} \\ Q \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Θερμότητα δι' ακτινοβολίας} \\ \text{στον φλογοθάλαμο} \\ Q_{af} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Θερμότητα καπναερίων} \\ \text{φλογοθαλάμου} \\ Q_R \end{array} \right]$$

Από τον ανωτέρω ισολογισμό προκύπτει προφανώς η σχέση:

$$Q = Q_{af} + Q_R$$

Αναλύοντας την παραπάνω σχέση για την περίπτωση της γενικής καύσης προκύπτει ότι:

$$Q = B \cdot \left[(1-x_d) \cdot (H_u + q_B) + L \cdot c_{ph} \cdot (T_h - T_l) \right]$$

Όπου το $(1-x_d) \cdot (H_u + q_B)$ αφορά την θερμότητα που παράγεται στην εστία κατά την καύση καυσίμου με θερμογόνο δύναμη H_u , το q_B στη θερμότητα προθέρμανσης και το x_d στις απώλειες εξ άκαυστων (σκωρία, τέφρα, κωκ κ.λ.π.). Ενώ το $L \cdot c_{ph} \cdot (T_h - T_l)$ αφορά την θερμότητα που μεταφέρεται στην εστία με τον αέρα καύσεως εάν έχει προθερμανθεί.

Το Q_{af} (θερμότητα που μεταδίδεται με ακτινοβολία στους αυλούς) βρίσκεται από τη σχέση:

$$Q_{af} = S \cdot F_S$$

όπου: S = η θερμότητα δι' ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας.

F_S = η ακτινοβολούμενη επιφάνεια.

Η θερμότητα των καπναερίων του φλογοθαλάμου ισούται με:

$$Q_R = B \cdot V_R \cdot c_{pm} \cdot (T_f - T_l)$$

όπου: V_R = ο όγκος των καπναερίων.

c_{pm} = η μέση ειδική θερμότητα των καπναερίων.

T_f = η θερμοκρασία του φλογοθαλάμου.

T_l = η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τελικά λύνοντας την σχέση ισολογισμού ως προς Q_{af} και λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό x_c της θερμότητας που χάνεται με ακτινοβολία και αγωγιμότητα στην εστία παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν απώλειες εξ' άκαυστων για καύση, δηλαδή ποσοστό $x_d=0$ (πρακτικά αδύνατο , αλλά για απλοποίηση του προβλήματος είναι

αποδεκτό) , και στο συγκεκριμένο πρόβλημα υπάρχει προθέρμανση του αέρα καύσεως. Οπότε προκύπτει η σχέση:

$$Q_{af} = (1 - x_c) \cdot B \cdot \left[(H_{u2} + q_{\pi}) - V_R \cdot c_{pm} \cdot (T_f - T_l) \right]$$

Η τιμές των δεδομένων είναι:

$$x_c = 2,5 \%$$

$$x_d \approx 0$$

$$H_{u2} + q_{\pi} = 5582 + 453,6 = 6036 \text{ Kcal/Kg}$$

$$V_R = 7,70 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$c_{pm} = 0,37 \text{ Kcal/Nm}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_f = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$B = 15000 \text{ Kg/h}$$

$$T_l = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα βρίσκεται η δι' ακτινοβολίας μεταδιδόμενη θερμότητα στο φλογοθάλαμο, ήτοι:

$$Q_{af} = (1 - 0,025) \cdot 15000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \left[6036 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} - 7,70 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}} \cdot 0,37 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3\text{ }^{\circ}\text{C}} \cdot (1250 - 20)^{\circ}\text{C} \right]$$

$$= 37,03 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

8. Προσδιδόμενη συνολική θερμότητα για ατμοποίηση

Για τον υπολογισμό της συνολικής θερμότητας που προσδίδεται από τα καπναέρια για ατμοποίηση στο Αρχικό και Τελικό τμήμα του λέβητα, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\Delta h = h_x - q_o$$

όπου: h_x = ενθαλπία του ατμού του τυμπάνου.

q_o = ενθαλπία του εισερχόμενου νερού.

Από βιβλιογραφίες είναι γνωστό ότι ο ατμός μέσα στο τύμπανο δεν είναι 100% κορεσμένος αλλά και υγρός, με ξηρότητα $x=0,97$ έως $0,99$. Εδώ ορίζεται $x=0,98$.

Για τους υπολογισμούς θα χρειαστεί να μετατραπεί η ενθαλπία από KJ/Kg σε Kcal/Kg. Ήτοι:

$$h_3 = 1321,8 \frac{KJ}{Kg} \approx \frac{1321,8}{4,187} = 315,7 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$h_4 = 2759,4 \frac{KJ}{Kg} \approx \frac{2759,4}{4,187} = 659,0 \frac{Kcal}{Kg}$$

Έτσι ο υπολογισμός της ενθαλπίας του υγρού ατμού βρίσκεται:

$$h_x = h_3 + x \cdot (h_4 - h_3) = 315,7 + 0,98 \cdot (659,0 - 315,7) = 652,1 \frac{Kcal}{Kg}$$

Μια φυσιολογική εκτίμηση της πτώσεως της πίεσης στον προθερμαντήρα νερού είναι περίπου τα 3 bar. Οπότε υπολογίζοντας την πίεση στο τροφοδοτικό του νερού βρίσκεται:

- Πίεση στο τροφοδοτικό του νερού $P_o = 81 + 3 = 84$ bar (απόλυτη)

Η ενθαλπία που αποκτά το νερό όταν συμπιεστεί σε πίεση $P_o = 84$ bar και σε θερμοκρασία $T_o = 177$ °C είναι με μεγάλη προσέγγιση με αυτή του κορεσμένου νερού ίδιας θερμοκρασίας. Οπότε το πρόγραμμα δίνει τη τιμή:

$$q_o = 753,9 \frac{KJ}{Kg} \approx \frac{753,9}{4,187} = 180,0 \frac{Kcal}{Kg}$$

Τελικά η συνολική θερμότητα για ατμοποίηση είναι:

$$Q_D = D \cdot (h_x - q_o) = 115000 \frac{Kg}{h} \cdot (652,1 - 180,0) \frac{Kcal}{Kg} = 54,29 \times 10^6 \frac{Kcal}{h}$$

9. Θερμότητες που αποδίδονται σε κάθε τμήμα καθώς και οι θερμαινόμενες επιφάνειες

Για το αρχικό τμήμα.

Τα καπναέρια στην είσοδο τους έχουν θερμοκρασία ίδια με αυτή που εγκαταλείπουν το φλογοθάλαμο, δηλ. $T_f = 1250$ °C, ενώ στην έξοδο τους έχουν θερμοκρασία ίδια με την θερμοκρασία στην είσοδο του υπερθερμαντήρα. Επειδή το αρχικό τμήμα ατμοποίησης βρίσκεται πάνω από τον φλογοθάλαμο θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι δεν θα ξεπεραστεί η κρίσιμη θερμοκρασία (δηλ. 900 °C σύμφωνα με τα αρχικά δεδομένα) ώστε να μην υπάρξει καταστροφή του χάλυβα. Για την μείωση της θερμοκρασίας από 1250 °C στους 900°C πρέπει να αποδοθεί ανάλογη θερμότητα στο αρχικό τμήμα ατμοποίησης, χρησιμοποιώντας το τύπο:

$$Q_I = (1 - x_c) \cdot B \cdot V_R \cdot c_{pm} \cdot (T_f - T_{αντ.χάλ.})$$

όπου: $T_f=1250\text{ }^\circ\text{C}$ και $T_{\text{αντ.χαλ.}}=900\text{ }^\circ\text{C}$.

$x_c=2,5\%$ το ποσοστό για απώλειες από ακτινοβολία και αγωγιμότητα προς την τοιχοποιία και από εκεί προς το περιβάλλον, εντός του αρχικού τμήματος.

$B=15000\text{ Kg/h}$ η ωριαία κατανάλωση καυσίμου.

$V_R=7,70\text{ Nm}^3/\text{Kg}$ ο όγκος των καπναερίων.

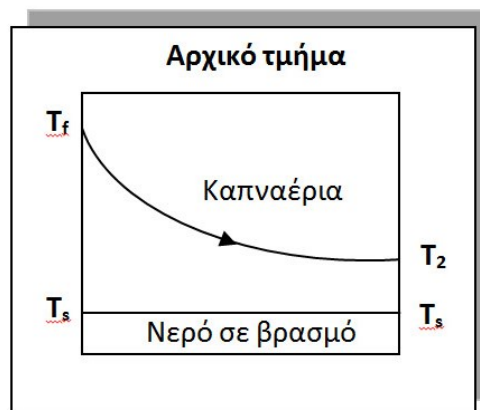
$c_{pm}=0,37\text{ Kcal/Nm}^3\cdot^\circ\text{C}$ η μέση ειδική θερμότητα των καπναερίων, εντός του αρχικού τμήματος

Τοποθετώντας τα δεδομένα ο τύπος γίνεται:

$$Q_l = (1 - 0,025) \cdot 15000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 7,70 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}} \cdot 0,37 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (1250 - 900)^\circ\text{C}$$
$$= 14,58 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Στο αρχικό τμήμα ατμοποίησης υπάρχουν στην εξωτερική επιφάνεια τα καπναέρια ενώ στην εσωτερική το νερό σε κατάσταση βρασμού ,δηλ. ένα σύστημα εναλλάκτη που ανταλλάσει θερμότητα. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας των ρευστών φαίνονται στο Σχήμα 2 .Το T_s που είναι η θερμοκρασία βρασμού του νερού στην πίεση του τυμπάνου (Σημείο 3 του Σχήματος 1):

$T_s=296\text{ }^\circ\text{C}$



Σχήμα 2

Υπολογίζοντας την μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας, κατά Grashof, βρίσκεται η θερμαινόμενη επιφάνεια του αρχικού τμήματος. Ο τύπος είναι:

$$(\Delta T_m)_{\log} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}$$

όπου: ΔT_{\max} = η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών στο ένα άκρο του εναλλάκτη.

ΔT_{\min} = η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών στο άλλο άκρο του εναλλάκτη.

Υπολογίζοντας :

$$\Delta T_{\max} = T_f - T_s = 1250 - 296 = 954^\circ C$$

$$\Delta T_{\min} = T_{\text{αντ. χαλ.}} - T_2 = 900 - 296 = 604^\circ C$$

Αντικαθιστώντας :

$$(\Delta T_m)_{\log} = \frac{954 - 604}{\ln \frac{954}{604}} = 766^\circ C$$

Η θερμαινόμενη επιφάνεια του αρχικού τμήματος είναι:

$$F_1 = \frac{Q_1}{K \cdot (\Delta T_m)_{\log}} = \frac{14,58 \cdot 10^6 \frac{Kcal}{h}}{32 \frac{Kcal}{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C} \cdot 766^\circ C} = 595 m^2$$

Για τον υπερθερμαντήρα.

Για το υπολογισμό της θερμαινόμενης επιφάνειας του υπερθερμαντήρα θα χρειαστεί αρχικά να βρεθεί η αποδιδόμενη θερμότητα στον υπερθερμαντήρα.

Ο υπερθερμαντήρας ερχόμενος σε επαφή με τα καπναέρια, που έχουν θερμοκρασία $T_{\text{αντ. χαλ.}} = 900^\circ C$ στην είσοδο, παραλαμβάνει θερμότητα καταφέροντας έτσι να ανεβάσει την θερμοκρασία του ατμού από $T_s = 296^\circ C$ σε $T = 480^\circ C$. Η θερμότητα που παίρνει ο υπερθερμαντήρας υπολογίζεται ως εξής:

$$Q = \dot{m} \cdot (h_5 - h_x) = 115000 \frac{Kg}{h} \cdot \left(\frac{3348,3}{4,187} - 652,1 \right) \frac{Kcal}{Kg} = 16,97 \times 10^6 \frac{Kcal}{h}$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας των καπναερίων μετά τον υπερθερμαντήρα.

Κατά την έξοδο των καπναερίων από τον υπερθερμαντήρα υπάρχει μία επιπλέον μείωση της θερμοκρασίας τους λόγω της μεταδιδόμενης θερμότητας. Έτσι η θερμοκρασία T_3 των καπναερίων στην έξοδο του υπερθερμαντήρα θα υπολογιστεί από το τύπο:

$$Q = (1 - x_c) \cdot B \cdot V_R \cdot c_{pm} \cdot (T_{\text{αντ. χαλ.}} - T_3)$$

όπου: $T_{αντ.χαλ.} - T_3$ η διαφορά θερμοκρασίας πριν και μετά τον υπερθερμαντήρα.

$c_{pm} = 0,36 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ η μέση ειδική θερμότητα των καπναερίων εντός του υπερθερμαντήρα.

$T_{αντ. χαλ} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ η θερμοκρασία στην είσοδο του υπερθερμαντήρα.

$x_c = 2,5 \%$ οι απώλειες από ακτινοβολία και αγωγιμότητα στον υπερθερμαντήρα.

$B = 15000 \text{ Kcal/Kg}$ η ωριαία κατανάλωση καυσίμου.

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς T_3 και αντικαθιστώντας βρίσκεται:

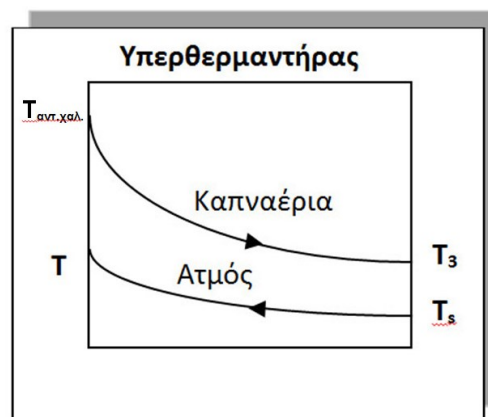
$$T_3 = T_{αντ.χαλ.} - \frac{Q}{(1 - x_c) \cdot B \cdot V_R \cdot c_{pm}}$$

$$= 900^\circ\text{C} - \frac{16,97 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{(1 - 0,025) \cdot 15000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 7,70 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}} \cdot 0,36 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}}} = 481^\circ\text{C}$$

Τώρα μπορεί να βρεθεί η επιφάνεια του υπερθερμαντήρα χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$F_u = \frac{Q}{K \cdot (\Delta T_m)_{log}}$$

Ο υπερθερμαντήρας λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ των καπναερίων που βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά των σωληνώσεων και του ατμού που βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά. Έτσι αυξάνοντας την θερμοκρασία του ο ατμός πηγαίνει από T_s σε T (Σχήμα 3) και τα καπναέρια την μειώνουν από $T_{αντ.χαλ.}$ σε T_3 .



Σχήμα 3

Υπολογίζοντας την μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας, κατά Grashof, μπορεί να βρεθεί στη συνέχεια η θερμαινόμενη επιφάνεια του υπερθερμαντήρα. Οι διαφορές θερμοκρασίας στα δυο άκρα του εναλλάκτη υπολογίζονται ως εξής:

$$\Delta T_{max} = T_{αντ.χολ.} - T = 900 - 480 = 420^{\circ} C$$

$$\Delta T_{min} = T_3 - T_s = 481 - 296 = 185^{\circ} C$$

Αντικαθιστώντας στο τύπο .

$$(\Delta T_m)_{log} = \frac{420 - 185}{\ln \frac{420}{185}} = 287^{\circ} C$$

Επόμενο βήμα χρησιμοποιείται η βασική σχέση μετάβασης θερμότητας, ήτοι:

$$Q = K \cdot F_u \cdot (\Delta T_m)_{log}$$

όπου: $K=25 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}C$ ο συντελεστής μεταδόσεως θερμότητας στον υπερθερμαντήρα.

$Q_u=16,97 \cdot 10^6 \text{ Kcal/h}$ η θερμότητα που μεταβιβάζεται στον υπερθερμαντήρα, όπως αυτή υπολογίστηκε σε προηγούμενο βήμα.

Επιλύοντας ως προς F_u και αντικαθιστώντας, βρίσκεται:

$$F_u = \frac{Q}{K \cdot (\Delta T_m)_{log}} = \frac{16,97 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{25 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}C} \cdot 287^{\circ} C} = 2365 \text{m}^2$$

Η επιφάνεια μας βγαίνει αρκετά μεγάλη. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται μεγάλος αριθμός σωληνώσεων σε σπείρες για την κατασκευή του υπερθερμαντήρα.

Για το τελικό τμήμα.

Για το υπολογισμό του θα ακολουθηθεί ο εξής συλλογισμός: Οι σωληνώσεις που διαπερνούν το άνω μέρος του φλογοθαλάμου και περνούν πίσω από το υπερθερμαντήρα καταλήγοντας στο τύμπανο αποτελούν το τελικό τμήμα ατμοποίησης. Παρακάτω φαίνεται ο ισολογισμός:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Συνολική} \\ \text{θερμότητα για} \\ \text{ατμοποίηση} \\ Q_D \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Θερμότητα δι}' \\ \text{ακτινοβολίας στον} \\ \text{φλογοθάλαμο} \\ Q_{af} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Θερμότητα} \\ \text{αρχικού} \\ \text{τμήματος} \\ Q_1 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Θερμότητα} \\ \text{τελικού} \\ \text{τμήματος} \\ Q_2 \end{array} \right]$$

Από τα παραπάνω προκύπτει η σχέση:

$$Q_2 = Q_D - Q_{af} - Q_l$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα βρίσκεται ότι:

$$Q_2 = 54,29 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} - 37,03 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} - 14,58 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 2,68 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Τα καπναέρια με θερμοκρασία εισόδου T_3 , καταλήγουν να έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία T_4 (λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το τελικό τμήμα ατμοποίησης). Ο υπολογισμός της T_4 θα γίνει με το παρακάτω τύπο:

$$Q_2 = (1 - x_c) \cdot B \cdot V_R \cdot c_{pm} \cdot (T_3 - T_4)$$

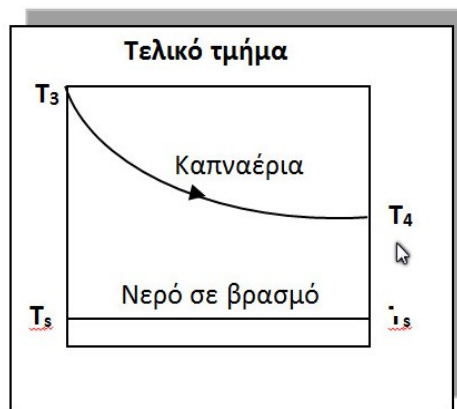
όπου: $c_{pm} = 0,35 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ η ειδική θερμότητα των καπναερίων στο τελικό τμήμα.

Επιλύοντας ως προς T_4 και αντικαθιστώντας, βρίσκεται ότι:

$$T_4 = T_3 - \frac{Q_2}{(1 - x_c) \cdot B \cdot V_R \cdot c_{pm}}$$

$$= 481^\circ\text{C} - \frac{2,68 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{(1 - 0,025) \cdot 15000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 7,70 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}} \cdot 0,35 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}}} = 413^\circ\text{C}$$

Το τελικό τμήμα ατμοποίησης λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ των καπναερίων που βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά των σωληνώσεων και του ατμοποιημένου νερού που βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά. Έτσι μειώνεται η θερμοκρασία των καπναερίων από T_3 σε T_4 (Σχήμα 4). Η T_s είναι η θερμοκρασία του νερού σε βρασμό στην πίεση τυμπάνου.



Σχήμα 4

Ο υπολογισμός της θερμαινόμενης επιφάνειας του τελικού τμήματος θα γίνει προσδιορίζοντας πρώτα τη μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ,κατά Grashof, και αντικαθιστώντας στο γνωστό τύπο. Τα ΔT_{max} και ΔT_{min} είναι:

$$\Delta T_{max} = T_3 - T_s = 481 - 296 = 185^\circ C$$

$$\Delta T_{min} = T_4 - T_s = 413 - 296 = 117^\circ C$$

Αντικαθιστώντας στο τύπο.

$$(\Delta T_m)_{log} = \frac{185 - 117}{\ln \frac{185}{117}} = 148^\circ C$$

Από την βασική σχέση μεταβίβασης θερμότητας.

$$Q_2 = K \cdot F_2 \cdot (\Delta T_m)_{log}$$

όπου: $K=30 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας εντός του τελικού τμήματος.

Επιλύοντας ως προς F_2 και αντικαθιστώντας ,βρίσκεται:

$$F_2 = \frac{Q_2}{K \cdot (\Delta T_m)_{log}} = \frac{2,68 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{30 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 148^\circ\text{C}} = 604 \text{m}^2$$

Για τον προθερμαντήρα νερού.

Ο προθερμαντήρας νερού λειτουργεί ως εναλλάκτης ανάμεσα στα καπναέρια και το τροφοδοτικό νερού. Έτσι τα καπναέρια που είναι πιο θερμά μεταβάλλουν την ενθαλπία του τροφοδοτικού νερού από την τιμή q_w ,την οποία έχει κατά την είσοδο του στο προθερμαντήρα ευρισκόμενο σε θερμοκρασία $T_w=100^\circ\text{C}$,στην τιμή q_o κατά την έξοδο του από τον προθερμαντήρα σε θερμοκρασία $T_o=177^\circ\text{C}$.

Η ενθαλπία κατά την είσοδο του νερού στον προθερμαντήρα είναι ίδια με την ενθαλπία μετά την αντλία. Δηλαδή:

$$h_2 = q_w = \frac{427,4}{4,187} = 102,1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

Η ενθαλπία του νερού q_o στην έξοδο του προθερμαντήρα είναι:

$$q_o = 180,0 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες (στρατσώνα κ.λπ.) αλλά σταθερές συνθήκες δηλ. η ποσότητα του τροφοδοτικού νερού είναι ίδια με την ποσότητα του παραγόμενου ατμού D, μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση του παρακάτω τύπου η απορροφώμενη θερμότητα από το τροφοδοτικό νερού.

$$Q_v = D \cdot (q_o - q_w) = 115000 \cdot (180,0 - 102,1) = 8,96 \times 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Τα καπναέρια με θερμοκρασία εισόδου T_4 , καταλήγουν να έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία T_5 (λόγο της μεταφοράς θερμότητας από το προθερμαντήρα νερού). Ο υπολογισμός της T_5 θα γίνει με το παρακάτω τύπο:

$$Q_v = (1 - x_c) \cdot B \cdot V_R \cdot c_{pm} \cdot (T_4 - T_5)$$

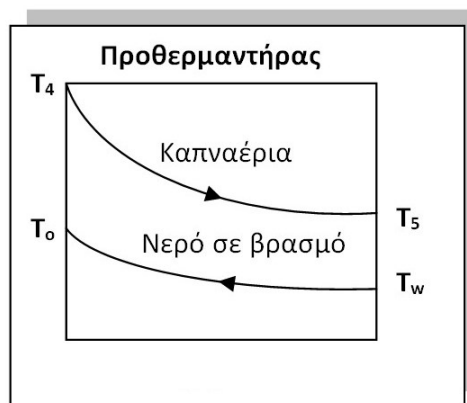
όπου: $c_{pm} = 0,34 \text{ Kcal/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ η ειδική θερμότητα των καπναερίων στον προθερμαντήρα νερού.

Επιλύοντας ως προς T_5 και αντικαθιστώντας ,βρίσκεται:

$$T_5 = T_4 - \frac{Q_v}{(1 - x_c) \cdot B \cdot V_R \cdot c_{pm}}$$

$$= 334^\circ\text{C} - \frac{8,96 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{(1 - 0,025) \cdot 15000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 7,70 \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}} \cdot 0,34 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}}} = 179^\circ\text{C}$$

Ο προθερμαντήρας νερού λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας μεταξύ των καπναερίων που βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά των σωληνώσεων και του τροφοδοτικού νερού. Έτσι μειώνεται η θερμοκρασία των καπναερίων από T_4 σε T_5 (Σχήμα 5) και αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού από T_w σε T_o .



Σχήμα 5

Ο υπολογισμός της θερμαινόμενης επιφάνειας του προθερμαντήρα νερού θα γίνει προσδιορίζοντας πρώτα τη μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας ,κατά Grashof, και αντικαθιστώντας στο γνωστό τύπο. Τα ΔT_{max} και ΔT_{min} είναι:

$$\Delta T_{max} = T_4 - T_o = 413 - 177 = 236^\circ C$$

$$\Delta T_{min} = T_5 - T_w = 179 - 106 = 73^\circ C$$

Αντικαθιστώντας στο τύπο.

$$(\Delta T_m)_{log} = \frac{236 - 73}{\ln \frac{236}{73}} = 138^\circ C$$

Από την βασική σχέση μεταβίβασης θερμότητας.

$$Q_v = K \cdot F_v \cdot (\Delta T_m)_{log}$$

όπου: $K=18 \text{ Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ ο συντελεστής μεταβίβασης θερμότητας εντός του προθερμαντήρα.

Επιλύοντας ως προς F_v και αντικαθιστώντας ,βρίσκεται:

$$F_v = \frac{Q_v}{K \cdot (\Delta T_m)_{log}} = \frac{8,96 \cdot 10^6 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{18 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 138^\circ\text{C}} = 3607 \text{m}^2$$

Η επιφάνεια που βγήκε είναι αρκετά μεγάλη λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας των καπναερίων αλλά και του μικρού συντελεστή μεταβίβασης θερμότητας. Έτσι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν πολλά πακέτα ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις.

Τα καπναέρια βγαίνοντας από τον προθερμαντήρα νερού πηγαίνουν προς την έξοδο της καπνοδόχου (όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4 και 47). Έτσι συμπεραίνεται ότι τα καπναέρια θα έχουν κατά την είσοδο τους στην καπνοδόχο την ίδια θερμοκρασία με αυτή που βγαίνουν από τον προθερμαντήρα. Δηλαδή:

Θερμοκρασία καπναερίων στην καπνοδόχο:

$$T_5 = 179^\circ\text{C}$$

10. Ειδική ατμοποίηση

Η ειδική ατμοποίηση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$q = \frac{D}{F_D}$$

όπου: $D=115000 \text{ Kg/h}$ η ποσότητα του παραγόμενου ατμού.

F_D = η συνολική επιφάνεια ατμοποίησης του λέβητα.

Το F_D υπολογίζεται αθροίζοντας την επιφάνεια φλογοθαλάμου F_s , την επιφάνεια του αρχικού τμήματος F_1 και την επιφάνεια του τελικού τμήματα F_2 , ήτοι:

$$F_D = F_s + F_1 + F_2 = 180 + 595 + 604 = 1379m^2$$

Αντικαθιστώντας στο τύπο.

$$q = \frac{115000 \frac{Kg}{h}}{1379m^2} = 83 \frac{Kg}{h \times m^2}$$

Για λέβητες ακτινοβολίας γενικά ισχύει:

-Για οικονομική παραγωγή: $q=60$ έως $80 \text{ Kg/h}\cdot m^2$

-Για μέγιστη συνεχή ατμοποίηση: $q=80$ έως $100 \text{ Kg/h}\cdot m^2$

Οπότε η περίπτωση αυτή ανήκει στην κατηγορία της μέγιστης συνεχής ατμοποίησης.

11. Επαλήθευση βαθμού αποδόσεως

Για μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης προσδιορίζοντας πρώτα τις συνολικές απώλειες του λέβητα και κατόπιν αφαιρώντας τις από το 100%. Οπότε:

-Απώλειες θερμών καπναερίων X_A .

-Απώλειες από ατελή καύση του άνθρακα X_B .

-Απώλειες από ακτινοβολία και αγωγιμότητα X_C .

Ο υπολογισμός του ποσοστού των απωλειών θερμών καπναερίων γίνεται ως εξής:

$$X_A = \frac{c_{pm} \cdot V_R \cdot (T_5 - T_l)}{Q} = \frac{0,34 \frac{Kcal}{Nm^3 \cdot ^\circ C} \cdot 7,70 \frac{Nm^3}{Kg} \cdot (179 - 20)^\circ C}{6036 \frac{Kcal}{kg}} \cdot 100 = 6,90\%$$

Το ποσοστό των απωλειών από ατελή καύση θα γίνει αφού πρώτα προσδιοριστεί η περιεκτικότητα των καπναερίων σε μονοξείδιο του άνθρακα

στηριζόμενη συνήθως στην ποσότητα των ξηρών καπναερίων, τα οποία υπολογίζονται με την σχέση:

$$V_{R,tr} = V_{tr} + (\lambda - 1) \cdot L_o = 5,86 + (1,20 - 1) \cdot 6,00 = 7,06 \frac{Nm^3}{Kg}$$

Υπολογίζοντας τις απώλειες X_B βρίσκουμε:

$$X_B = \frac{p \cdot q_{CO} \cdot V_{R,tr}}{Q} = \frac{0,5\% \cdot 3040 \frac{Kcal}{Nm^3} \cdot 7,06 \frac{Nm^3}{Kg}}{6036 \frac{Kcal}{Kg}} = 1,78\%$$

όπου: $q_{CO} = 3040 \text{ Kcal/Nm}^3$ η θερμότητα που αποδίδει το CO όταν καίγεται προς CO_2 .

$p = 0,5\%$ παραγόμενο μονοξείδιο του άνθρακα κατά την καύση. Μια αρκετά καλή τιμή για καλή καύση.

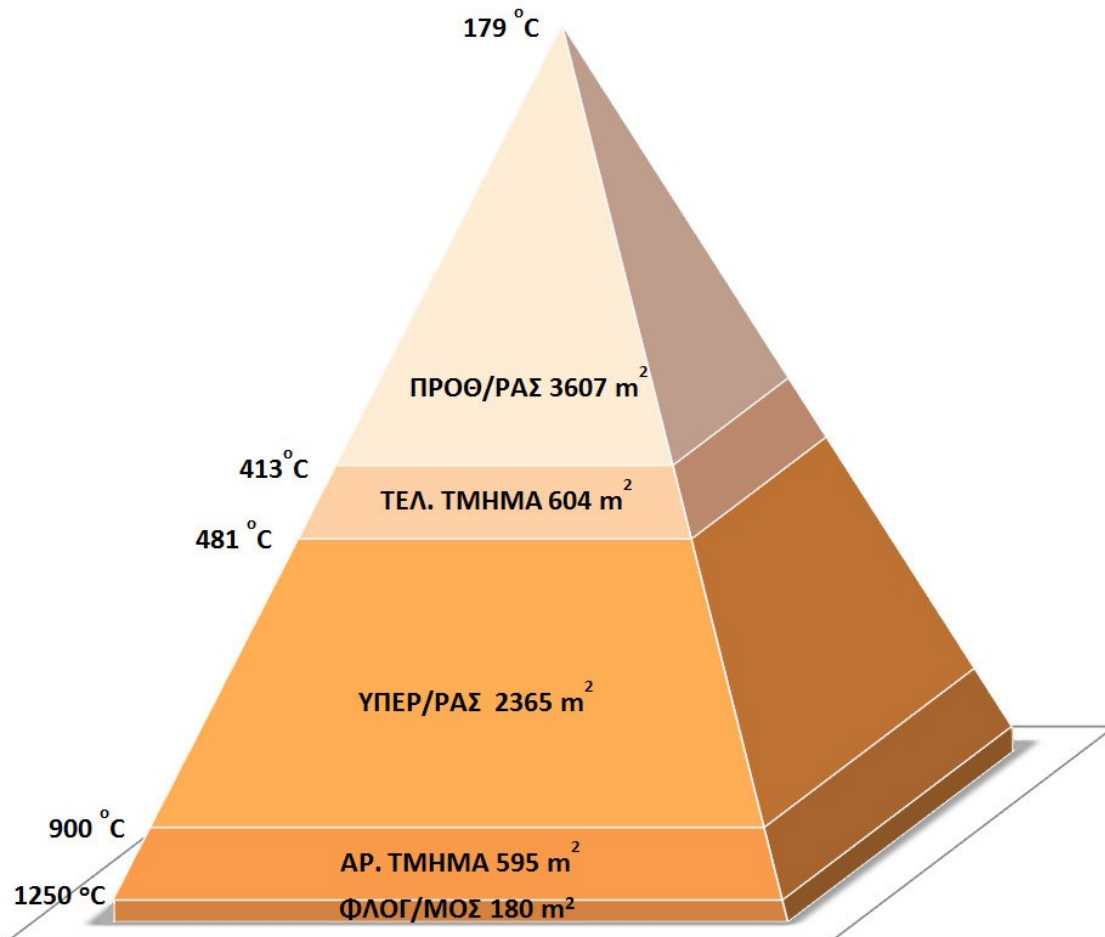
Οι απώλειες από ακτινοβολία και αγωγιμότητα λαμβάνονται $x_C = 2,5 \%$. Κατόπιν αυτού, ο πραγματικός βαθμός αποδόσεως του λέβητα είναι:

$$\eta = 100\% - X_A - X_B - X_C = 100\% - 6,90\% - 1,78\% - 2,5\% = 88,82\% \Rightarrow \eta \approx \mathbf{88\%}$$

Προέκυψε ίδιος περίπου βαθμός απόδοσης με αυτόν που υπολογίστηκε αρχικά. Οπότε πραγματοποιήθηκε σωστά η μελέτη με αρκετά μεγάλη ακρίβεια.

12. Διάγραμμα θερμοκρασιών και επιφανειών

Σε ένα διάγραμμα μπορούν να απεικονιστούν οι θερμοκρασίες και οι επιφάνειες. Έτσι υπάρχει μια άμεση εικόνα για το τι συμβαίνει μέσα στο λέβητα π.χ. τα μεγέθη των επιφανειών κ.τ.λ. Η απεικόνιση θα ξεκινήσει από το φλογοθάλαμο και θα συνεχιστεί με την σειρά που διέρχονται τα καπναέρια. Το διάγραμμα φαίνεται παρακάτω.



Διάγραμμα 2: Απεικόνιση θερμοκρασιών και επιφανιών του ατμολέβητα.

7.6 ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ- ΙΣΧΥΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

1. Πραγματικός όγκος καπναερίων

Τα καπναέρια κατά την έξοδο τους από την καπνοδόχο θα έχουν μεγαλύτερο πραγματικό όγκο σε σχέση με το όγκο υπό κανονικές συνθήκες λόγω υψηλής θερμοκρασία.

Για το υπολογισμό του πραγματικού όγκου θα πρέπει να υπολογιστή πρώτα η συνολική ποσότητα των καπναερίων με βάση την κατανάλωση καυσίμου, ήτοι:

$$V'_R = B \cdot V_R = 15 \frac{t}{h} \cdot 10^3 \cdot 7,70 \frac{Nm^3}{h} = 115500 \frac{Nm^3}{h}$$

Θα χριστή να υπολογιστή η θερμοκρασία των καπναερίων στην έξοδο της καπνοδόχου. Ήτοι:

$$T_k = T_s - \Delta T \cdot h_o = 179 - 0,3 \cdot 55 = 162^\circ C$$

Αρκετά χαμηλή θερμοκρασία.

Ο πραγματικός όγκος είναι:

$$Q = V_R' \cdot \left(\frac{273 + T_K}{273} \right) = 115500 \cdot \left(\frac{273 + 162}{273} \right) = 184038 \frac{m^3}{h}$$

2. Διατομή καπνοδόχου

Η κυκλική διάμετρος στην κορυφή της καπνοδόχου θα υπολογιστεί με βάση την ογκομετρική παροχή των καπναερίων και την ταχύτητα τους ($u=11$ m/s από τα δεδομένα). Οπότε υπολογίζοντας βρίσκεται:

$$d = 18,8 \sqrt{\frac{Q}{u}} = 18,8 \sqrt{\frac{184038 \frac{m^3}{h}}{11 \frac{m}{s}}} = 2432mm \approx 2,5m$$

Με βάση την διάμετρο κορυφής και το ύψος της καπνοδόχου μπορεί να υπολογιστεί η διάμετρος της βάσης. Από την κορυφή ως την βάση η καπνοδόχος παρουσιάζει μια κωνικότητα ώστε να έχει στατική επάρκεια.

$$D = d + (0,016 \text{ _ έως _ } 0,020) \cdot h_o = 2,50 + 0,018 \cdot 55 = 3,49 \approx 3,5$$

Η καπνοδόχο θα έχει διάμετρο στη κορυφή $d=2,5$ m και βάσης $D=3,5$ m.

Αντίστοιχα οι διατομές είναι:

$$\text{Για την κορυφή: } \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2,5^2}{4} = \mathbf{4,90m^2}$$

$$\text{Για την βάση: } \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 3,5^2}{4} = \mathbf{9,62m^2}$$

3. Ισχύς αντλίας

Η ισχύς της αντλίας τροφοδοτικού νερού θα υπολογιστεί με το παρακάτω τύπο θεωρώντας ότι η ποσότητα του κυκλοφορούντος νερού είναι ίση με την παροχή του ατμού. Ήτοι:

$$N = D \cdot (h_2 - h_1) = 115 \cdot 10^3 \cdot (427,4 - 419,1) = 954,5 \cdot 10^3 \frac{KJ}{h}$$

$$N = \frac{954,5 \cdot 10^3}{3600} = 265 Kw$$

Σημείωση: Η διαίρεση με το 3600 έγινε για την μετατροπή των μονάδων.

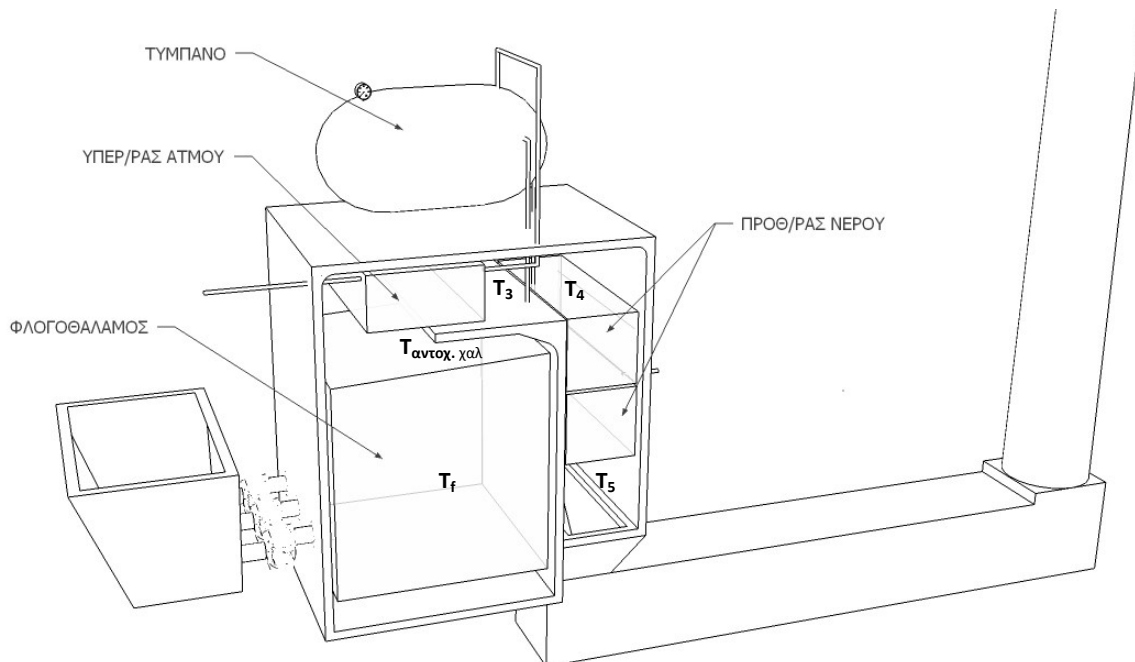
Οι παραπάνω υπολογισμοί έγιναν με βαθμό απόδοσης $\eta=1$. Στην πραγματικότητα για μια πολυβάθμια φυγοκεντρική αντλία ο βαθμός απόδοσης είναι $\eta=0,7$. Οπότε είναι:

$$N = \frac{265}{0,7} = 379 Kw$$

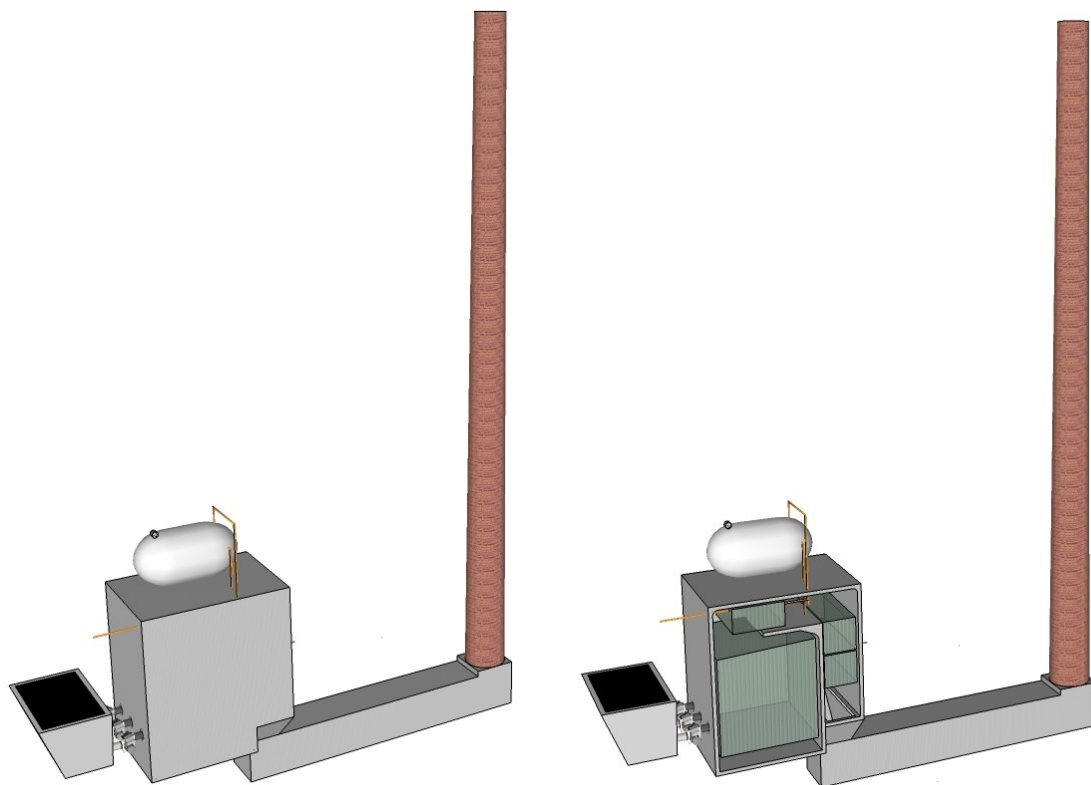
Ένας πιο ακριβής υπολογισμός της ισχύος της αντλίας υπάρχει στη σελ. 128 στη βιβλιογραφία [4].

7.7 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΤΜΟΛΕΒΗΤΑ ΣΕ 3Δ

Η σχεδίαση του ατμολέβητα έγινε με την χρήση του προγράμματος SketchUp.



Εικόνα 46: Απεικόνιση ατμολέβητα.



Εικόνα 47: Απεικόνιση ατμολέβητα με την καμινάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ(*)

Βιβλία:

1. Εμμ. Κ. Κακαράς , <<Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί>>, Fountas.
2. Ηλία Κροντήρη , <<Ατμοηλεκτρική σταθμοί >>, Τόμος Β, Εκδόσεις ΙΩΝ.
3. Χριστ. Ν. Χριστοδούλου , <<Σημειώσεις λεβήτων>>, Αθήνα 1972.
4. Ανδρέας Γιαννόπουλος, <<Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί>>, Οδηγός Επίλυσης Ασκήσεων Πράξης, Ιων 2011.
5. Ν. Παπαγεωργίου << ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΙ Ι >>, Γενικές Αρχές, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 1991.

Ιστοσελίδες:

<http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi3321.html>

<http://aix.meng.auth.gr/lhtee/education/IAxBE7.pdf>

<http://www.allaboutenergy.gr/Stroviloi.html>

<http://www.allaboutenergy.gr/LigniteMakedonia.html>

http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/526/1/stamatisd_lignite.pdf

<http://sfrang.com/historia/selida626.htm>

http://www.eordaia.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1188-2010-12-20-19-09-08&catid=86

http://h2matters.weebly.com/uploads/8/3/3/8/8338743/mourouzis_thesis_final.pdf

http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/683/1/kalampokae_maintenance%20.pdf

http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4791/3/kokkinakosp_cogeneration.pdf

<http://www.lme.ntua.gr/repos/lessons/Atmostrobiloi2.pdf>

<http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5298/1/Final.pdf>

http://www.semfe.gr/files/notes/9/pyrinikh_texnologia-03.pdf

<http://logo1.comuv.com/downloads/Kinitires/7.Stathmoi%20paragwgis%20Hlektrikis%20Energeias.pdf>

http://books.eudoxus.gr/publishers/CID_00026/ziti-0051-ABS.pdf

http://library.tee.gr/digital/m2483/m2483_koroneos.pdf

http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4757/3/georgiadisa-sotirious_biomass.pdf

http://www.cres.gr/kape/education/ODHGOS_METRHSEON&ORGANON.pdf

<http://www.techwareeng.com/ProdWS.html>.

