



# Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας



## “Energy resources: Technologies & Management”

### “Τεχνολογίες καύσης άνθρακα”

**Δρ. Γεώργιος Σκόδρας**  
**Αν. Καθηγητής**



# Καύση άνθρακα



- Χαρακτηριστικά του άνθρακα που επηρεάζουν την καύση
- Εστίες καύσης
- Κλίβανοι κονιοποιημένου άνθρακα
- Κυκλώνες καύσης
- Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη



# Καύση άνθρακα



## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ

Η σύνθεση και οι ιδιότητες του άνθρακα επηρεάζουν όλες τις φάσεις της διεργασίας της καύσης, από την άλεση, μέχρι τον σχεδιασμό και την απόδοση των καυστήρων και των συστημάτων περιβαλλοντικού ελέγχου.

Στην περίπτωση των ανθράκων χαμηλής τάξης, η θερμαντική αξία, η περιεκτικότητα σε υγρασία και τέφρα αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες.



## ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η δομή των μακροπόρων του άνθρακα είναι ένας κύριος παράγοντας για τον προσδιορισμό της αντιδραστικότητας του εξανθρακώματος στις υψηλές θερμοκρασίες της καύσης, λόγω της περιορισμένης πρόσβασης με διάχυση στους μικρότερους πόρους. Έτσι, τα εξανθρακώματα των ανθράκων χαμηλής τάξης αντιδρούν γενικά ευκολότερα από ότι αυτά των ανθράκων υψηλότερης τάξης, λόγω του αυξημένου τους πορώδους.

Επιπλέον, η επίδραση της δομής του άνθρακα στην αντιδραστικότητα του εξανθρακώματος σχετίζεται με τις διαφορές στα ενεργά κέντρα, το εμβαδόν της επιφάνειας και την δομή των πόρων, οι οποίες απορρέουν από τις διεργασίες αποπτητικοποίησης.



## Δομή και πετρογραφική σύνθεση του άνθρακα

Είναι γνωστό ότι τα πετρογραφικά συστατικά του άνθρακα αντιδρούν διαφορετικά κατά την διάρκεια της καύσης.

Η παρατήρηση της καύσης μεμονωμένων σωματιδίων άνθρακα σε οπτικό μικροσκόπιο έχει δείξει ότι:

- σωματίδια πλούσια σε βιτρινίτη διαστέλλονται σχηματίζοντας κυψελοειδείς δομές, ενώ σωματίδια πλούσια σε φουσινίτη δεν δείχνουν τάσεις διαστολής,
- η διαστολή είναι μεγαλύτερη για άνθρακες με μέτρια περιεκτικότητα σε πτητικά, αλλά η έκτασή της επηρεάζεται από τον ρυθμό θέρμανσης και
- σωματίδια πλούσια σε βιτρινίτη έχουν ταχύτερο ρυθμό καύσης από ότι σωματίδια πλούσια σε φουσινίτη.

Τα φυτόκλαστα ινερτινίτη παραδοσιακά θεωρούνται μη δραστικά κατά την διεργασία. Όμως, η εμπειρία έχει δείξει ότι, κατά την καύση, τα φυτόκλαστα ινερτινίτη μερικών ανθράκων μπορεί να είναι δραστικά.



# Καύση άνθρακα



## Περιεκτικότητα σε οργανικά στοιχεία

Η περιεκτικότητα σε οργανικό οξυγόνο στους άνθρακες επηρεάζει τον **βαθμό αντιδραστικότητάς τους για καύση**.

Καθώς ο άνθρακας θερμαίνεται, επιτελείται ο διαχωρισμός αυτού του οξυγόνου από την οργανική μήτρα, αφήνοντας αντιδραστικές περιοχές για καύση. Καθότι οι άνθρακες χαμηλής τάξης έχουν σημαντικά περισσότερο οξυγόνο από τους άνθρακες υψηλότερης τάξης, και συνεπώς παράγουν έναν μεγαλύτερο αριθμό τέτοιων ενεργών περιοχών, οι άνθρακες αυτοί δεν απαιτούν τον ίδιο βαθμό κονιοποίησης σε λεπτά σωματίδια όσο οι ασφαλούχοι άνθρακες, για να εξασφαλισθεί η πλήρης καύση τους σε συστήματα κονιοποιημένου άνθρακα.



## Περιεκτικότητα σε οργανικά στοιχεία

Από την άλλη πλευρά, οι χαρακτηριστικές ομάδες οξυγόνου λειτουργούν σαν κέντρα δέσμευσης κατιόντων, όπως των κατιόντων του νατρίου, του μαγνησίου, του ασβεστίου και του καλίου. Έτσι, στους άνθρακες χαμηλής τάξης, τα ανόργανα στοιχεία, τα οποία συνδέονται με οργανικά, μπορούν να αποτελούν το 60% της συνολικής περιεκτικότητας του άνθρακα σε ανόργανη ύλη, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με άνθρακες υψηλότερης τάξης στην συμπεριφορά των συστατικών που δημιουργούν την τέφρα κατά την καύση.

**Το περιεχόμενο σε άζωτο** των ανθράκων χαμηλής τάξης δεν θεωρείται σαν ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό των εκπομπών NO<sub>x</sub> κατά την διάρκεια της καύσης, όταν και οι θερμοκρασίες της φλόγας είναι επίσης χαμηλές.



# Καύση άνθρακα



## Περιεκτικότητα σε υγρασία και πτητικά

Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία των ανθράκων χαμηλής τάξης μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα πάγου στα συστήματα διανομής, αποθήκευσης και εν γένει διαχείρισης, σε περιοχές όπου η θερμοκρασία τον χειμώνα κατέρχεται σε χαμηλά επίπεδα, αυξάνοντας ταυτόχρονα το κόστος μεταφοράς.

Όταν συνδυάζεται με υψηλή περιεκτικότητα σε αργιλικές ενώσεις, μπορεί να δημιουργήσει **προβλήματα επικάλυψης και έμφραξης των συστημάτων διαχείρισης και τροφοδοσίας**. Επίσης, καθιστά αναγκαία μία υψηλή θερμοκρασία πρωτογενούς αέρα για ξήρανση στους μύλους, περιορίζει τους ρυθμούς τροφοδοσίας των συσκευών κονιοποίησης και επιδρά στην αλεσιμότητα του άνθρακα.





## Περιεκτικότητα σε υγρασία και πτητικά

**Η υγρασία** μειώνει την θερμοκρασία των αερίων της καύσης κατά την διάρκεια της καύσης, αυξάνει τον όγκο και την ταχύτητα του απαιρίου και μεταφέρει χρήσιμη θερμότητα.

Έτσι, μία μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υγρασία μειώνει την θερμική αποδοτικότητα των λεβήτων και καθώς πρέπει να καούν μεγαλύτερες ποσότητες άνθρακα για να παράγουν ενέργεια για την εξάτμιση του ύδατος, αυξάνει τους ρυθμούς έκλυσης διοξειδίου του άνθρακα ανά κιλοβατώρα.

Στην περίπτωση των ανθράκων χαμηλής τάξης, απαιτούνται μεγαλύτεροι καυστήρες, ώστε να εξασφαλισθούν τα ίδια επίπεδα παραγωγής ενέργειας με αυτά που είναι επιτεύξιμα χρησιμοποιώντας άνθρακες υψηλότερης τάξης.



# Καύση άνθρακα



## Περιεκτικότητα σε υγρασία και πτητικά

Η πτητική ύλη είναι σημαντική για τον έλεγχο του καπνού και της ανάφλεξης. Άνθρακες με **χαμηλότερη περιεκτικότητα σε πτητικά καίγονται αργά** και η χρήση βοηθητικού καυσίμου, ή λεπτόκοκκου υλικού, είναι συχνά αναγκαία.

Η παραγωγή πτητικών είναι σημαντική για την **σταθεροποίησης της φλόγας**. Η παραγωγή καύσιμων πτητικών είναι χαμηλότερη στην περίπτωση των ανθράκων χαμηλής τάξης, από ότι για τους ασφατούχους άνθρακες. Σε έναν βιομηχανικό καυστήρα στροβίλου, για άνθρακες με περιεκτικότητα σε πτητικά μικρότερη από 30%, δεν είναι επιτεύξιμη σταθερή φλόγα αν ο κλίβανος έχει υδραυλωτά τοιχώματα, αλλά μόνο αν έχει πυρίμαχα τοιχώματα. Οι άνθρακες που χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση πτητικών επιτρέπουν την χρήση ενός μικρότερου καυστήρα για να πετύχουν την ίδια παραγωγή, σε σύγκριση με τους άνθρακες με χαμηλότερη απόδοση πτητικών. Επιπλέον, οι άνθρακες με υψηλή απόδοση πτητικών επιτρέπουν μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά τον σχεδιασμό του καυστήρα και τις συνθήκες λειτουργίας.



## Θερμαντική αξία

Η μικρή θερμαντική αξία των ανθράκων χαμηλής τάξης αυξάνει σημαντικά την ποσότητα καυσίμου που πρέπει να καεί, ώστε να διατηρηθεί σταθερός ο ρυθμός παραγωγής ατμού ή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο αριθμός και το μέγεθος των μύλων, το μέγεθος του κλιβάνου και όλος ο βοηθητικός εξοπλισμός πρέπει να είναι επίσης μεγαλύτερος, από ότι στην περίπτωση ανθράκων υψηλότερης τάξης, για τον χειρισμό ιδίων επιπέδων παραγωγής και για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ατμού. Η αύξηση του όγκου του άνθρακα, είναι πιθανόν να προξενήσει αύξηση της φθοράς των μηχανικών τμημάτων, λόγω αποξέσεων. Επίσης, θα παράγει μεγαλύτερες ποσότητες ιπτάμενης τέφρας, επηρεάζοντας την απόδοση των ηλεκτροστατικών συσκευών καθίζησης και των συστημάτων διαχείρισης ιπτάμενης τέφρας .



# Καύση άνθρακα



## Περιεκτικότητα σε τέφρα

Η τέφρα και η πτητική ανόργανη ύλη του άνθρακα, που παράγονται από την θερμική μετατροπή της ανόργανης ύλης, αποτελούν σημείο ιδιαίτερης προσοχής για την διεργασία καύσης σε κλιβάνους κονιοποιημένου άνθρακα.

Η ύλη αυτή, όχι μόνο συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές των καπνοδόχων, αλλά επίσης μειώνει την μεταφορά θερμότητας στον κλίβανο, τροποποιεί την ροή των αερίων και επικάθεται σε επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας, (με απότομη ή σταδιακή ψύξη των ανόργανων ενδιάμεσων ενώσεων), θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητα του συστήματος καύσης, εξαιτίας των έντονων φαινομένων διάβρωσης που προκαλούνται.



## Περιεκτικότητα σε τέφρα

Για παράδειγμα, η συγκέντρωση τέφρας στα τοιχώματα των σωληνώσεων του κλιβάνου μπορεί να μειώσει σημαντικά την ροή εναλλαγής θερμότητας διαμέσου της επιφάνειας των σωληνώσεων, προξενώντας υψηλές θερμοκρασίες των απαγομένων από τον κλίβανο αερίων και άτακτα υψηλές θερμοκρασίες ατμού στον υπερθερμαντήρα.

Επίσης, η συγκέντρωση τέφρας σε τοιχώματα σωλήνων μεταγωγής θερμότητας, μειώνει τις διαμέτρους τους, προξενώντας υψηλότερες ταχύτητες αερίων, πράγμα που επιταχύνει την διάβρωση των σωλήνων. Οι επικαθίσεις αυτές μειώνουν την ισχύ της μονάδας, αυξάνουν το κόστος συντήρησης και το κεφαλαιουχικό κόστος των νέων μονάδων, και κατ' αυτό τον τρόπο αυξάνουν το τελικό κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Κατά συνέπεια, οι μεγάλες εγκαταστάσεις πρέπει να μεριμνούν για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων.



# Καύση άνθρακα



## Περιεκτικότητα σε τέφρα

Η έκταση των προβλημάτων, που σχετίζονται με την τέφρα, εξαρτάται από την ποσότητα και τον τρόπο σύνδεσης αυτών των ανόργανων συστατικών στον άνθρακα, τις συνθήκες καύσης (θερμοκρασία, χρόνος παραμονής, δυναμική ρευστών, τοπικά περιβάλλοντα οξείδωσης και αναγωγής, κ.λπ) και την γεωμετρία του συστήματος.

Η σύνθεση της τέφρας επηρεάζει την θερμοκρασία αποσκλήρυνσής της, το ιξώδες και τις επικαθίσεις της τέφρας, χαρακτηριστικά σύντηξης, τα οποία επίσης καθορίζουν τον τρόπο απομάκρυνσής της υπό στερεά μορφή ή υπό μορφή ρευστής σκωρίας.

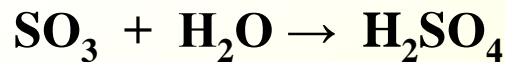
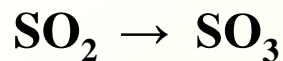
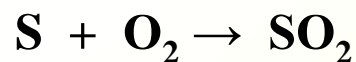


# Καύση άνθρακα



## Περιεκτικότητα σε θείο

Κατά την διάρκεια της καύσης, **το θείο που εμπεριέχεται στον άνθρακα** μπορεί να δημιουργήσει διάβρωση των επιφανειών των οικονομητών, των θερμαντήρων αέρα και άλλων αγωγών της μονάδας του λέβητα, δια μέσου του θειϊκού οξέος, που παράγεται από τις οργανικές και ανόργανες ενώσεις του θείου, μέσω των αντιδράσεων:





## Περιεκτικότητα σε θείο

Υπό φυσιολογικές συνθήκες καύσης, λιγότερο από 3% του  $\text{SO}_2$  οξειδώνεται σε  $\text{SO}_3$  και οι συγκεντρώσεις ατμών του θειϊκού οξέος στα καυσαέρια είναι γενικά χαμηλές (10-50ppm). Όμως, ακόμα και τόσο χαμηλά επίπεδα αυξάνουν το σημείο δρόσου, από το σημείο δρόσου του ύδατος  $38^\circ\text{C}$  έως  $49^\circ\text{C}$ , σε σημείο δρόσου του οξέος μεταξύ  $120^\circ\text{C}$  και  $175^\circ\text{C}$ . Αν η επιφανειακή θερμοκρασία ενός τμήματος του κλιβάνου είναι κάτω από την θερμοκρασία δρόσου, το σχετικά ισχυρό θειϊκό οξύ (70-90%) μπορεί να συμπυκνωθεί και να διαβρώσει σοβαρά αυτές τις επιφάνειες. Το θειϊκό οξύ μπορεί επίσης να αντιδράσει με ιπτάμενη τέφρα στον κλίβανο, για να σχηματίσει θειϊκά άλατα με νάτριο, κάλιο, αλουμίνιο ή/και σίδηρο, τα οποία περαιτέρω προωθούν την διάβρωση σε θερμοκρασίες ανώτερες του σημείου δρόσου του οξέος.





# Καύση άνθρακα



## Περιεκτικότητα σε θείο

Η παραγωγή τριοξειδίου του θείου, και συνεπώς και θειϊκού οξέος, τα οποία παράγονται από την διάσπαση των θειϊκών αλάτων στον άνθρακα, την οξείδωση του διοξειδίου του θείου με ατομικό οξυγόνο σε φλόγα ή/και από την οξείδωση του διοξειδίου του θείου που καταλύεται από τα οξείδια του σιδήρου που υπάρχουν συνήθως στις επιφάνειες των σωλήνων του λέβητα, μπορεί να μειωθεί με την παρουσία υδρατμών, την προσθήκη ενώσεων ικανών να αφαιρέσουν τα άτομα οξυγόνου ή την έγχυση ιπτάμενης τέφρας για επικάλυψη των σωλήνων του υπερθερμαντήρα.

Η σχετικά μικρή περιεκτικότητα σε θείο των ανθράκων χαμηλής τάξης, συνδυαζόμενη με την υψηλή αλκαλικότητα της τέφρας τους, παρουσιάζει μοναδικές ευκαιρίες για απομάκρυνση του διοξειδίου του θείου, τόσο στα συστήματα καύσης κονιοποιημένου άνθρακα, όσο και ρευστοστερεάς κλίνης, με ελάχιστη ή και καμία προσθήκη απορροφητικών υλικών, όπως ο ασβεστόλιθος.



## ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ

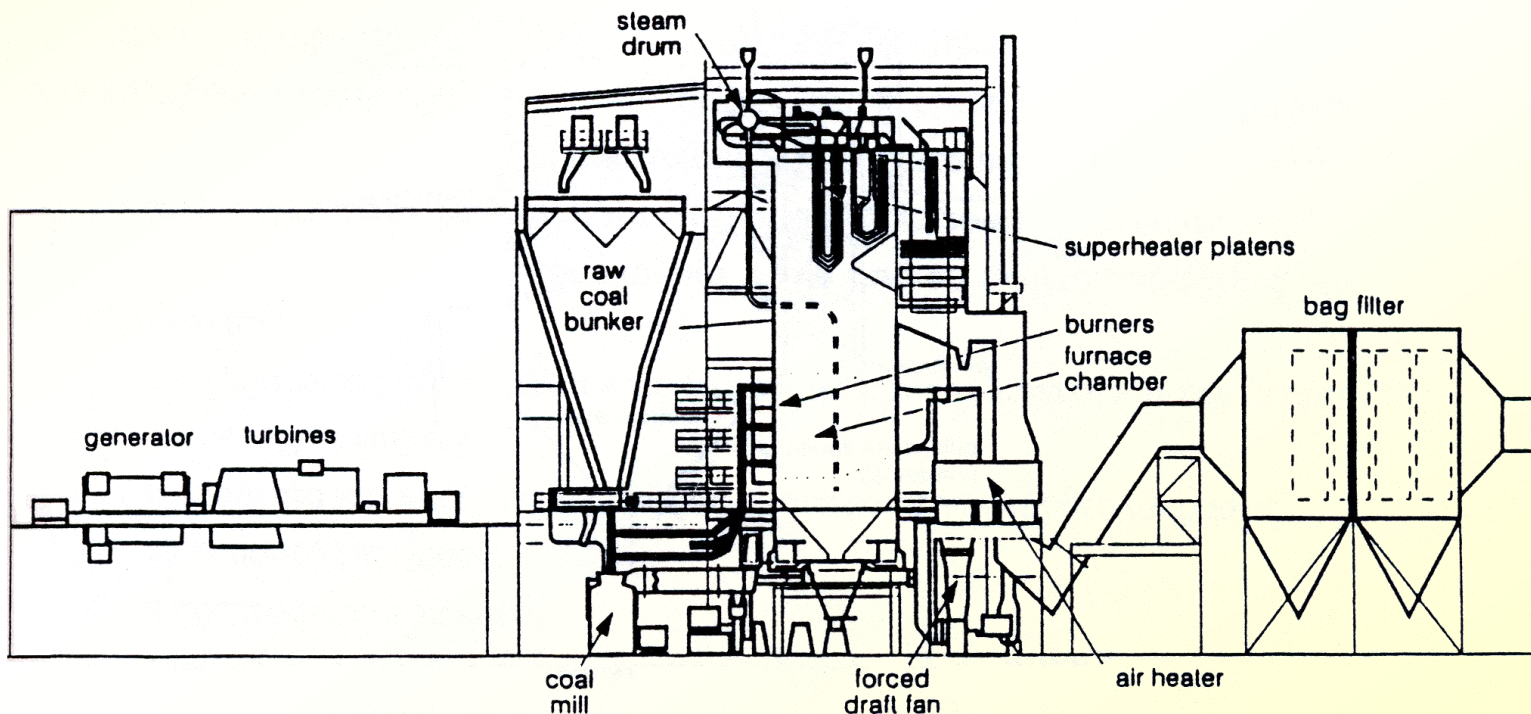
Η καύση του άνθρακα είναι μία σύνθετη σειρά διεργασιών και φυσικοχημικών δράσεων που δεν μπορούν να περιγραφούν από απλές εξισώσεις, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των ιδιοτήτων του άνθρακα. Γι' αυτό και ο σχεδιασμός εγκαταστάσεων καύσης ανθράκων βασίζεται κατά κύριο λόγο σε εμπειρικές μεθοδολογίες και πιλοτικές δοκιμές και είναι προσαρμοσμένος στο συγκεκριμένο καύσιμο.

Οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης στην τεχνολογία της καύσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: **την έρευνα σχετικά με το καύσιμο και την έρευνα σχετικά με τον εξοπλισμό**. Και οι δύο κατευθύνσεις έχουν ως στόχους σήμερα την επίτευξη συνεχούς, οικονομικής λειτουργίας των εγκαταστάσεων καύσης χωρίς την δημιουργία υγρής τέφρας και επικαθήσεων, την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών οξειδίων θείου και αζώτου και σωματιδίων προς το περιβάλλον.



## ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ

Η κλασική μέθοδος παραγωγής ενέργειας βασίζεται στη μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμική ενέργεια αερίων για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την κίνηση ατμοστροβίλων και ηλεκτρογεννητριών.



Τυπική διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση λιγνίτη



# Καύση άνθρακα



## ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ

Η εγκατάσταση αποτελείται από το τμήμα εξόρυξης, και αποθήκευσης του καυσίμου, την μονάδα προετοιμασίας (κονιοποίηση, ξήρανση, απομάκρυνση στείρων κλπ, εφόσον απαιτούνται από την μορφή του λέβητα), τον λέβητα καύσης, ατμοπαραγωγής και υπερθέρμανσης του ατμού, το τμήμα ηλεκτροπαραγωγής και το τμήμα επεξεργασίας και απομάκρυνσης καυσαερίων.

Η ποιότητα του αρχικού στερεού καυσίμου επηρεάζει την λειτουργία όλων των επιμέρους τμημάτων και διεργασιών. Είναι επομένως αναγκαία η "συνεργασία" όλων των διεργασιών και συσκευών για το κάθε καύσιμο.



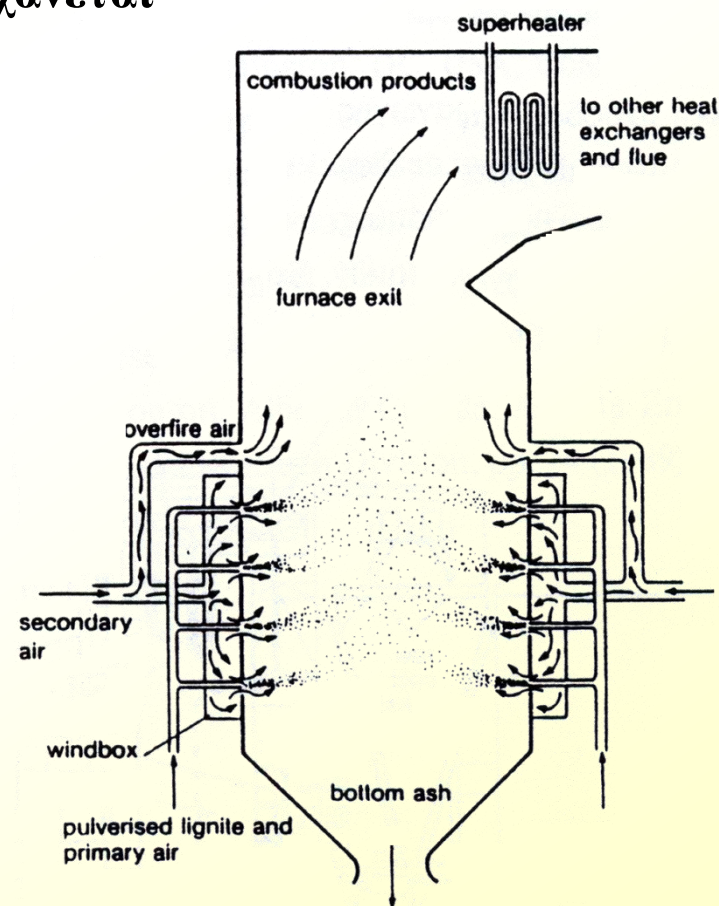
# Καύση άνθρακα

## ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ

Ο σχεδιασμός του λέβητα καύσης στοχεύει στην κατάλληλη διάταξη του εξοπλισμού καύσης και των επιφανειών εναλλαγής ώστε να επιτυγχάνεται βέλτιστος θερμικός βαθμός απόδοσης, υψηλή λειτουργικότητα επένδυσης και δαπανών λειτουργίας.

Οι καυστήρες στην περίμετρο των τοιχωμάτων εξασφαλίζουν άμεση ανάμιξη καυσίμου και αέρα, και ελέγχουν την κατανομή της φλόγας και των καυσαερίων ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή λειτουργία και αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας προς ατμαπαραγωγή.

Στα τοιχώματα του λέβητα υπάρχουν αυλοί για την εναλλαγή θερμότητας και την παραγωγή ατμού.



Λέβητας καύσης κονιοποιημένου λιγνίτη



# Καύση άνθρακα



## ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ

Τα καυσαέρια ψύχονται περαιτέρω πάνω από την ζώνη καύσης, όπου η θερμοκρασία έχει μειωθεί και οι συνθήκες ροής έχουν ομαλοποιηθεί, και αμέσως μετά την έξοδο του λέβητα, στην ζώνη υπερθέρμανσης του ατμού. Για την ανάκτηση επιπλέον θερμότητας από τα προϊόντα της καύσης χρησιμοποιούνται ακόμη αναθερμαντής ατμού, οικονομητής για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας και προθερμαντής του τροφοδοτούμενου αέρα καύσης. Τέλος, ακολουθεί κατεργασία των καυσαερίων με σκοπό τον περιορισμό των εκπομπών σωματιδίων και των οξειδίων αζώτου (NO<sub>x</sub>) και θείου (SO<sub>x</sub>).



## ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ

Ένα ιδανικό σύστημα καύσης θα έπρεπε να ικανοποιεί τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ασφαλής και εύκολα ελεγχόμενη λειτουργία
- ελάχιστη απαίτηση περίσσειας αέρα (οξυγόνου)
- πλήρης καύση καυσίμου
- εύκολη ανάφλεξη
- ευρύ φάσμα σταθερών συνθηκών καύσης
- σταθερή και ελεγχόμενη κατανομή θερμότητας στις επιφάνειες εναλλαγής  
γρήγορη απόκριση στις μεταβολές του ρυθμού καύσης ή της τροφοδοσίας  
καυσίμου
- ελάχιστες απαιτήσεις κατεργασίας καυσαερίων για SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και σωματίδια
- αποτελεσματική απομάκρυνση της τέφρας
- μεγάλο βαθμό διαθεσιμότητας του εξοπλισμού
- ελάχιστη συντήρηση.



# Καύση άνθρακα



## ΕΣΤΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

Οι βιομηχανικές εστίες καύσης είναι το παλαιότερο (εφαρμόζεται πάνω από 200 χρόνια) και πλέον διαδεδομένο είδος εξοπλισμού, το οποίο χρησιμοποιείται για την καύση του άνθρακα σε κλίνες καυσίμου.

Πρόσφατα, η χρήση των εστιών καύσης μειώθηκε και αντικαταστάθηκε από συστήματα ρευστοστερεάς κλίνης.





# Καύση άνθρακα



## ΕΣΤΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

Οι εστίες καύσης μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα μεγάλο εύρος τύπων στερεών καυσίμων.

Οι λιγνίτες καίγονται καλά σε εστίες μαζικής καύσης, παρά την υψηλή τους περιεκτικότητα σε υγρασία. Το μέγιστο μέγεθος σωματιδίων για λιγνίτες είναι τα 32mm. Κανονικά, τα όποια λεπτά σωματίδια που παράγονται κατά την θραύση θα έπρεπε να παραμένουν στο καύσιμο. Όμως, όταν η περιεκτικότητα των λιγνιτών σε υγρασία είναι 36-40%, το μέγεθος των σωματιδίων πρέπει να περιορίζεται μεταξύ 19-32mm. Δυστυχώς, ένας κλίβανος λιγνίτη δεν μπορεί να έχει ένα τόσο θερμό τόξο, όσο ένας κλίβανος που χρησιμοποιεί ασφαλτούχο άνθρακα. Έτσι, για καλή ανάφλεξη σε ένα κλίβανο λιγνίτη, είναι επίσης σημαντικό να γίνει εκμετάλλευση της επαγωγικής μεταφοράς θερμότητας από τα θερμά αέρια.



# Καύση άνθρακα



## ΕΣΤΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

Οι απαιτήσεις σε ενέργεια των εστιών καύσης είναι χαμηλές. Όμως, οι απώλειες άνθρακα (4%-8%) σε τέτοιες μονάδες είναι σημαντικές.

Όταν γίνεται η επιλογή μίας εστίας καύσης, πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη οι ενεργειακές απαιτήσεις, οι μεταβολές της τροφοδοσίας και η διαθεσιμότητα κατάλληλων καυσίμων.

Παρά τις μικρότερες απαιτήσεις σε κονιοποίηση, διατάξεις εστιών που τροφοδοτούνται με μεγάλα κομμάτια άνθρακα δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (100--600 MW).



# Καύση άνθρακα



## ΕΣΤΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

Οι εστίες καύσης ταξινομούνται με βάση την μέθοδο τροφοδοσίας του καυσίμου στο φούρνο και τον τύπο της σχάρας. Οι κύριοι τύποι εστιών είναι:

- Διασκορπισμού
- Αλυσωτής (Κινούμενης) σχάρας
- Δονούμενης σχάρας
- Τροφοδοσίας από κάτω



# Καύση άνθρακα



## ΕΣΤΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

Γενικά, ο τύπος της εστίας επιλέγεται με βάση την δυναμικότητα του λέβητα, την ευαισθησία της σε διακυμάνσεις της τροφοδοσίας και τις ιδιότητες του άνθρακα που πρόκειται να καεί. Οι ιδιότητες του άνθρακα που κύρια επηρεάζουν την λειτουργία της εστίας είναι:

- ✓ Περιεχόμενη υγρασία
- ✓ Ποσοστό λεπτόκοκκων σωματιδίων άνθρακα
- ✓ Ευθρυπτότητα
- ✓ Θερμικό περιεχόμενο
- ✓ Θερμοκρασία τήξης τέφρας
- ✓ Ανόργανα συστατικά
- ✓ Λόγος πτητικών/ μόνιμο άνθρακα
- ✓ Τάση συσσωμάτωσης.



# Καύση άνθρακα



## ΕΣΤΙΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

### Χαρακτηριστικά εστιών καύσης

Παράμετρος Σχεδιασμού / Λειτουργίας	Εστία Διασποράς	Αλυσωτής και Κινούμενης Εσχάρας	Με Τροφοδοσία από Κάτω
Γρήγορη απόκριση σε αλλαγές φορτίου	Αριστη	Μέτρια	Μέτρια
Ελαχιστοποίηση απώλειας άνθρακα	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Αποφυγή στρωματοποίησης γαιάνθρακα	Μέτρια	Φτωχή	Φτωχή
Χρησιμοποιεί μεγάλη ποικιλία γαιανθράκων	Αριστη	Φτωχή	Φτωχή
Καίει εξαιρετικά λεπτόκοκκους γαιάνθρακες	Φτωχή	Φτωχή	Φτωχή
Επιτρέπει την άκαπνη καύση σε όλα τα μεγέθη φορτίου	Φτωχή	Καλή	Καλή
Ελαχιστοποιεί την εκπομπή ιπτάμενης τέφρας	Φτωχή	Καλή	Καλή
Ελαχιστοποιεί την συντήρηση	Καλή	Καλή	Μέτρια
Ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας	Καλή	Καλή	Καλή
Χειρίζεται την τέφρα εύκολα	Αριστη	Καλή	Μέτρια



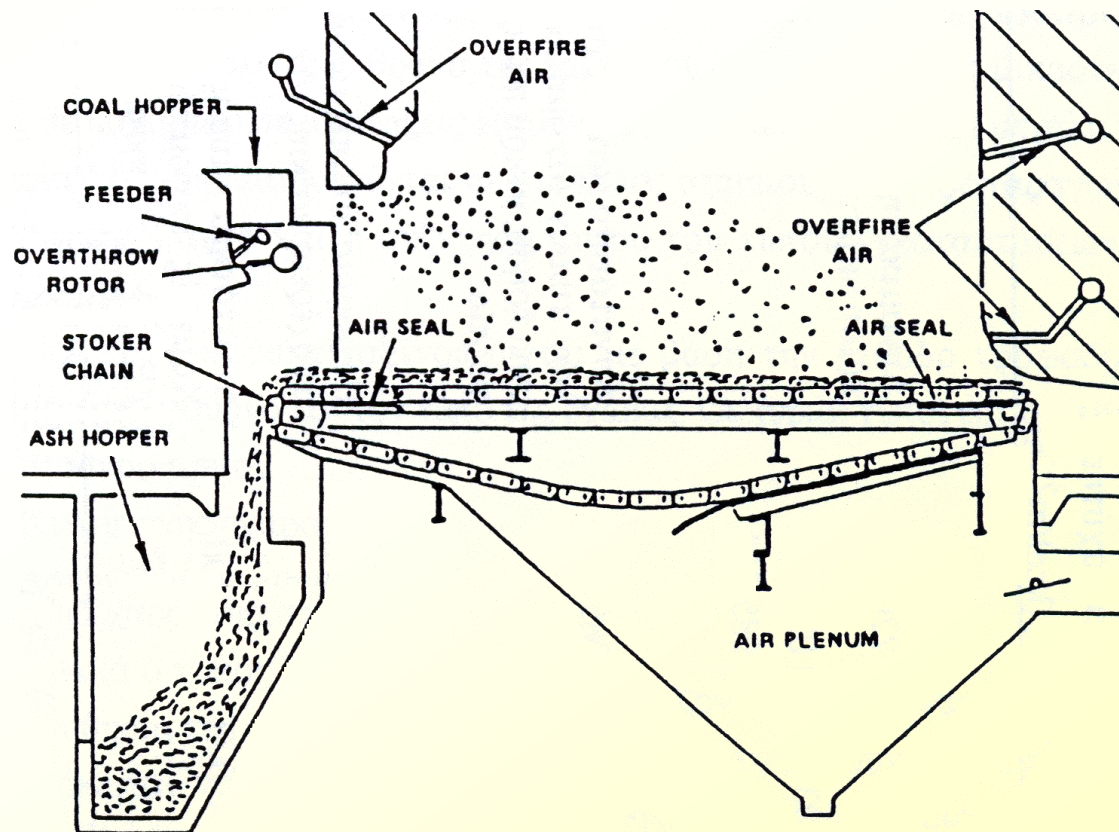
# Καύση άνθρακα

## Εστίες διασποράς

Οι εστίες διασποράς είναι οι πλέον διαδεδομένοι τύποι εστιών, επειδή είναι κατάλληλες για την καύση ενός μεγάλου εύρους ανθράκων, από ασφαλτούχους μέχρι λιγνίτες.

Ο άνθρακας ρίπτεται και απλώνεται πάνω σε όλη την επιφάνεια της σχάρας, με μηχανικούς τροφοδότες. Τα αιωρούμενα λεπτά σωματίδια του άνθρακα καίγονται σε διασπορά ενώ τα μεγαλύτερα σωματίδια άνθρακα πέφτουν στη σχάρα όπου καίγονται σε μια λεπτή κλίνη γρήγορης καύσης.

Δεδομένου ότι η ανάφλεξη είναι σχεδόν ακαριαία, η μέθοδος παρουσιάζει καλή προσαρμογή στις διακυμάνσεις της τροφοδοσίας.



Εστία διασποράς



# Καύση άνθρακα



## Εστίες διασποράς

Μία τυπική εγκατάσταση συνίσταται σε μονάδες τροφοδοσίας-κατανομής, σχάρες ψυχόμενες με αέρα, φυσητήρες εξαναγκασμένης ροής αέρα, τόσο για τροφοδοσία του αέρα πάνω από την εσχάρα όσο και κάτω από την εσχάρα, συστήματα συλλογής της σκόνης και συστήματα ελέγχου της καύσης, για τον συντονισμό της τροφοδοσίας του καυσίμου και του αέρα ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου.

Οι μικρότερες μονάδες χρησιμοποιούν εσχάρες ψυχόμενες με ύδωρ, ενώ οι μεγαλύτερες χρησιμοποιούν εσχάρες συνεχούς απορροής.



# Καύση άνθρακα



## Εστίες διασποράς

Η εστία διασποράς χρησιμοποιείται συνήθως για δυναμικότητες μέχρι και 45 τόνων ατμού την ώρα. Έχει μεγάλη διαθεσιμότητα, απλότητα λειτουργίας και μεγάλη λειτουργική αποδοτικότητα. Από την άλλη πλευρά, έχει μεγάλο ποσοστό δημιουργίας ιπτάμενης τέφρας και απώλειας θερμότητας καυσίμου. Η επανεισαγωγή του άκαυστου καυσίμου στον κλίβανο μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητά του κατά 2-3%.

Επίσης, ο διαχωρισμός των μεγεθών των σωματιδίων του άνθρακα μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα, όταν τα λεπτά και τα χονδρά σωματίδια δεν κατανέμονται ομοιόμορφα πάνω στην σχάρα, με αποτέλεσμα την παραγωγή μίας ακανόνιστης φλόγας και χαμηλής αποδοτικότητας. Γενικά, συνιστάται ένα μέγεθος άνθρακα που κυμαίνεται μεταξύ 0mm και 20mm, όταν το φορτίο του λέβητα είναι σχετικά σταθερό.





# Καύση άνθρακα



## Εστίες διασποράς

Οι εστίες διασκορπισμού είναι σχεδιασμένες για καύση του 50% του καυσίμου σε διασπορά με συνέπεια την δημιουργία μεγαλύτερων ποσοτήτων σκόνης σε σχέση με άλλες εστίες. Για τον περιορισμό των απωλειών άνθρακα χρησιμοποιούνται συστήματα επαναφοράς του ιπτάμενου άνθρακα στον λέβητα, καθώς και συλλογή της ιπτάμενης τέφρας. Η μέθοδος αυτή αυξάνει τις εκπομπές σωματιδίων από τον λέβητα και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν υπάρχουν συστήματα κονιοσυλλεκτών πολύ υψηλής απόδοσης.



# Καύση άνθρακα



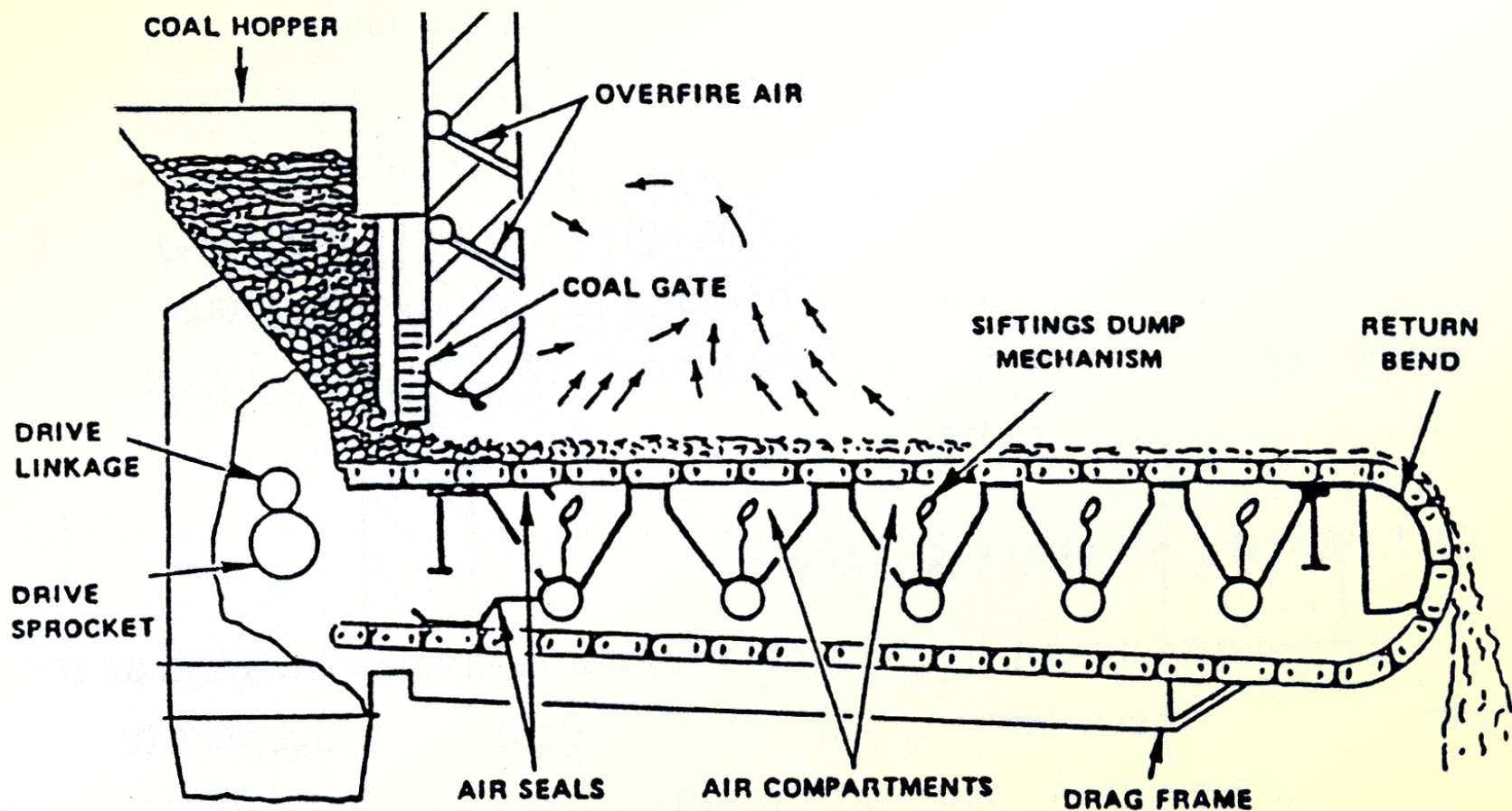
## Εστίες διασποράς

Οι εστίες διασκορπισμού μπορούν να συνδυάζονται με στατικές, δονούμενες ή κινούμενες σχάρες για συνεχή απομάκρυνση της τέφρας. Όσες εστίες διαθέτουν κινούμενες σχάρες είναι σε θέση να κάψουν υλικό με ευρύ φάσμα ιδιοτήτων. Οι εστίες διασκορπισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άνθρακες που παρουσιάζουν τάσεις συσσωμάτωσης καθώς η γρήγορη επιφανειακή θέρμανση των σωματιδίων άνθρακα σε διασπορά παρεμποδίζει τη συσσωμάτωση. Βιτουμινικοί άνθρακες και λιγνίτες υψηλής υγρασίας καίγονται άνετα σε εστίες διασκορπισμού, ενώ υπολείμματα κωκ απαιτούν ανάμιξη με άνθρακα πλούσιο σε πτητικά. Οι ανθρακίτες, οι οποίοι έχουν χαμηλό ποσοστό πτητικών δεν είναι κατάλληλο καύσιμο για τις εστίες αυτές.



# Καύση άνθρακα

## Εστίες Αλυσωτής (κινούμενης) σχάρας



Εστία αλυσωτής σχάρας



# Καύση άνθρακα



## Εστίες Αλυσωτής (κινούμενης) σχάρας

Σε μία εστία αλυσωτής σχάρας, ο άνθρακας τροφοδοτείται από χοάνες στην σχάρα, η οποία αποτελείται από μία ατέρμονη αλυσίδα που εκτείνεται μέσα στον κλίβανο. Η οριζόντια κίνηση της σχάρας μεταφέρει τον άνθρακα μέσα στον θάλαμο καύσης, όπου η πάνω επιφάνειά του αναφλέγεται από ακτινοβολία, από ένα θερμό πυρίμαχο τόξο. Το μέτωπο της φλόγας κινείται στην συνέχεια προς τα κάτω δια μέσου της κλίνης άνθρακα, ενώ ο αέρας κινείται προς τα πάνω.

Η κλίνη σταδιακά λεπταίνει συνεχώς, καθώς η καύση συνεχίζεται και καθώς η σχάρα γυρίζει για την διαδρομή επιστροφής, η υπολειμματική τέφρα πέπτει σε ένα δοχείο. Αν χρησιμοποιηθεί έγχυση αέρα από πάνω για την συμπλήρωση της καύσης των πτητικών αερίων, μπορούν να επιτευχθούν υψηλότεροι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας, από ότι επιτρέπεται με την χρήση ενός τόξου.



# Καύση άνθρακα



## Εστίες αλυσωτής (κινούμενης) σχάρας

Οι εστίες καύσης αλυσωτής σχάρας χαρακτηρίζονται από μικρές ποσότητες ιπτάμενης τέφρας. Έχουν την δυνατότητα να κάψουν διάφορα καύσιμα όπως τύρφη, λιγνίτη, υποβιτουμινικό και βιτουμινικό άνθρακα, ανθρακίτη και κωκ, υπό την προϋπόθεση ότι το καύσιμο έχει το κατάλληλο μέγεθος κόκκων.

Το μέγιστο μέγεθος του άνθρακα θα πρέπει να είναι κατά προτίμηση περίπου 30-50mm. Ένα κάπως μεγαλύτερο μέγεθος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση των ανθράκων χαμηλής τάξης, επειδή αυτοί αναφλέγονται εύκολα και καίγονται ελεύθερα. Όμως, για λιγνίτες με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (35-40%) το μέγιστο μέγεθος θα πρέπει να είναι στην περιοχή των 20mm με 25mm.

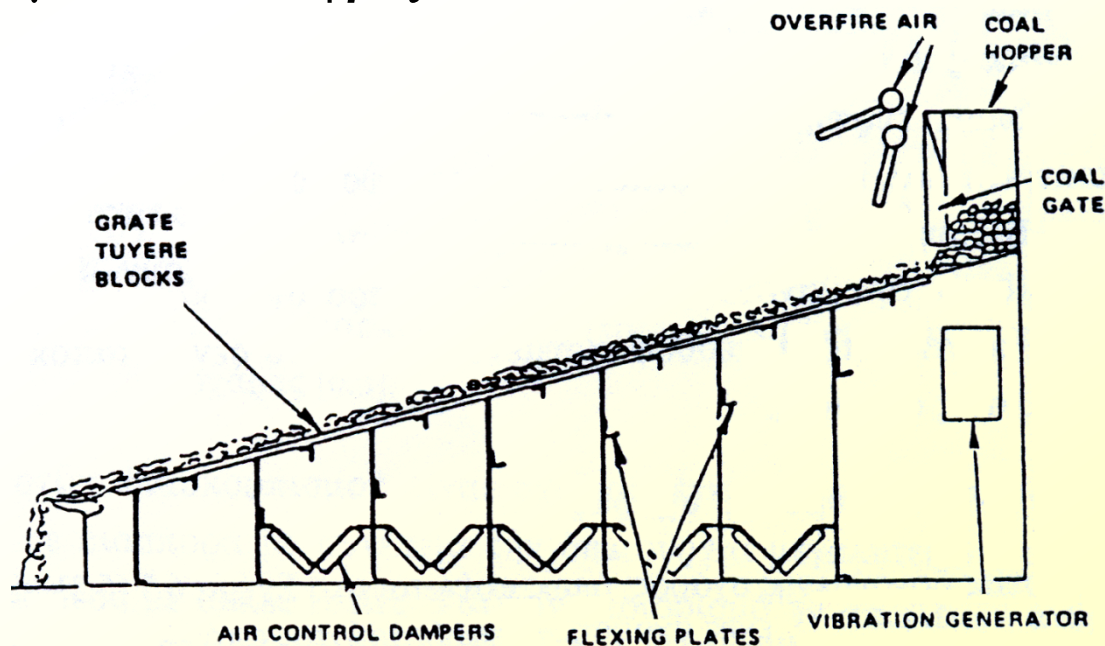


# Καύση άνθρακα

## Εστίες δονούμενης σχάρας

Σε μία εστία καύσης δονούμενης σχάρας ολόκληρη η δομή υποστηρίζεται από έναν αριθμό ελαστικών πλακών, επιτρέποντας στο πλέγμα και στην σχάρα του να κινούνται ελεύθερα με μία παλμική κίνηση, η οποία μεταφέρει τον άνθρακα από την χοάνη τροφοδοσίας στην σχάρα και σταδιακά στο πίσω μέρος της εστίας. Η τέφρα απορρίπτεται αυτόματα σε ένα ρηχό ή υπόγειο λάκκο τέφρας.

Οι σχάρες είναι υδρόψυκτες και η δόνησή τους είναι ασυνεχής. Η συχνότητα της δόνησης ρυθμίζεται από ένα μηχάνημα χρονισμού, το οποίο με την σειρά του ρυθμίζεται από το σύστημα αυτόματου ελέγχου της καύσης, ώστε να συμμορφώνεται με τις εναλλαγές του φορτίου, συγχρονίζοντας την τροφοδοσία του καυσίμου με την τροφοδοσία του αέρα.



Εστία δονούμενης σχάρας



## Εστίες δονούμενης σχάρας

Η υδρόψυκτη εστία δονούμενης σχάρας προτιμάται για την απλότητά της, την μικρή ποσότητα ιπτάμενης τέφρας που εκπέμπει, τις μικρές ανάγκες συντήρησης, την καταλληλότητά της για καύση πολλαπλών καυσίμων, καθώς και ενός μεγάλου εύρους ανθράκων από ασφαλούχους μέχρι λιγνίτες.

Είναι κατάλληλη για την καύση ευρέος φάσματος βιτουμινικών ανθράκων και λιγνιτών. Ακόμη και συσσωματούμενοι άνθρακες καίγονται ικανοποιητικά, επειδή οι δονήσεις δημιουργούν ένα σταθερό στρώμα καυσίμου χωρίς διάκενα.

Η σταθερότητα της κατανομής του αέρα και του καυσίμου, σε αυτόν τον τύπο εστίας, εξασφαλίζει την καλή ανταπόκριση των συστήματος σε εναλλαγές φορτίου και λειτουργίας, χωρίς την παραγωγή καπνού.



# Καύση άνθρακα



## Εστίες με τροφοδοσία κάτω από την σχάρα

Οι πιο μικρές εστίες καύσης, με τροφοδοσία από κάτω, χρησιμοποιούν μονούς και διπλούς στενούς αγωγούς. Σε αυτούς, ο άνθρακας τροφοδοτείται από ένα κοχλία ή ένα έμβολο και η τέφρα συνήθως απάγεται με πλάγιες σχάρες απόρριψης. Οι μεγαλύτερες εστίες καύσης, με τροφοδοσία από κάτω, χρησιμοποιούν τους πολλαπλούς στενούς αγωγούς, με κλίση που κυμαίνεται από 25° έως 30°, για να υποβοηθήσουν την ροή του άνθρακα και της τέφρας. Η τέφρα απάγεται είτε συνεχώς, είτε κατά διαστήματα.

Το μέγεθος του άνθρακα τροφοδοσίας των εστιών καύσης, με τροφοδοσία από κάτω, πρέπει να είναι μικρότερο από 30mm. Μία μείωση του ποσοστού των λεπτών σωματιδίων επιτρέπει να παραμείνει η κλίση πορώδης και εκτείνει το εύρος λειτουργίας σε άνθρακες με υψηλό δείκτη ελεύθερης διόγκωσης.





# Καύση άνθρακα



## Εστίες με τροφοδοσία κάτω από την σχάρα

Οι εστίες καύσης με τροφοδοσία από κάτω είναι προβληματικές, όσον αφορά στην καύση ανθράκων με ιδιότητες ισχυρής οπτανθρακοποίησης, ασφαλούχων ανθράκων με χαμηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και υποασφαλούχων ανθράκων με ελεύθερη τέφρα, επειδή η σχάρα υπερθερμαίνεται.

Από την άλλη πλευρά, επιτυγχάνουν «καθαρή» και άκαπνη καύση και μικρό ποσοστό εκπομπής ιπτάμενης τέφρας. Η άκαπνη καύση οφείλεται στο ότι η τροφοδοσία του άνθρακα γίνεται κάτω από την ζώνη καύσης. Τα πτητικά διαφεύγουν από τον άνθρακα τροφοδοσίας, ρέουν προς τα πάνω δια μέσου της ζώνης καύσης και καίγονται σχεδόν πλήρως, ενώ διέρχονται διαμέσου της ζώνης.

Οι εστίες καύσης με τροφοδοσία από κάτω αντικαθίστανται, σταδιακά, από εστίες διασποράς και εστίες καύσης δονούμενης σχάρας.



# Καύση άνθρακα



## ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Το σύνολο σχεδόν των θερμοηλεκτρικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που βασίζεται σε στερεά καύσιμα χρησιμοποιεί κονιοποιημένο άνθρακα. Η δυνατότητα καύσης μεγάλης ποικιλίας ανθράκων, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα οδήγησαν στην παγκόσμια υιοθέτηση του συστήματος αυτού.

Η τεχνική αυτή αποτρέπει την ανάγκη σχάρας υποστήριξης, απαλείφοντας τους περιορισμούς του μεγέθους του εξοπλισμού και επιτρέπει την ικανοποιητική καύση πρακτικά οποιουδήποτε άνθρακα. Επίσης, δεδομένου ότι εκλύει ουσιαστικά περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου καύσης, χρησιμοποιείται για παραγωγή ατμού με ρυθμούς μεγαλύτερους από 135 t/h.



# Καύση άνθρακα



## ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Στην μέθοδο αυτή ο άνθρακας κονιοποιείται σε λεπτά σωματίδια. Το κονιοποιημένο καύσιμο μεταφέρεται στους καυστήρες μέσα σε ρεύμα αέρα και εμφυσάται μέσα στον λέβητα όπου καίγεται σε διασπορά. Η κονιοποίηση του άνθρακα πριν την καύση διασφαλίζει την επίτευξη σχεδόν πλήρους καύσης με την ελάχιστη δυνατή περίσσεια αέρα και για χρόνο παραμονής ολίγων δευτερολέπτων.

Η απομένουσα τέφρα μετά την καύση βρίσκεται στα απαέρια υπό μορφή λεπτής σκόνης και είτε αποτίθεται στα τοιχώματα και τους αυλούς και στη συνέχεια πέφτει στον πυθμένα του φούρνου από όπου απομακρύνεται, είτε παρασύρεται από τα καυσαέρια σαν ιπτάμενη τέφρα που πρέπει να απομακρυνθεί με σακκόφιλτρα ή ηλεκτρόφιλτρα.



## ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Τα κύρια πλεονεκτήματα της καύσης του κονιοποιημένου άνθρακα είναι

- η υψηλή αποδοτικότητα (αποδοτικότητα μονάδας μέχρι 55% περίπου είναι επιτεύξιμη σε συνδυασμό με εξαιρετικά υπερκρίσιμες συνθήκες ατμού, μέχρι 700°C),
- η απλότητα του μηχανικού συστήματος, που συνεπάγεται υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα,
- η προσαρμοστικότητα της μεθόδου για όλες τις τάξεις άνθρακα,
- η δυνατότητα διατήρησης συγκριτικά σταθερού θερμικού φορτίου στο λέβητα
- ο πλήρης αυτοματισμός και
- η άριστη δυνατότητα αύξησης του μεγέθους της μονάδας.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας για την κονιοποίηση του άνθρακα, τα υψηλά επίπεδα σωματιδιακών εκπομπών και τα υψηλά επίπεδα εκπομπών SO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>.



## ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι κλίβανοι κονιοποιημένου άνθρακα ταξινομούνται συνήθως, ανάλογα με την μέθοδο απομάκρυνσης της τέφρας, σε

- κλιβάνους "ξηρού πυθμένα" (dry bottom) και
- κλιβάνους "υγρού πυθμένα" (wet bottom)



## ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι κλίβανοι "ξηρού πυθμένα" είναι απλούστεροι, πιο ευέλικτοι σχετικά με το εύρος φορτίου και τις ιδιότητες του άνθρακα και πιο αξιόπιστοι από τους κλιβάνους "υγρού πυθμένα". Όμως, για να έχουν την ίδια δυναμικότητα είναι μεγαλύτεροι (άρα και πιο δαπανηροί) και το 80-90% της τέφρας εξάγεται από τον κλίβανο σαν ιπτάμενη τέφρα, η οποία πρέπει να απομακρυνθεί στις ηλεκτροστατικές συσκευές καθίζησης.

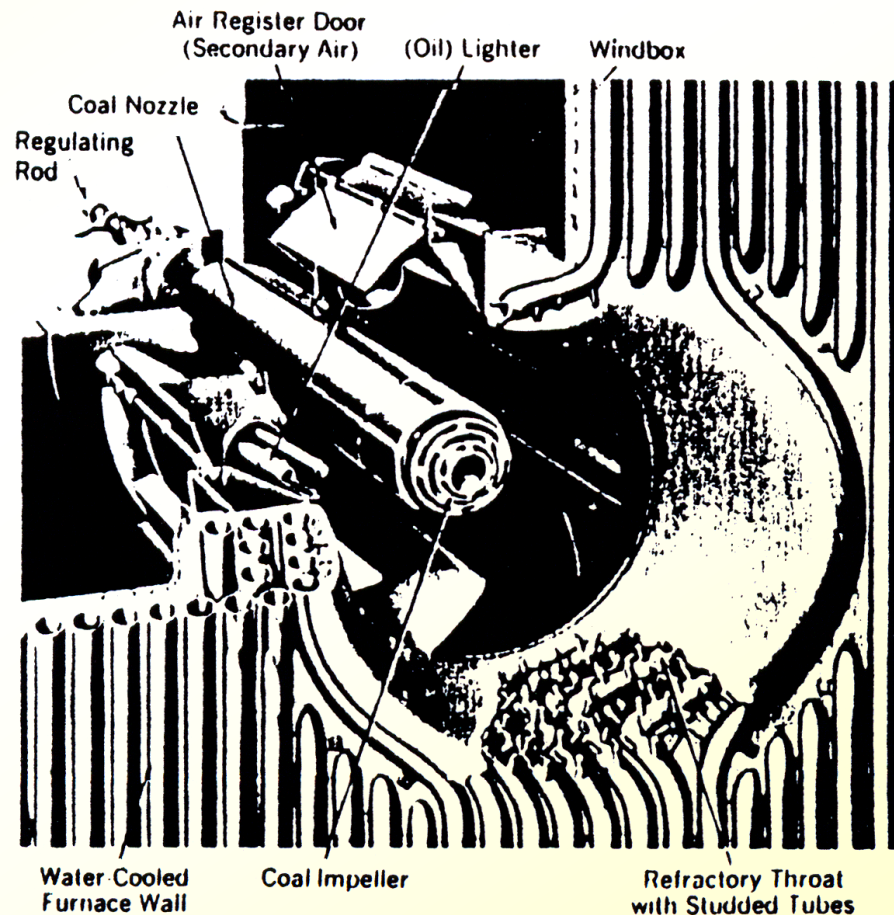
Το ενδιαφέρον, που οδήγησε στην ανάπτυξη κλιβάνων "υγρού πυθμένα", ήταν η αποφυγή του προβλήματος διάθεσης της σκόνης, κατά το μέγιστο δυνατόν. Η τηγμένη τέφρα που ρέει από τον κλίβανο ψύχεται με ύδωρ και ανάγεται σε ένα χονδροκομμένο, κοκκώδες στερεό. Σε μερικούς σχεδιασμούς έχουν επιτευχθεί επίπεδα κατακράτησης τέφρας μεγαλύτερα από 80%. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιούνται υψηλότεροι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας, σε μια προσπάθεια μείωσης του μεγέθους του εξοπλισμού.



## ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι εγκαταστάσεις καύσης κονιοποιημένου άνθρακα διαφοροποιούνται συχνά ως προς τον τρόπο τοποθέτησης των καυστήρων στον λέβητα.

Η επιλογή της μεθόδου καύσης και της αντίστοιχης διάταξης του καυστήρα εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθος και τον τύπο του λέβητα.



Κυλινδρικός καυστήρας Babcock and Wilcox για κονιοποιημένο άνθρακα



## ΚΛΙΒΑΝΟΙ ΚΟΝΙΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Οι κλίβανοι κονιοποιημένων ανθράκων μπορούν να λειτουργήσουν με ένα ευρύ φάσμα ανθράκων από ανθρακίτες μέχρι λιγνίτες, αν και οι εγκαταστάσεις βιτουμινικών ανθράκων είναι οι πλέον διαδεδομένες.

Οι πιο σημαντικές λειτουργικές παράμετροι που σχετίζονται με το καύσιμο είναι:

- ✓ (α) η ανάπτυξη και η σταθερότητα της φλόγας και
- ✓ (β) οι ιδιότητες της τέφρας.

Ανάφλεξη επιτυγχάνεται με χρήση καυσίμων που περιέχουν κατ' ελάχιστο 20% πτητικά, και με προθέρμανση του αέρα καύσης. Οι ιδιότητες της τέφρας επηρεάζουν τόσο την διαχείριση της τέφρας όσο και τα χαρακτηριστικά των αποθέσεων. Οι επικαθήσεις τέφρας είναι σημαντικά μεγαλύτερο πρόβλημα στις μονάδες καύσης κονιοποιημένου άνθρακα σε σχέση με τις εστίες καύσης.





# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «ξηρού» πυθμένα

Στην καύση ξηρού πυθμένα, ο ιδανικός κλίβανος είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε οι φλόγες να καθαρίζουν τα τοιχώματα, σχεδόν "σκουπίζοντάς" τα.

Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κοντά στα τοιχώματα προξενούν λίγη ή και καθόλου σύντηξη της τέφρας και τα προϊόντα της καύσης ψύχονται αρκετά πριν εγκαταλείψουν τον κλίβανο, για να αποφευχθεί προβληματική προσκόλληση της τέφρας στα τοιχώματα των σωλήνων απαγωγής.

Αυτή η ιδανική κατάσταση σπάνια επιτυγχάνεται, και οι περισσότερες πραγματικές μονάδες υπόκεινται σε επισκωριώσεις ή/και επικαθίσεις στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας.



# Καύση άνθρακα

## Κλίβανοι «ξηρού» πυθμένα

(a) οριζόντια (εμπρόσθια ή οπίσθια)

(b) αντίθετη οριζόντια

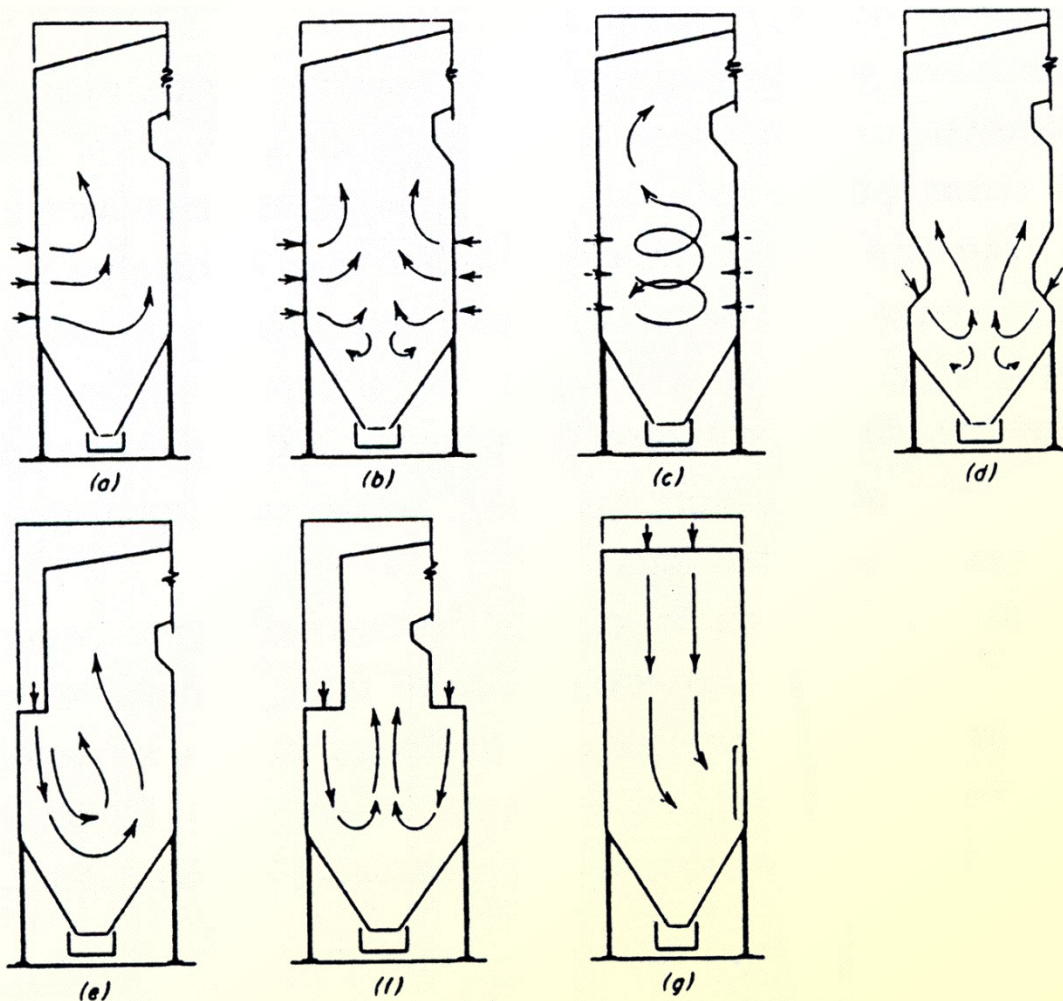
(c) επαπτομενική

(d) αντίθετη κεκλιμένη

(e) μονή φλόγα τύπου U

(f) διπλή φλόγα τύπου U

(g) κατακόρυφη



Διατάξεις κλιβάνων και καυστήρων «ξηρού» πυθμένα



# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «ξηρού» πυθμένα

Στους τύπους κλιβάνων **οριζόντιας και αντιθέτως οριζόντιας ροής**, τα μείγματα άνθρακα-αέρα εμφυσούνται στις απέναντι πλευρές του θαλάμου φλόγας και προσκρούουν το ένα επάνω στο άλλο, κοντά στο κέντρο του κλιβάνου.

Σε αυτές τις διατάξεις, η ανάφλεξη γίνεται συνήθως από κυκλικούς καυστήρες τυρβώδους ροής, που είναι ομοιόμορφα διατεταγμένοι στο πλάτος του κλιβάνου, είτε στο μπροστινό, είτε στο πίσω τοίχωμα, ή και στα δύο. Κάθε καυστήρας έχει την δική του, σχετικά αυτόνομη φλόγα και σημείο ανάφλεξης. Το σύστημα καύσης είναι δυνατόν να σχεδιαστεί έτσι ώστε κάθε καυστήρας να συντηρείται, να ρυθμίζεται ή/και να αποσυνδέεται για συντήρηση ανεξάρτητα από τους άλλους.



# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «ξηρού» πυθμένα

Στην περίπτωση **εφαπτομενικής ή αντίθετης κεκλιμένης ροής**, καυστήρες τύπου jet προεκτείνουν τις ροές άνθρακα και αέρα κατά μήκος μίας ευθείας επαπτομενικής σε ένα μικρό κύκλο, σε ένα οριζόντιο επίπεδο, στο κέντρο του κλιβάνου. Το τυρβώδες του καυστήρα κυμαίνεται από μηδενικό έως μέτριο, ανάλογα με την πρόθεση του σχεδιαστή και αντικαθίσταται από το τυρβώδες του συνόλου του κλιβάνου.

Σε τέτοιους κλιβάνους υπάρχει ένας συνολικός θύλακας φλόγας. Το μήκος της φλόγας είναι μεγάλο και η καύση του άνθρακα ταχεία. Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνουν στον σχεδιαστή ένα βαθμό ελέγχου στην μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας, που μπορεί να επιτύχει χαμηλά επίπεδα σχηματισμού NOx, αν και πρέπει να δοθεί προσοχή όταν οι μεμονωμένοι καυστήρες τείνουν να είναι μη ελεγχόμενοι.

Υπάρχει, επίσης, η άποψη ότι τέτοιου είδους διατάξεις καύσης είναι λιγότερο ευαίσθητες σε μία μη αναλογική κατανομή αέρα και καυσίμου στους καυστήρες. Όμως, κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε διαταραχή της ισορροπίας της θερμοκρασίας του υπερθερμαντήρα, ή του στοιχείου του αναθερμαντήρα και για την εξισορρόπηση της κατάστασης απαιτούνται μεγάλοι αριθμός αυλών.



# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «ξηρού» πυθμένα

Οι κλίβανοι με διατάξεις **μονής φλόγας σχήματος U** και **διπλής φλόγας σχήματος U** χρησιμοποιούνται για την καύση δύσκολα αναφλέξιμων καυσίμων. Το καύσιμο μαζί με τον αέρα μεταφοράς και ένα τμήμα του αναγκαίου αέρα της καύσης, τροφοδοτείται για καύση σε κατακόρυφη ροή μέσω ενός τόξου του καυστήρα, ευρισκόμενου στο μέσον του ύψους του κλιβάνου. Ο υπόλοιπος αέρας ο οποίος απαιτείται για την καύση εισάγεται μέσω των κάθετων τοιχωμάτων, κάτω από τα τόξα. Η ακτινοβολία από το ανερχόμενο τμήμα των φλογών του άνθρακα και από τους καυστήρες στο αντίθετο τόξο (σε μονάδες διάταξης διπλής φλόγας σχήματος U) βοηθά στο να εξασφαλισθεί μία σταθερή ανάφλεξη, για ένα μεγάλο εύρος φορτίων.

Σημαντικές παράμετροι για τον σχεδιασμό τέτοιων διατάξεων είναι η αναλογική διαίρεση του όγκου του κλιβάνου μεταξύ του άνω και κάτω τμήματος, το σχήμα του κλιβάνου και η ποσότητα και η ταχύτητα της καύσης του αέρα.



# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «ξηρού» πυθμένα

**Οι κλίβανοι κατακόρυφης τροφοδοσίας (από την οροφή) δεν χρησιμοποιούνται συχνά, έχουν όμως εφαρμοσθεί σε μονάδες δυναμικότητας κάτω από περίπου 150MW. Πάνω από αυτό το μέγεθος, θα ήταν αναγκαία, αν και αντιοικονομική, μία μεγάλη διατομή κλιβάνου, ώστε οι απαιτούμενοι καυστήρες να τοποθετηθούν στην οροφή.**

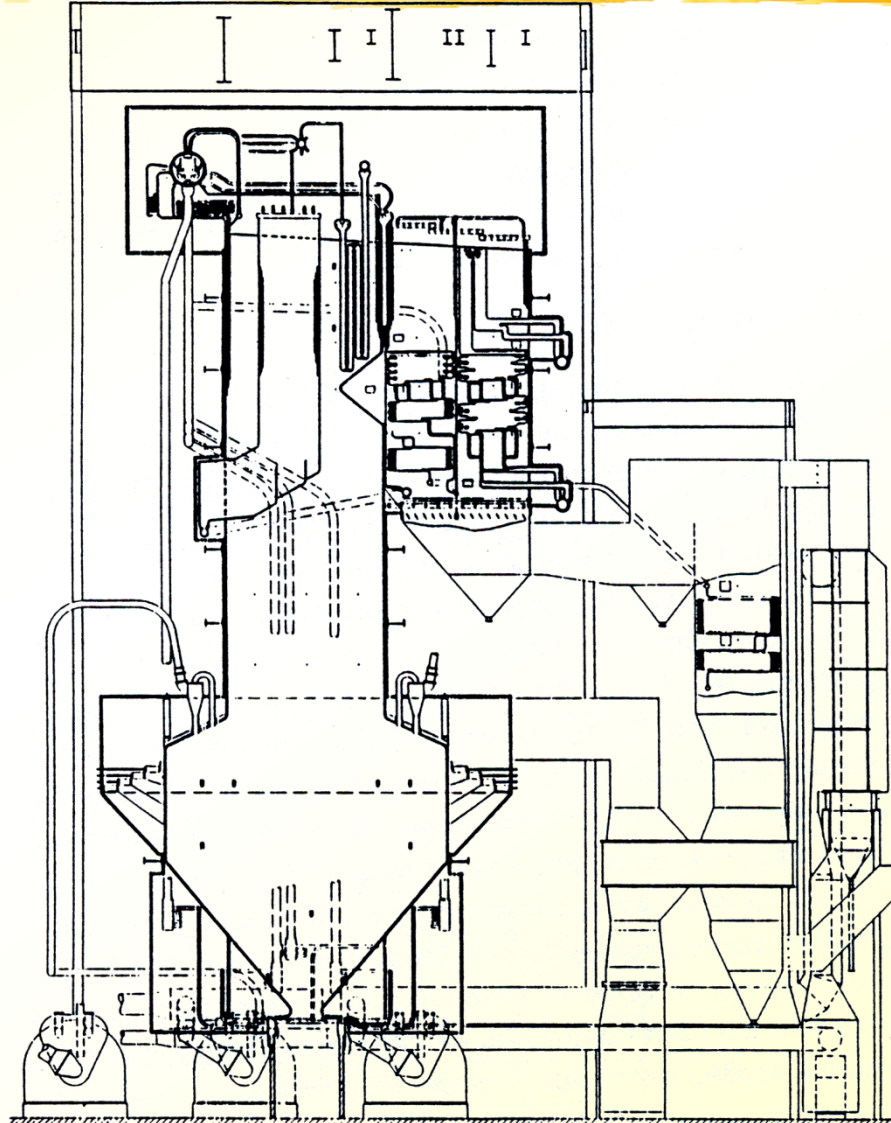
**Παρά το ότι η καύση σε κατακόρυφη ροή είναι εγγενώς σταθερά, έχει διάφορα μειονεκτήματα, όπως την τάση υπερθέρμανσης του καυστήρα, την καταστροφή από πτώσεις σκωρίας και την δυσκολία απομάκρυνσης καύσιμων ουσιών από την κορυφή του κλιβάνου.**



# Καύση άνθρακα

Είναι μία μονάδα 350 MW που λειτουργεί με λεπτά σωματίδια ανθρακίτη (< 200 μ), περιεκτικότητας 15% σε επιφανειακή υγρασία, 32% σε τέφρα, και 6% σε πτητικά.

Ο άνθρακας αυτός καίγεται μόνος, χωρίς βοηθητικό καύσιμο, από το 25% ως το 100% της δυναμικότητας.



Κλίβανος ατμοπαραγωγής με τροφοδοσία και διπλή φλόγα τύπου U



# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «υγρού» πυθμένα

**Οι πρώτοι κλίβανοι υγρού πυθμένα ήταν απλά ανοικτοί κλίβανοι ενός σταδίου.**

**Η υψηλή θερμοκρασία που είναι αναγκαία για την τήξη και την κατακράτηση της τέφρας παραγόταν με την τοποθέτηση των καυστήρων σε κοντινή απόσταση, κοντά στον πυθμένα του κλιβάνου, και με την χρήση πολύ λεπτόκοκκου άνθρακα και αέρα προθερμασμένου σε υψηλή θερμοκρασία.**



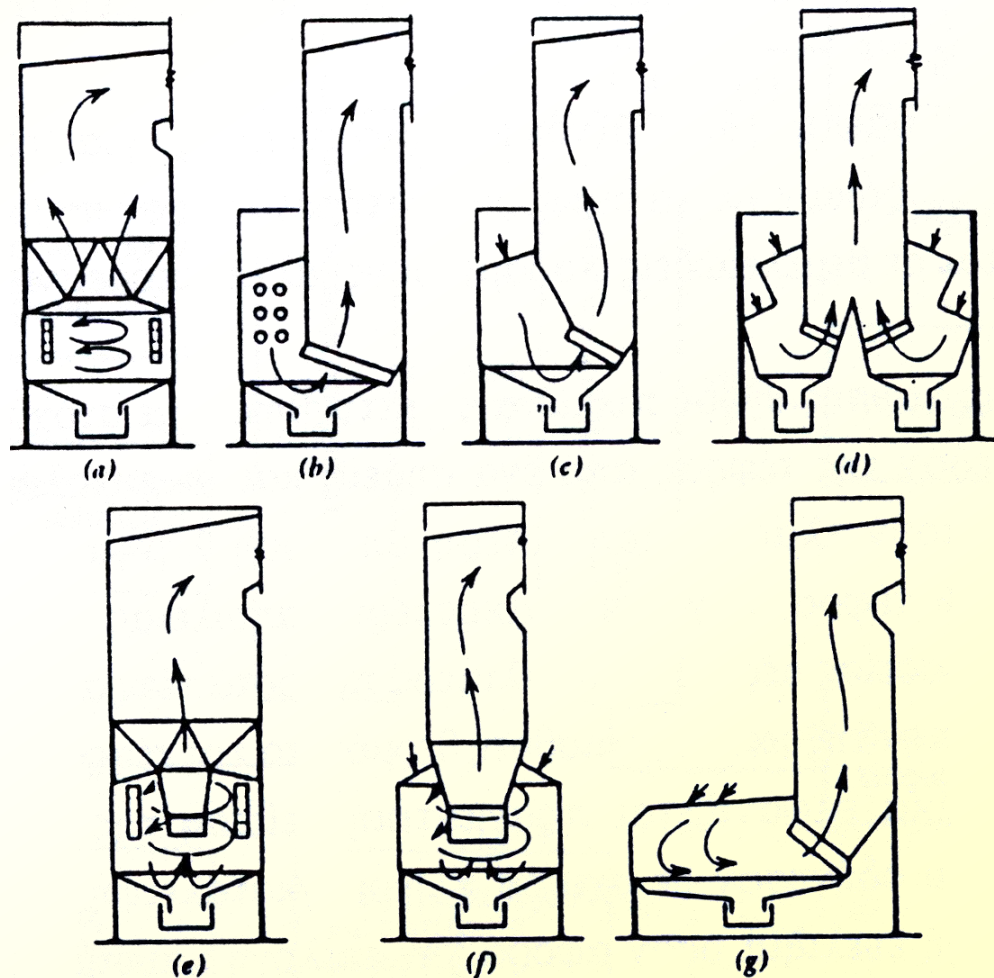


# Καύση άνθρακα

## Κλίβανοι «υγρού» πυθμένα

Για την περίπτωση τέφρας άνθρακα που τήκεται δύσκολα και για περιπτώσεις όπου ένα εύρος φορτίων της τάξης του 4:1 (ή μεγαλύτερου) είναι αναγκαίο, έχουν αναπτυχθεί περισσότερο πολύπλοκοι σχεδιασμοί κλειστού τύπου.

Όλοι αυτοί οι μεταγενέστεροι κλίβανοι είναι **θάλαμοι καύσης δύο σταδίων**. Στο πρώτο στάδιο, η θερμοκρασία διατηρείται πάνω από την θερμοκρασία ροής της τέφρας, ενώ στο δεύτερο στάδιο τα αέρια και η παρασυρόμενη τέφρα ψύχονται κάτω από το σημείο προβληματικής πρόσφυσης, στις επιφάνειες επαγωγής θερμότητας του λέβητα, του υπερθερμαντήρα και του αναθερμαντήρα.



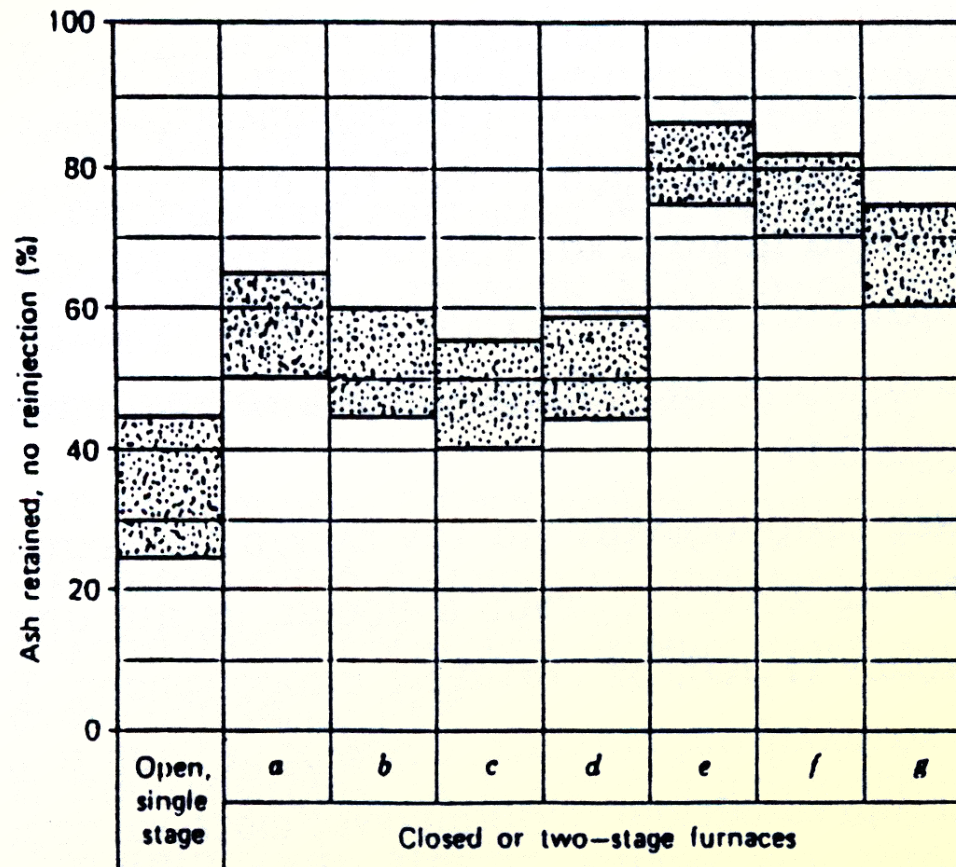
Κλίβανοι δυο σταδίων «υγρού» πυθμένα



## Κλίβανοι «υγρού» πυθμένα

Το άνω όριο κατακράτησης επιτυγχάνεται για καύσιμα με κατάλληλες ιδιότητες, βέλτιστο σχεδιασμό και σωστή λειτουργία.

Αντίθετα, τροφοδοσία χονδρόκοκκου άνθρακα, χαμηλή προθέρμανση αέρα ή ανεπαρκής σχεδιασμός μειώνουν το ποσοστό κατακράτησης χαμηλότερα από τα κάτω όρια.



Ποσοστό κατακράτησης τέφρας για διάφορες διατάξεις κλιβάνων «υγρού» πυθμένα



# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «υγρού» πυθμένα

Σε ευνοϊκές συνθήκες λειτουργίας είναι δυνατόν η συλλεγόμενη ιπτάμενη τέφρα να επανεισάγεται στο κλίβανο επιτυγχάνοντας έτσι μείωση των εκπομπών σωματιδίων και των απωλειών καυσίμου. Για διατάξεις ανοιχτού τύπου υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης κυκλώνων στα τοιχώματα του φούρνου για την τήξη της επανεισερχόμενης τέφρας. Η τήξη στους κυκλώνες μπορεί να γίνει μόνο με την καύση της ανακυκλούμενης σκόνης, αν περιέχει πάνω από 50% άνθρακα. Διαφορετικά απαιτείται χρήση άνθρακα ή άλλου βοηθητικού καυσίμου.

Η λειτουργία του συστήματος επανεισαγωγής απαιτεί πρόσθετο εξοπλισμό, βοηθητική ισχύ, κόστος συντήρησης και πολλές φορές οδηγεί σε εκτεταμένη μηχανική διάβρωση των αυλών του λέβητα, των ανεμιστήρων και των κονιοσυλλεκτών. Έτσι, πολλές τέτοιες εγκαταστάσεις έχουν εγκαταλειφθεί σαν αντιοικονομικές.



# Καύση άνθρακα



## Κλίβανοι «υγρού» πυθμένα

Η καύση υγρού πυθμένα είναι σαφώς ένας τρόπος καύσης, που αποσκοπεί στην **ελάττωση του προβλήματος της απόθεσης της τέφρας**. Μπορεί να έχει επίσης σαν αποτέλεσμα ελαφρά υψηλότερη αποδοτικότητα των λεβήτων που χρησιμοποιούν καύσιμα με περιεκτικότητα σε τέφρα κάτω από 20%, λόγω της μικρότερης απώλειας καύσιμης ύλης που συνεπάγεται και της μειωμένης περίσσειας αέρα που μπορεί να επιτρέψει.

Σε περιπτώσεις υψηλότερης περιεκτικότητας σε τέφρα, οι απώλειες λόγω σύντηξης και αισθητής θερμότητας της σκωρίας, γενικά βαρύνουν ως προς τα όποια οφέλη και έχουν σαν αποτέλεσμα την καθαρή μείωση της αποδοτικότητας.

Άλλα **μειονεκτήματα, σε σύγκριση με τα συστήματα καύσης «ξηρού» πυθμένα**, είναι η μειωμένη ευελιξία επιλογής του καυσίμου, η μεγαλύτερη πιθανότητα επικαθίσεων και διάβρωσης, τα υψηλότερα επίπεδα σχηματισμού NOx και η χαμηλότερη μέση διαθεσιμότητα παραγωγής ατμού.

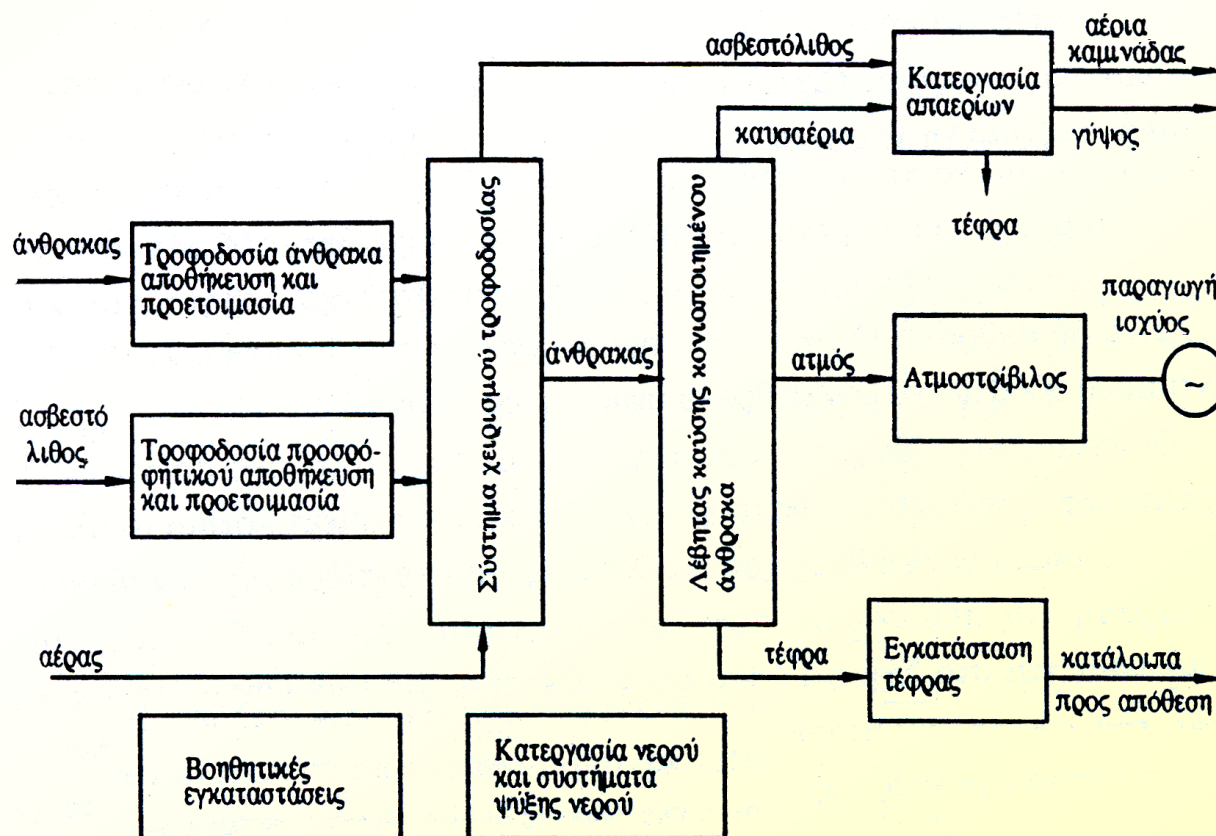


# Καύση άνθρακα

## Διάταξη κλιβάνου κονιοποιημένου άνθρακα

Οι κλίβανοι (λέβητες) καύσης κονιοποιημένου καυσίμου σε συνδυασμό με ατμογεννήτριες αποτελούν την συνήθη βιομηχανική πρακτική για θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στις σύγχρονες μονάδες ένας λέβητας παράγει όλο τον απαιτούμενο ατμό για την ηλεκτροπαραγωγή.

Τα κύρια τμήματα και, η βασική διάταξη του συστήματος είναι αρκετά απλά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα.





# Καύση άνθρακα



## Διάταξη κλιβάνου κονιοποιημένου άνθρακα

Διάφορες τεχνικές εφαρμόζονται για τον έλεγχο των εκπομπών αερίων ρύπων από εγκαταστάσεις κονιοποιημένου άνθρακα, με πιο συνηθισμένη την **αποθείωση των απαερίων** (FGD), σε διατάξεις απορρόφησης. Τα καυσαέρια έρχονται σε επαφή με κατάλληλους διαλύτες, συνήθως με βάση το ασβέστιο, που αντιδρούν με τα περιεχόμενα οξείδια, σχεδιασμένες ώστε να παράγεται γύψος(θειικό ασβέστιο) ως εμπορεύσιμο οικοδομικό υλικό. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται και απευθείας έγχυση ασβεστόλιθου στον λέβητα για τον έλεγχο εκπομπών SO<sub>x</sub>.

Ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου μπορεί να περιοριστεί με σταδιακή τροφοδοσία του αέρα καύσης, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας τοπικά, ή/και με μετατροπή των καυστήρων σε καυστήρες χαμηλού NO<sub>x</sub>. Για την ικανοποίηση πολύ αυστηρών προδιαγραφών στις εκπομπές NO<sub>x</sub> στο εγγύς μέλλον, εξετάζεται η εφαρμογή εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) των οξειδίων του αζώτου.

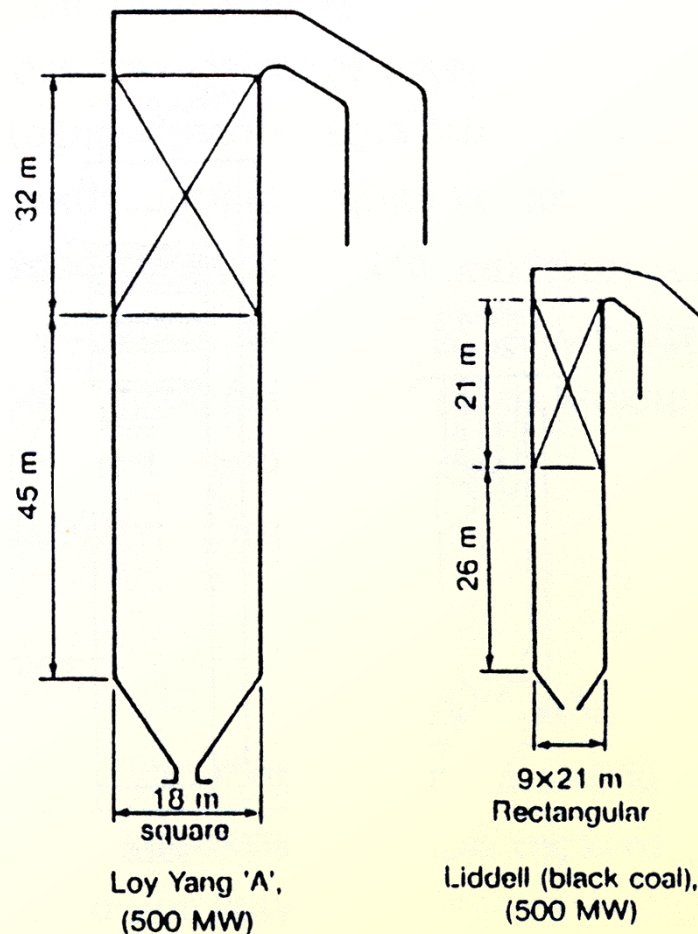


# Καύση άνθρακα

## Καύση κονιοποιημένου λιγνίτη

Στην περίπτωση ανθράκων χαμηλής τάξης, **το μέγεθος του κλιβάνου**, ανεξαρτήτως του τύπου του, πρέπει να είναι μεγαλύτερο από αυτό που απαιτείται για άνθρακες υψηλότερης τάξης, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία των ανθράκων χαμηλής τάξης, των χαρακτηριστικών κονιοποίησης και καύσης και των ιδιοτήτων της τέφρας.

Στο Σχήμα φαίνεται η απαιτούμενη αύξηση του όγκου ενός λέβητα 500 MW για καύση φαιού άνθρακα (λιγνίτη), σε σχέση με τον αντίστοιχο λέβητα για καύση βιτουμινικού άνθρακα. Ο όγκος για την περίπτωση του λιγνίτη είναι  $25.000 \text{ m}^3$  έναντι μόνο  $9.000 \text{ m}^3$  για τον άνθρακα υψηλότερης τάξης.



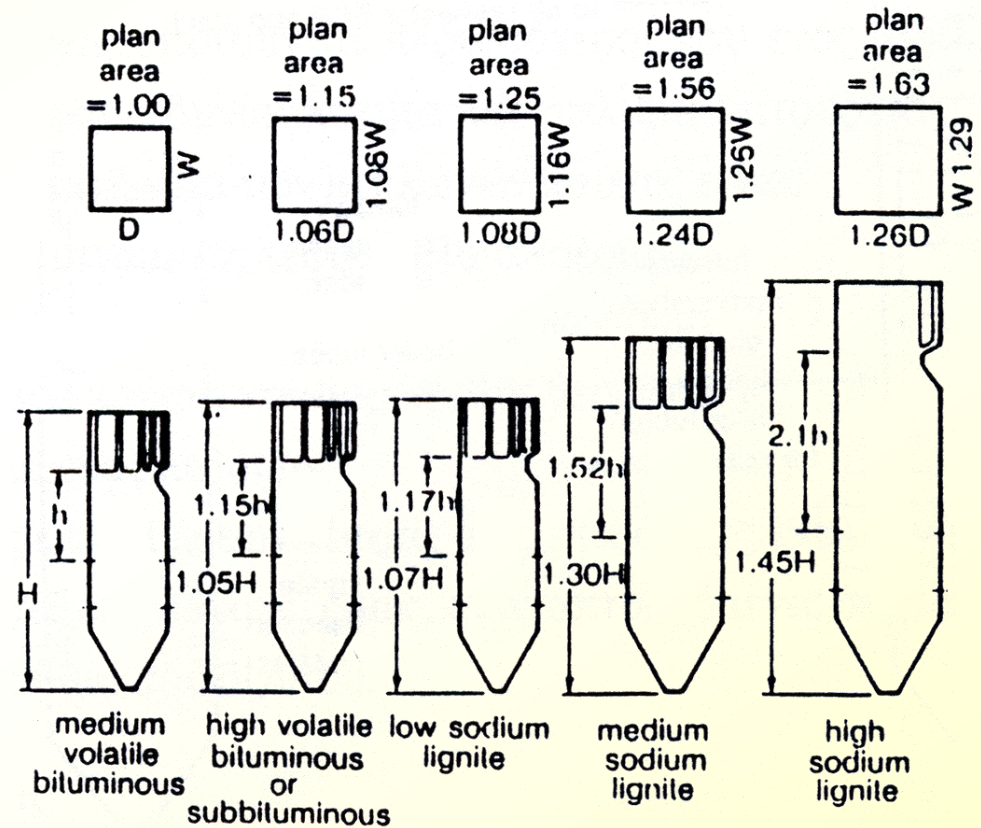
Συγκριτικό μέγεθος κλιβάνων για φαιό και βιτουμινικό άνθρακα στην Αυστραλία



# Καύση άνθρακα

## Καύση κονιοποιημένου λιγνίτη

Το Σχήμα δείχνει τις σχετικές διαστάσεις του κλιβάνου για τυπικούς άνθρακες από διάφορες περιοχές, δείχνοντας επίσης και την τάξη μεγέθους του επιπρόσθετου κόστους που απαιτείται, για την αποτελεσματική καύση των ανθράκων χαμηλής τάξης που προξενούν υψηλά επίπεδα επικαθίσεων.



Σχετικές διαστάσεις κλιβάνων για άνθρακες από τις ΗΠΑ

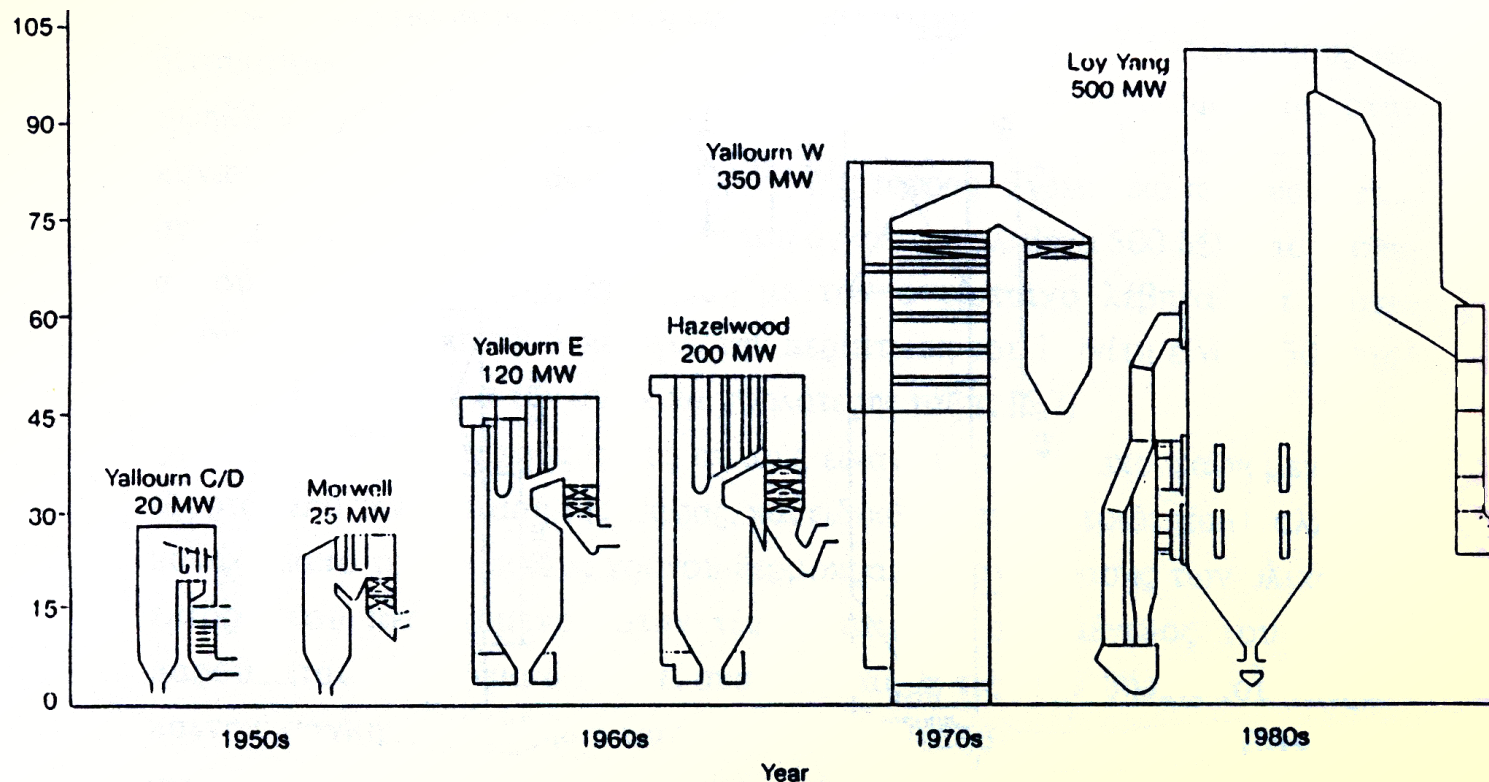




# Καύση άνθρακα

## Καύση κονιοποιημένου λιγνίτη

Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας με καύση κονιοποιημένου λιγνίτη κατασκευάζονται σήμερα για παραγωγή ισχύος 500 ως 600 MWe. Στο Σχήμα παρουσιάζεται η εξέλιξη μεγέθους των λεβήτων καύσης φαιού άνθρακα κατά τα τελευταία 40 χρόνια.



Εξελικτική αύξηση μεγέθους κλιβάνων για καύση λιγνίτη στην Αυστραλία



# Καύση άνθρακα



## Καύση κονιοποιημένου λιγνίτη

Σε χώρες με αναπτυσσόμενη οικονομία πάντως, όπως π.χ. Ινδία, Ταϊλάνδη κλπ, κατασκευάζονται μικρότερες μονάδες, των 200-300 MW, υποδηλώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον απαιτούμενο συντηρητισμό που επιβάλλει η μεταβλητή και συχνά απρόβλεπτη φύση του λιγνίτη.

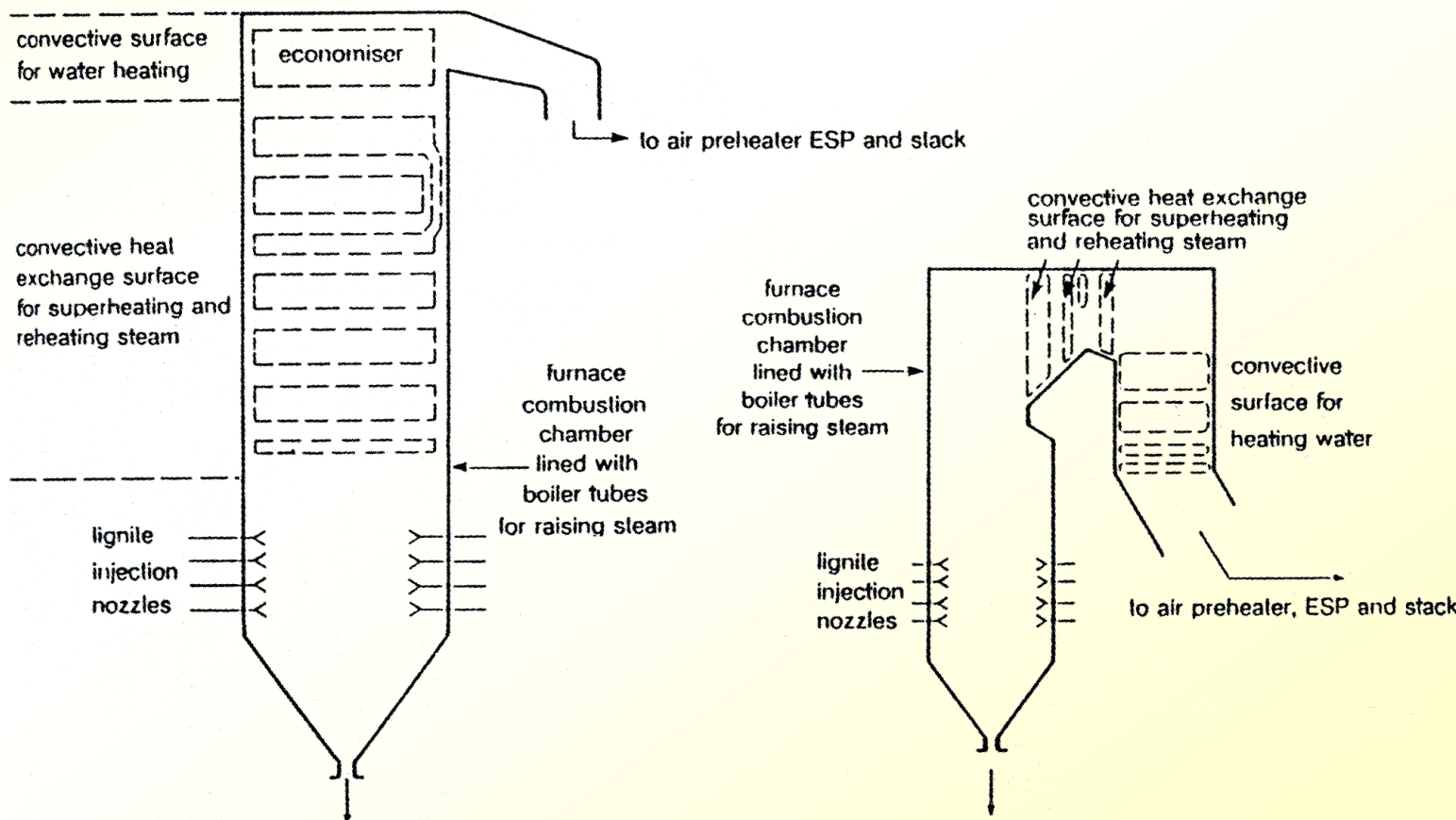


# Καύση άνθρακα

## Καύση κονιοποιημένου λιγνίτη

Στους κλιβάνους με καύσιμα λιγνίτη εφαρμόζονται δύο βασικές διατάξεις. Η πρώτη διάταξη εφαρμόζεται κυρίως στις ΗΠΑ, για λιγνίτες με σχετικά χαμηλή

περιεκτικότητα σε υγρασία, ενώ η δεύτερη εφαρμόζεται σε μεγάλες μονάδες στην Γερμανία, την Ελλάδα και την Αυστραλία.



Βασικές διατάξεις κλιβάνου για καύση κονιοποιημένου λιγνίτη



## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Ο κλίβανος καύσης τύπου κυκλώνα αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1940 σαν **διάταξη καύσης υψηλής θερμοκρασίας και υψηλού τυρβώδους**, που λειτουργεί ανεξάρτητα από τις περιοχές εναλλαγής θερμότητας του λέβητα. Αν και ο κλίβανος αναπτύχθηκε αρχικά για καύση ανθράκων με χαμηλή θερμοκρασία τήξης τέφρας, έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για όλες τις τάξεις άνθρακα.

Ο κλίβανος καύσης τύπου κυκλώνα μπορεί να κάψει σχετικά χονδρόκοκκο άνθρακα (-6mm) και καύσιμο υπό μορφή πολφού. Επίσης, παράγει ενέργεια μέχρι  $19537 \text{ MJ/hm}^3$  όγκου καύσης, σε σύγκριση με βέλτιστες τιμές για κλιβάνους ξηρού πυθμένα και υγρού πυθμένα,  $5860 \text{ MJ/hm}^3$  και  $15630 \text{ MJ/hm}^3$ , αντίστοιχα παρά το ότι το μέγεθός του είναι μικρότερο. Επιπρόσθετα, λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων και της παρουσίας τηγμένης τέφρας στα τοιχώματα, η ποσότητα ιπτάμενης τέφρας είναι πολύ μικρότερη στον κλίβανο καύσης τύπου κυκλώνα, από ότι σε άλλα συστήματα καύσης. Οπωσδήποτε, αυτός ο τύπος καύσης **ευνοεί τον υπερβολικό σχηματισμό NOx**.



## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Τα κύρια πλεονεκτήματα των κυκλώνων καύσης είναι:

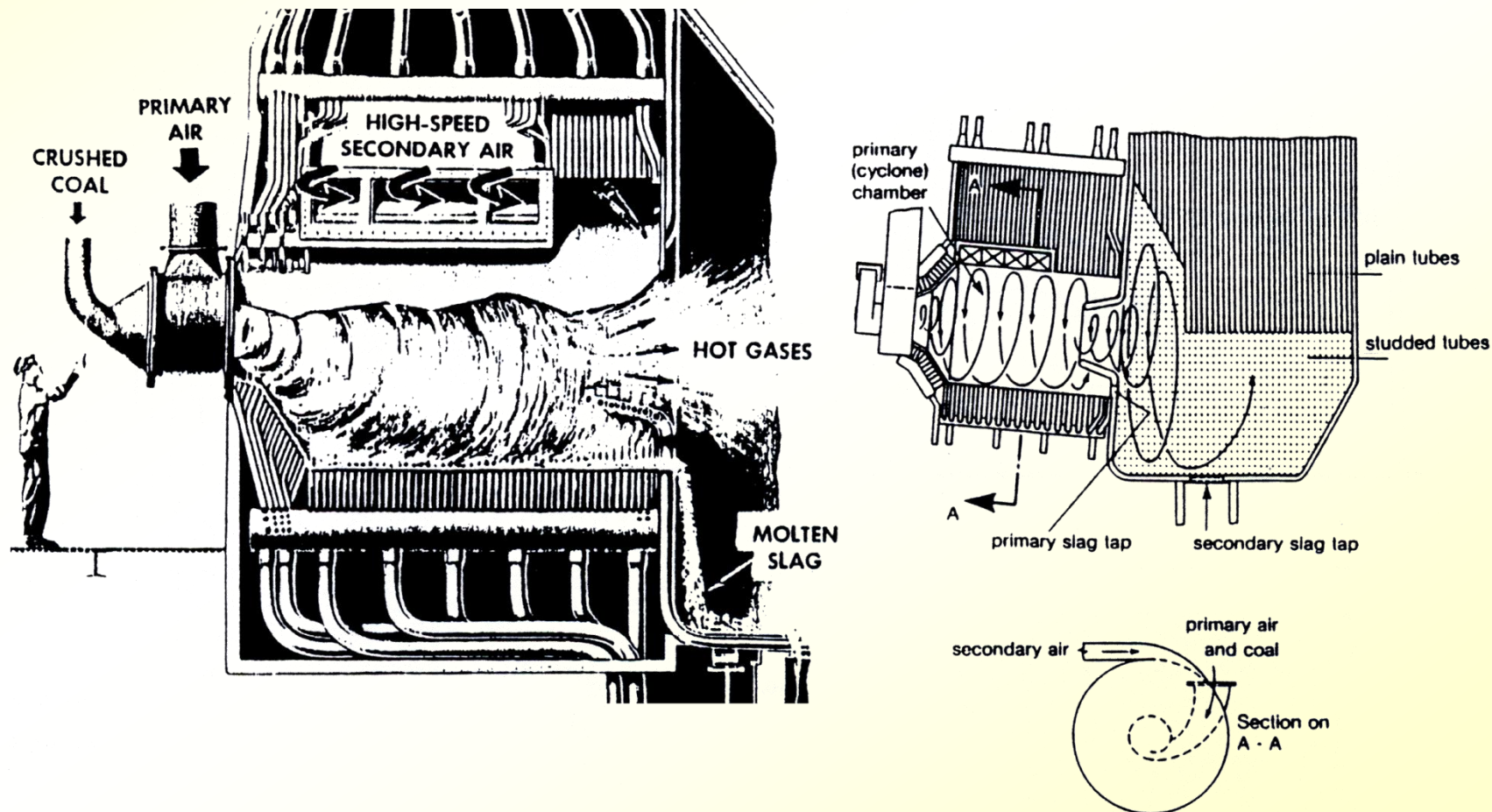
- η ελάττωση της ιπτάμενης τέφρας στα απαέρια
- η χρήση χονδρόκοκκου άνθρακα στην τροφοδοσία
- ο υψηλός ρυθμός καύσης και παραγωγής θερμότητας
- το μειωμένο μέγεθος λεβήτων
- ο περιορισμός επικαθήσεων τέφρας στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας.



# Καύση άνθρακα

## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Στο Σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη ενός κυκλώνα καύσης που είναι τοποθετημένος στο κάτω τμήμα ενός κατά τα άλλα συμβατικού λέβητα.





## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

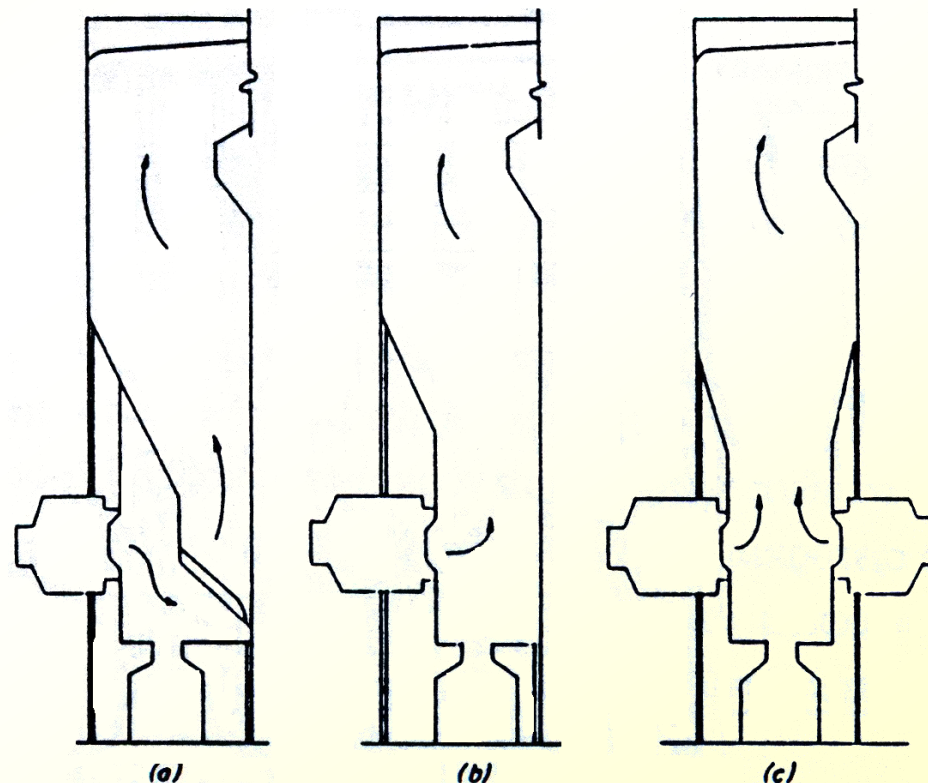
Ο κονιοποιημένος άνθρακας μαζί με τον κύριο και τον δευτερεύοντα αέρα τροφοδοτούνται εφαπτομενικά στον κυκλώνα που είναι υδρόψυκτος και μονωμένος. Τα σωματίδια του άνθρακα παρασύρονται προς τα τοιχώματα που είναι καλυμμένα από τηγμένη τέφρα, καθώς η καύση είναι πολύ έντονη. Η τέφρα ρέει προς τα κάτω και απομακρύνεται από τον πυθμένα του λέβητα. Το τροφοτούμενο υλικό είναι σχετικά χονδρόκοκκο (95% μικρότερο από 4 mm) και συνεπώς το κόστος θραύσης και κονιοποίησης είναι μειωμένο. Η παρουσία λεπτόκοκκων σωματιδίων που φυσιολογικά δημιουργούνται κατά την κονιοποίηση διασφαλίζει την σταθερή ανάφλεξη του καυσίμου.

Το μεγαλύτερο μέρος του άνθρακα καίγεται σε διασπορά μέσα στην στροβιλιζόμενη μάζα αέρα ενώ ταυτόχρονα κινείται προς τα έξω λόγω διαφοράς πίεσης. Όταν ξεκινήσει η λειτουργία του κυκλώνα, δημιουργείται μία στοιβάδα τηγμένης τέφρας στο υδρόψυκτο τοίχωμα. Καθώς το πάχος της στοιβάδας αυτής αυξάνει, η επιφάνειά της γίνεται περισσότερο ιξώδης και κατακρατεί τα μεγαλύτερα σωματίδια άνθρακα που φτάνουν σ' αυτήν υπό την επίδραση του πεδίου ροής. Τα σωματίδια αυτά καίγονται επί τόπου λόγω της υψηλής σχετικής ταχύτητας του ρεύματος αέρα.



## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Στον τύπο (a) με πλέγμα, που έχει σήμερα σχεδόν εκτοπισθεί από τους ανοιχτού τύπου λέβητες, τα αέρια από τον κυκλώνα εκτονώνονται κατ' αρχήν σε ένα μικρό δοχείο και κατόπιν διαμέσου του πλέγματος οδηγούνται στον κυρίως λέβητα. Οι δύο άλλες διατάξεις, ανοιχτού τύπου, χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερες μονάδες. Η διάταξη (b), με κυκλώνα μόνο στον ένα τοίχο του λέβητα, απαιτεί περισσότερο χώρο από την (c). Για μεγαλύτερες μονάδες, η διάταξη αυτή γίνεται αντιοικονομική και οι καυστήρες τοποθετούνται και στις δύο απέναντι πλευρές (εμπρός και πίσω), όπως φαίνεται στη διάταξη (c).



Κυκλώνες οριζόντιας φλόγας, με σίτα  
(a) απλής τροφοδοσίας και (b)  
αντικείμενης τροφοδοσίας



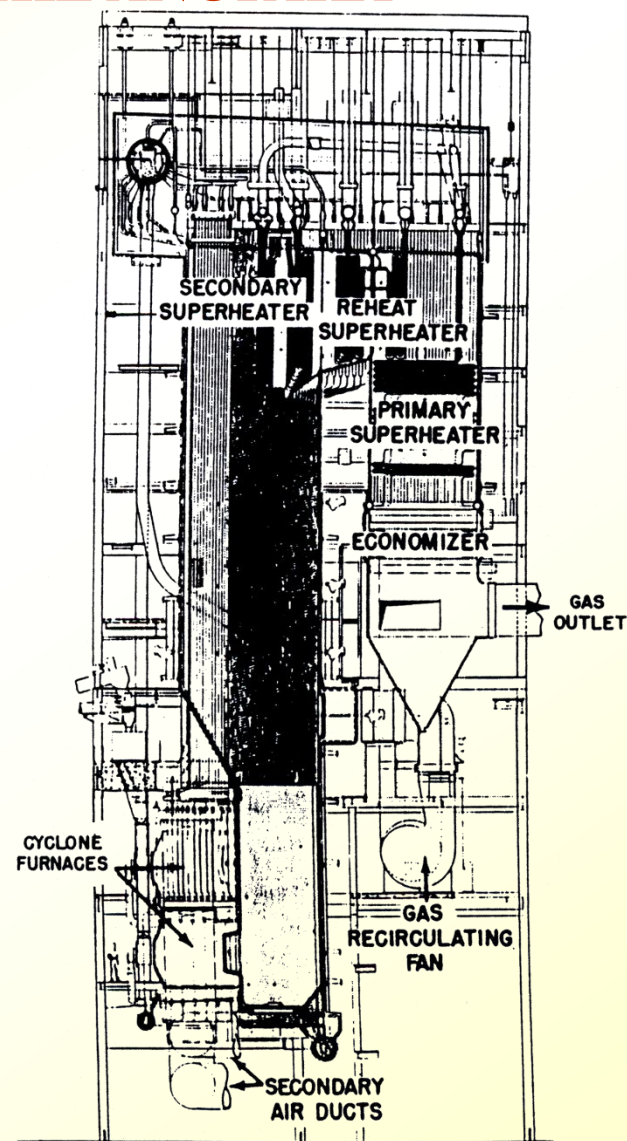


# Καύση άνθρακα

## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Στο Σχήμα φαίνεται μία τυπική εγκατάσταση κυκλώνα καύσης με τον αντίστοιχο λέβητα, που έχει δυναμικότητα 500.000 kg ατμού/h.

Για την δυναμικότητα αυτή απαιτούνται 5 καυστήρες τύπου κυκλώνα.





# Καύση άνθρακα



## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

**Τα χαρακτηριστικά των καυσίμων που έχουν ιδιαίτερη σημασία για καυστήρες τύπου κυκλώνα είναι η ευτηκτικότητα και το ιξώδες της τέφρας, καθώς και η διαβρεκτικότητα της τηγμένης τέφρας ως προς τα σωματίδια καυσίμου που επικάθονται στην επιφάνειά της.**

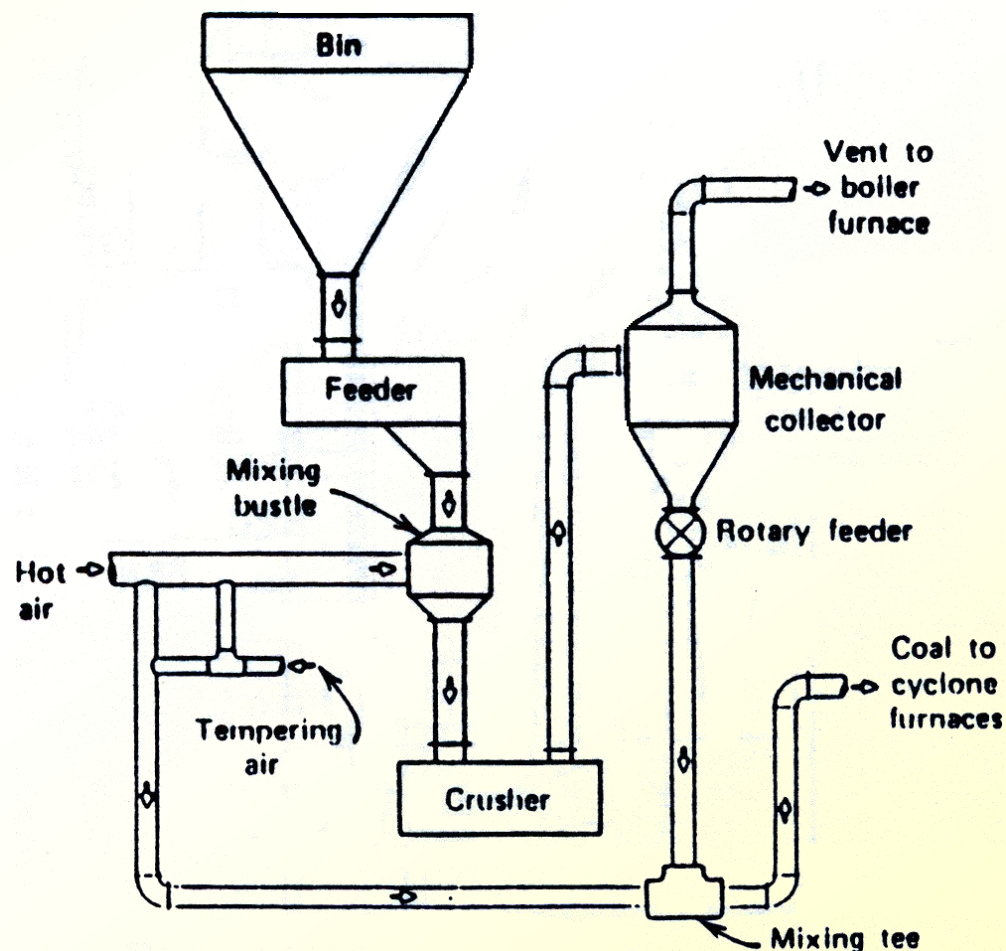
**Η δυναμικότητα καύσης ανθράκων χαμηλής τάξης με υψηλό ποσοστό υγρασίας και χαμηλή θερμογόνο δύναμη, είναι εξαιρετικής σπουδαιότητας, λόγω της επέκτασης της χρήσης των καυσίμων αυτών και των μειωμένων απαιτήσεων των κυκλώνων καύσης για δαπανηρή προετοιμασία. Η τέφρα του καυσίμου θα πρέπει να έχει χαμηλή ως μέση θερμοκρασία τήξης και η περιεχόμενη υγρασία να είναι τόση ώστε η υπολογιζόμενη αδιαβατική θερμοκρασία στον κυκλώνα να είναι πάνω από 1850°C. Καύσιμα που δεν μπορούν να αποδώσουν τέτοια θερμοκρασία πρέπει να υποβοηθούνται με συμπληρωματικό καύσιμο, όπως πετρέλαιο, αέριο ή άλλο "πλούσιο" καύσιμο ή να προξηραίνονται.**



## ΚΥΚΛΩΝΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

Το Σχήμα απεικονίζει μια διάταξη προξήρανσης για λιγνίτες υψηλής υγρασίας και χαμηλής θερμογόνου δύναμης (υγρασία  $> 36\%$ , θερμογόνος δύναμη  $< 7000$  Btu/lb).

Στην μονάδα αυτή το πλούσιο σε υδρατμούς ρεύμα αέρα από τον θραυστήρα διαχωρίζεται από το στερεό σε μηχανικό διαχωριστή και παρακάμπτει τον κυκλώνα καύσης.



Σύστημα προξήρανσης και κονιοποίησης για τροφοδοσία κυκλώνων



# Καύση άνθρακα



## ΚΑΥΣΗ ΡΕΥΣΤΟΣΤΕΡΕΑΣ ΚΛΙΝΗΣ

Η τεχνολογία ρευστοστερεάς κλίνης, αν και γνωστή από το 1940, έχει μόλις πρόσφατα καταστεί μία από τις πιο σημαντικές εξελίξεις για την καύση του άνθρακα.

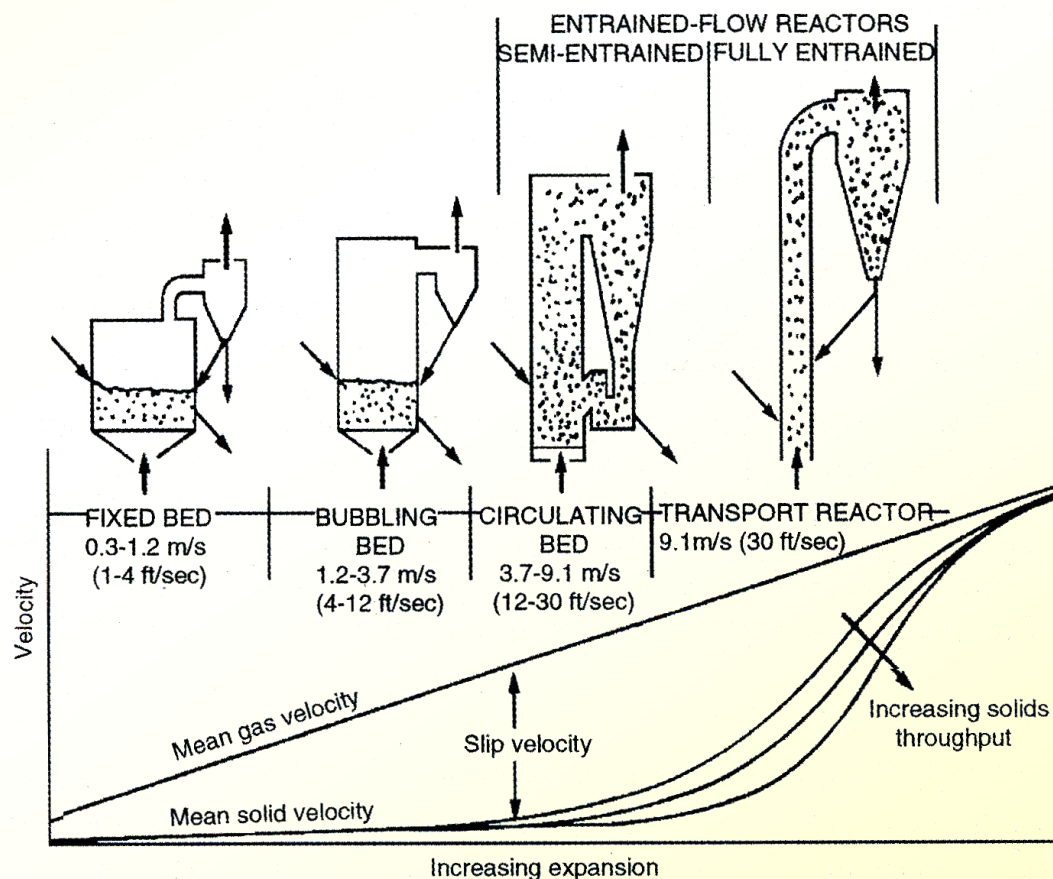
Σήμερα, οι κλίβανοι ρευστοστερεάς κλίνης ανταγωνίζονται τους κλιβάνους εστίας καύσης, σε επίπεδο μικρών μονάδων και τους κλιβάνους κονιοποιημένου άνθρακα, σε επίπεδο μεγάλων μονάδων.



## ΚΑΥΣΗ ΡΕΥΣΤΟΣΤΕΡΕΑΣ ΚΛΙΝΗΣ

Η ρευστοστερεά κλίνη είναι μία κλίνη στερεών σωματιδίων, τα οποία αιωρούνται στην τυρβώδη ροή του αέρα της καύσης που παρέχεται από κάτω.

Τα στερεά σωματίδια είναι κυρίως αδρανή σωματίδια, όπως τέφρα άνθρακα ή απορροφητικά υλικά θείου, όπως ασβεστόλιθος ή δολομίτης. Τα σωματίδια του άνθρακα αποτελούν μόνο το 1% της μάζας της κλίνης.



Ταχύτητες αερίου και άνθρακα έναντι της διόγκωσης της κλίνης για αντιδραστήρες σταθερής κλίνης, κλίνης φυσαλίδων, ρευστοστερεάς κλίνης με ανακυκλοφορία και κλίνης παράσυρσης



## ΚΑΥΣΗ ΡΕΥΣΤΟΣΤΕΡΕΑΣ ΚΛΙΝΗΣ

Τα κύρια πλεονεκτήματα της καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη έναντι της συμβατικής καύσης κονιοποιημένου άνθρακα είναι:

- υψηλότεροι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας στην κλίνη, με αποτέλεσμα την μείωση του μεγέθους των μονάδων και κατά συνέπεια την μείωση των κεφαλαιουχικών επενδύσεων και του κόστους συντήρησης,
- αυξημένη απόδοση καύσης και αυξημένοι ρυθμοί απαγωγής θερμότητας, μέχρι 3 MW/m<sup>2</sup> εμβαδού κλίνης,
- μειωμένες επικαθίσεις και διαβρώσεις των κλιβάνων, επειδή οι θερμοκρασίες καύσης είναι σημαντικά υποδεέστερες των θερμοκρασιών τήξης της τέφρας,
- καύση σε σημαντικά χαμηλότερη θερμοκρασία (κάτω από 1000°C) και ομαλότερη κατανομή θερμοκρασιών, που έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>,



## ΚΑΥΣΗ ΡΕΥΣΤΟΣΤΕΡΕΑΣ ΚΛΙΝΗΣ

- σημαντική μείωση εκπομπών SO<sub>x</sub>, λόγω της χρήσης υλικών που απορροφούν το θείο στην κλίνη, εξαλείφοντας την ανάγκη ελέγχου εκπομπών οξειδίων του θείου μετά την καύση,
- εύχρηστο και χρήσιμο υποπροϊόν και
- ευελιξία επιλογής καυσίμου και δυνατότητα χρήσης ανθράκων χαμηλής τάξης, ακόμη και με μεγάλη περιεκτικότητα σε τέφρα, καθότι λειτουργούν με χαμηλό απόθεμα καυσίμων στην κλίνη.

Η χρήση των ανθράκων χαμηλής τάξης σε κλιβάνους ρευστοστερεάς κλίνης προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα, όπως μεγαλύτερες αποδόσεις καύσης, μέχρι και 99%, κατακράτηση θείου λόγω του εγγενούς αλκαλικού χαρακτήρα της τέφρας χωρίς την προσθήκη απορροφητικών υλικών και δυνατότητα λειτουργίας για ένα μεγάλο εύρος ιδιοτήτων του άνθρακα.



## ΚΑΥΣΗ ΡΕΥΣΤΟΣΤΕΡΕΑΣ ΚΛΙΝΗΣ

Η επιτυχής χρησιμοποίηση των ανθράκων χαμηλής τάξης σε κλιβάνους ρευστοστερεάς κλίνης εξαρτάται από τη επίλυση ορισμένων προβλημάτων, μερικά των οποίων είναι συνήθη σε εφαρμογές ρευστοστερεάς κλίνης και μερικά των οποίων αποτελούν ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ανθράκων χαμηλής τάξης.

Τα κύρια σημεία, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπ' όψη όταν χρησιμοποιούνται άνθρακες χαμηλής τάξης είναι:

- Σχεδιασμός κλιβάνων ρευστοστερεάς κλίνης
- Συσσωμάτωση στερεών σε κλιβάνους ρευστοστερεάς κλίνης
- Ρευστοστερεά κλίνη με έλλειμμα ασβεστόλιθου
- Κατακράτηση θείου





## Σχεδιασμός κλιβάνων ρευστοστερεάς κλίνης

Ο σχεδιασμός των βιομηχανικών εγκαταστάσεων απαιτεί μία έξυπνη επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας, των υλικών και των παραμέτρων σχεδιασμού των διεργασιών. Οι αλλαγές του σχεδιασμού της ρευστοστερεάς κλίνης είναι δυνατές, λόγω της υψηλής αντιδραστικότητας μερικών ανθράκων χαμηλής τάξης. Η υψηλή αντιδραστικότητα μπορεί να αυξήσει τους ογκομετρικούς ρυθμούς παραγωγής θερμότητας, και συνεπώς να μειώσει το μέγεθος και το κόστος του εξοπλισμού.

Δεδομένα από **μικρές εγκαταστάσεις** δείχνουν ότι οι πιθανόν "βέλτιστες" συνθήκες λειτουργίας για τους άνθρακες χαμηλής τάξης είναι:

Θερμοκρασία Κλίνης	815-870°C
Επιφανειακή ταχύτητα	1,8 – 2,1 m/s
Περίσσεια αέρα	15 – 20%
Μέγεθος άνθρακα τροφοδοσίας	6mm
Απορροφητικό υλικό	Αλκαλική τέφρα με επιπλέον ασβεστόλιθο, ειδικά για άνθρακες υψηλής περιεκτικότητας σε νάτριο



## Καύση άνθρακα



### Συσσωμάτωση στερεών σε κλιβάνους ρευστοστερεάς κλίνης

Όταν η περιεκτικότητα της τέφρας σε νάτριο είναι μεγαλύτερη από 3%, οι αργιλοπυριτικές ενώσεις νατρίου που δημιουργούνται έχουν χαμηλά σημεία τήξης και τείνουν να σχηματίζουν συσσωματώματα, τα οποία επιπλέουν στην κλίνη, ή κολλούν στις επιφάνειες των σωλήνων του κλιβάνου. Τέτοια προβλήματα συσσωμάτωσης στην κλίνη μπορούν να μειωθούν με την προσθήκη ασβεστόλιθου ή αλουμίνας, που πιστεύεται ότι μειώνουν την συγκέντρωση του οξειδίου του πυριτίου στην κλίνη.

Η συσσωμάτωση μειώνει την ποιότητα της ρευστοποίησης της κλίνης, προξενώντας ανεπαρκή ανάμειξη της κλίνης, μεταβολές θερμοκρασίας και χαμηλή αποδοτικότητα καύσης. Ενόσω η συσσωμάτωση προχωρεί, το μέγεθος του υλικού στην κλίνη αυξάνεται, παράλληλα με την συγκέντρωση νατρίου και σιδήρου. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μειώνεται.

Ενα μέτριο επίπεδο συσσωμάτωσης μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή ρευστοποίηση και να μειώσει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας. Σημαντικά επίπεδα συσσωμάτωσης μπορούν να καταστήσουν την κλίνη μη ρευστή, και να οδηγήσουν σε διακοπή λειτουργίας της μονάδας.



# Καύση άνθρακα



## Ρευστοστερεά κλίνη με έλλειμμα ασβεστόλιθου

Η σύνθεση και η βασική συμπεριφορά μίας κλίνης με έλλειμμα ασβεστόλιθου, όπως στην περίπτωση ανθράκων χαμηλής τάξης, είναι διαφορετικές από αυτές μίας κλίνης τέφρας-απορροφητικού υλικού-άνθρακα, με πιθανές συνέπειες στις συνθήκες λειτουργίας, την διάρκεια ζωής των υλικών και την απόδοση της μονάδας.

Αποτελέσματα, από δοκιμές διάρκειας πάνω από 100 ώρες, έδειξαν ότι η σύνθεση της κλίνης, οι ρεολογικές ιδιότητες του μέσου ρευστοποίησης και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου.



## Κατακράτηση θείου

Έχειδειχθεί ότι η εγγενής περιεκτικότητα των ανθράκων χαμηλής τάξης σε αλκάλια συνεισφέρει και αυτή στον έλεγχο των εκπομπών διοξειδίου του θείου. Σε περιπτώσεις όπου αυτό δεν είναι αρκετό για την επίτευξη του απαιτούμενου ποσοστού ελέγχου, απεδείχθη ότι η προσθήκη απορροφητικών υλικών προσφέρει αυξημένη κατακράτηση του θείου.

Για μία αναλογία Ca/S της τάξης του 3, έχει επιτευχθεί κατακράτηση SO<sub>2</sub> σε ποσοστό 92% και 96% για τους Τουρκικούς λιγνίτες Tavsanli και Orhaneli, αντίστοιχα. Κατακρατήσεις θείου μεγαλύτερες από 90% έχουν επίσης επιτευχθεί στην περίπτωση Ισπανικών λιγνιτών, όπου η μοριακή αναλογία Ca/S ήταν μεγαλύτερη από 2.



# Καύση άνθρακα



## Κατακράτηση θείου

Οι βασικές λειτουργικές μεταβλητές που επηρεάζουν την κατακράτηση του θείου είναι η μέση θερμοκρασία της κλίνης, η επιφανειακή ταχύτητα των αερίων και η αναλογία καυσίμου με αέρα.

Γενικά, η κατακράτηση του θείου φθάνει στην μέγιστη τιμή της σε μέσες θερμοκρασίες κλίνης ενώ μειώνεται όταν η επιφανειακή ταχύτητα των αερίων αυξάνεται.

Μία αύξηση στην αναλογία αέρα προς καύσιμο αυξάνει την κατακράτηση θείου. Όμως, η επίδραση της περίσσειας οξυγόνου θα μπορούσε να ήταν τελείως διαφορετική, καθότι αυτή εξαρτάται από την κατάσταση οξείδωσης των ενδιάμεσων και των τελικών προϊόντων της αντίδρασης.

Επιπρόσθετα, η κατακράτηση του θείου αυξάνεται όσο αυξάνεται η περίσσεια αέρα. Για παράδειγμα, ή αύξηση της περίσσειας αέρα από 30% σε 61 % μπορεί να αυξήσει την κατακράτηση θείου από 51% σε 58%.



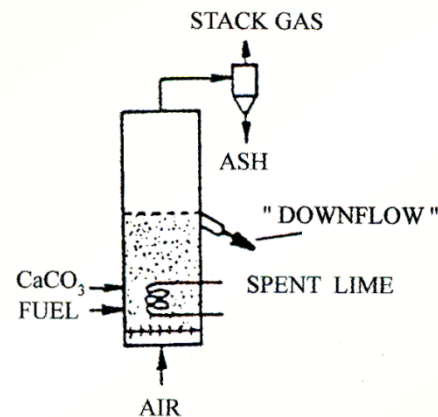
# Καύση άνθρακα

## Διατάξεις ρευστοστερεάς κλίνης για επαφή στερεού-αέρα

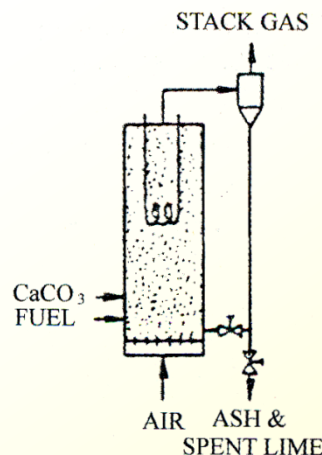
Οι διατάξεις ρευστοστερεάς κλίνης μπορούν να ταξινομηθούν, σύμφωνα με τον τρόπο επαφής μεταξύ του αέρα της καύσης και του υλικού της κλίνης, ως:

- ✓ λειτουργία καθοδικής ροής,
- ✓ λειτουργία ανοδικής ροής,
- ✓ ρευστοστερεά κλίνη πολλαπλών στερεών, και
- ✓ κυκλωνική ρευστοστερεά κλίνη.

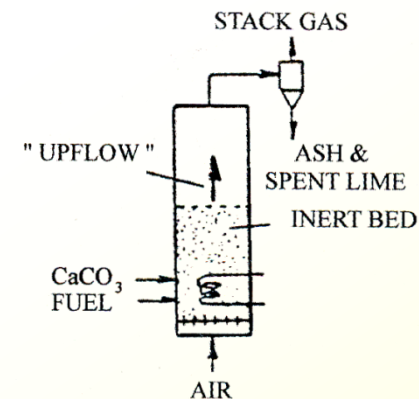
Downflow Operation



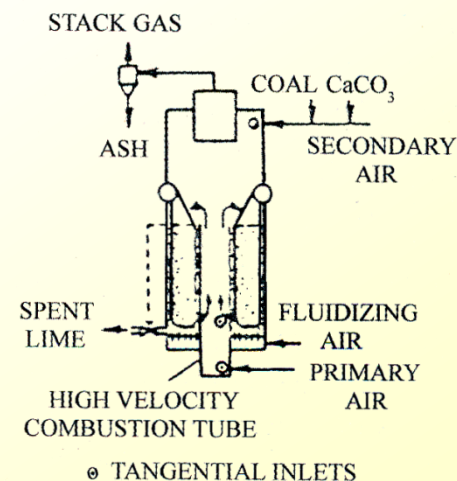
Multi - Solids Fluidized Bed



Upflow Operation



Cyclonic Fluidized Bed



Διατάξεις ρευστοστερεάς κλίνης για κανονική λειτουργία και λειτουργία με ανακυκλοφορία



## Καύση άνθρακα



Στην **λειτουργία καθοδικής ροής**, τα υλικά τροφοδοσίας (ασβεστόλιθος και καύσιμο) τροφοδοτούνται σε μία εκ των προτέρων διαπυρωμένη κλίνη οξειδίου του ασβεστίου. Οι ταχύτητες των αερίων είναι αρκετά χαμηλές, ώστε μόνο μικρή ποσότητα του οξειδίου του ασβεστίου να **απάγεται**.

Το στερεό υπόλειμμα, το οποίο αποτελείται από καταναλωμένο οξείδιο του ασβεστίου και κάποια τέφρα, απομακρύνεται με εκτόπιση από φρέσκια τροφοδοσία και εξάγεται μέσω ενός σωλήνα υπερχειλίσης. Έτσι, το ύψος της κλίνης παραμένει σταθερό. Η ψύχουσα επιφάνεια μπορεί να εμβυθισθεί απευθείας στην κλίνη, ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία σε ένα επιθυμητό επίπεδο.

Στην **λειτουργία ανοδικής ροής**, η κλίνη αποτελείται από ένα χονδρόκοκκο αδρανές υλικό. Οι ταχύτητες είναι κάπως υψηλότερες και τα υλικά τροφοδοσίας πιο λεπτόκοκκα, ώστε όλο το καταναλωμένο οξείδιο του ασβεστίου, καθώς και η τέφρα, να **απάγονται** με το αέριο που προκαλεί την ρευστοποίηση.

Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι κατάλληλος αν οι αντιδράσεις αερίου-στερεού είναι σχετικά γρήγορες, επειδή ο χρόνος διακράτησης των στερεών είναι σχετικά μικρός.



# Καύση άνθρακα



## Διατάξεις ρευστοστερεάς κλίνης για επαφή στερεού-αέρα

Στο **σύστημα πολλαπλών στερεών**, πάνω από το υλικό της κλίνης βρίσκεται μία κλίνη παράσυρσης σωματιδίων οξειδίου του ασβεστίου με ανακυκλοφορία, από το ίδιο ή διαφορετικό υλικό. Ο άνθρακας και ο λεπτόκοκκος ασβεστόλιθος τροφοδοτούνται στην κλίνη, όπως και στα συμβατικά συστήματα. Η θερμότητα που εκλύεται από την καύση του άνθρακα μεταφέρεται στην κλίνη παράσυρσης με ανακυκλοφορία, καθώς διέρχεται δια μέσου της πυκνής κλίνης και παράγεται ατμός, από σωλήνες που βρίσκονται πάνω από την πυκνή κλίνη.





# Καύση άνθρακα



## Διατάξεις ρευστοστερεάς κλίνης για επαφή στερεού-αέρα

Η **κυκλωνική ρευστοστερεά κλίνη** κατασκευάζεται με έναν κεντρικό κυκλωνικό θάλαμο καύσης υψηλής ταχύτητας, όπου το εξανθράκωμα και ο ασβεστόλιθος καίγονται με πρωτογενή αέρα. Το μείγμα μετακινείται σε μία περιοχή χαμηλών ταχυτήτων στην κορυφή της διάταξης, όπου γίνεται εφραπτομενική έγχυση άνθρακα και επιπρόσθετου αέρα.

Ο άκαυστος άνθρακας, το εξανθράκωμα και ο ασβεστόλιθος εκπίπτουν από την ροή του αερίου και κατανέμονται στην περίμετρο της μονάδας, λόγω της στροβιλώδους κίνησης. Εκεί, σε μία υψηλή θερμοκρασία, εισέρχονται σε μία δακτυλιοειδή ρευστοστερεά κλίνη, η οποία περιέχει και τους σωλήνες παραγωγής ατμού.

Η κλίνη δεν παρουσιάζει υπερχείλιση, λόγω της διαρκούς αφαίρεσης υλικού από το κάτω μέρος, για την εισαγωγή του στο θάλαμο καύσης υψηλής ταχύτητας.



# Καύση άνθρακα



## Διατάξεις ρευστοστερεάς κλίνης που βασίζονται στην πίεση λειτουργίας

Ανάλογα με την πίεση λειτουργίας του συστήματος, η τεχνολογία ρευστοστερεάς κλίνης άνθρακα αποτελείται από δύο βασικές κατηγορίες διεργασιών:

- καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό ατμοσφαιρική πίεση, και
- καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση.



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Η διεργασία καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό ατμοσφαιρική πίεση (AFBC- Atmospheric Fluidized Bed Combustion) εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε μεγάλους βιομηχανικούς κλιβάνους (90 t/h ατμού ή μεγαλύτερους), αλλά και σε κλιβάνους για την παραγωγή ατμού για ανάγκες βιομηχανικών διεργασιών, ανάγκες θέρμανσης ή/και παραγωγής ηλεκτρισμού.

Ο κλίβανος χρησιμοποιεί μία διάταξη

- κλίνης φουσαλίδων, ή
- κλίνης με ανακυκλοφορία.

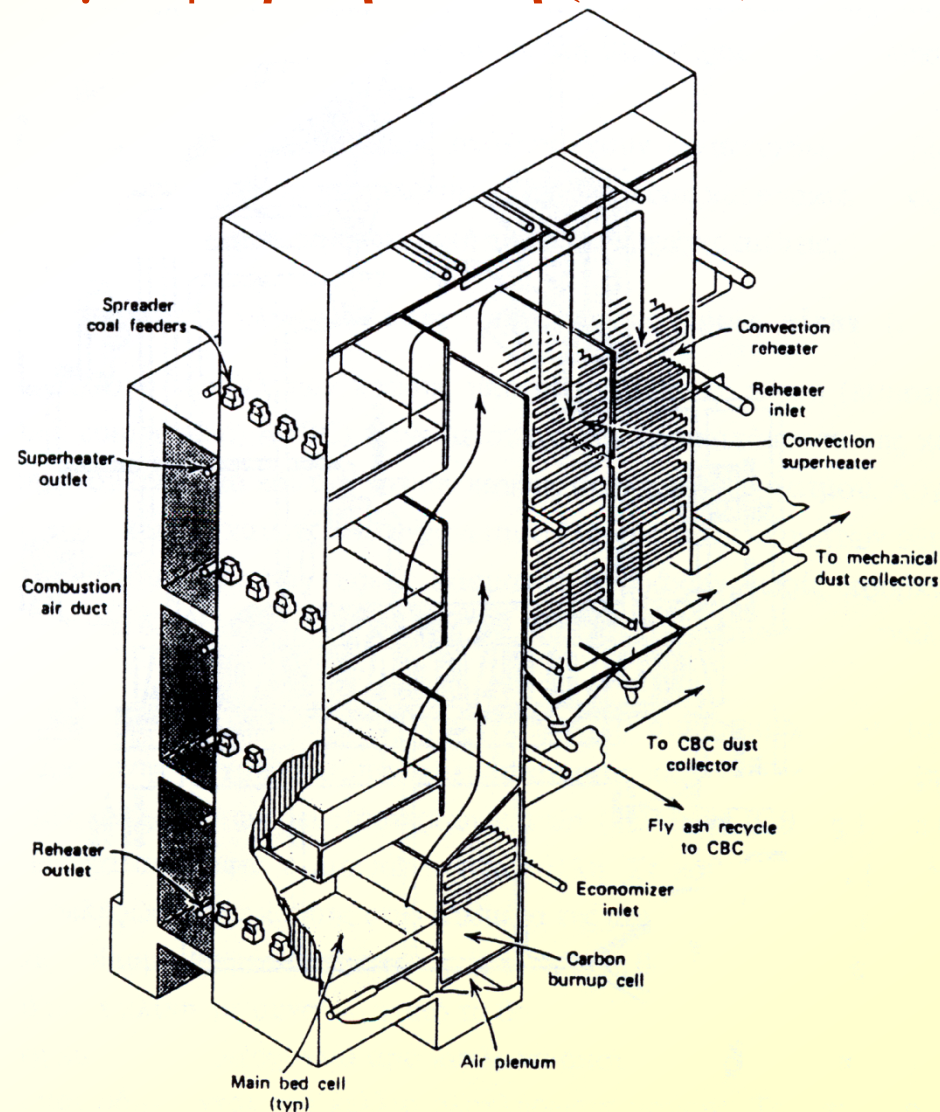


# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Στο Σχήμα παρουσιάζεται μία διάταξη ατμοπαραγωγής σε καυστήρα ρευστοστερεάς κλίνης, για ένα σταθμό ηλεκτροπαραγωγής 150 MW. Η μονάδα είναι σχεδιασμένη για παραγωγή ατμού σε 240 bar (3500 psi) και 540°C (1000°F) και υπερθέρμανση στους 560°C (1050°F).

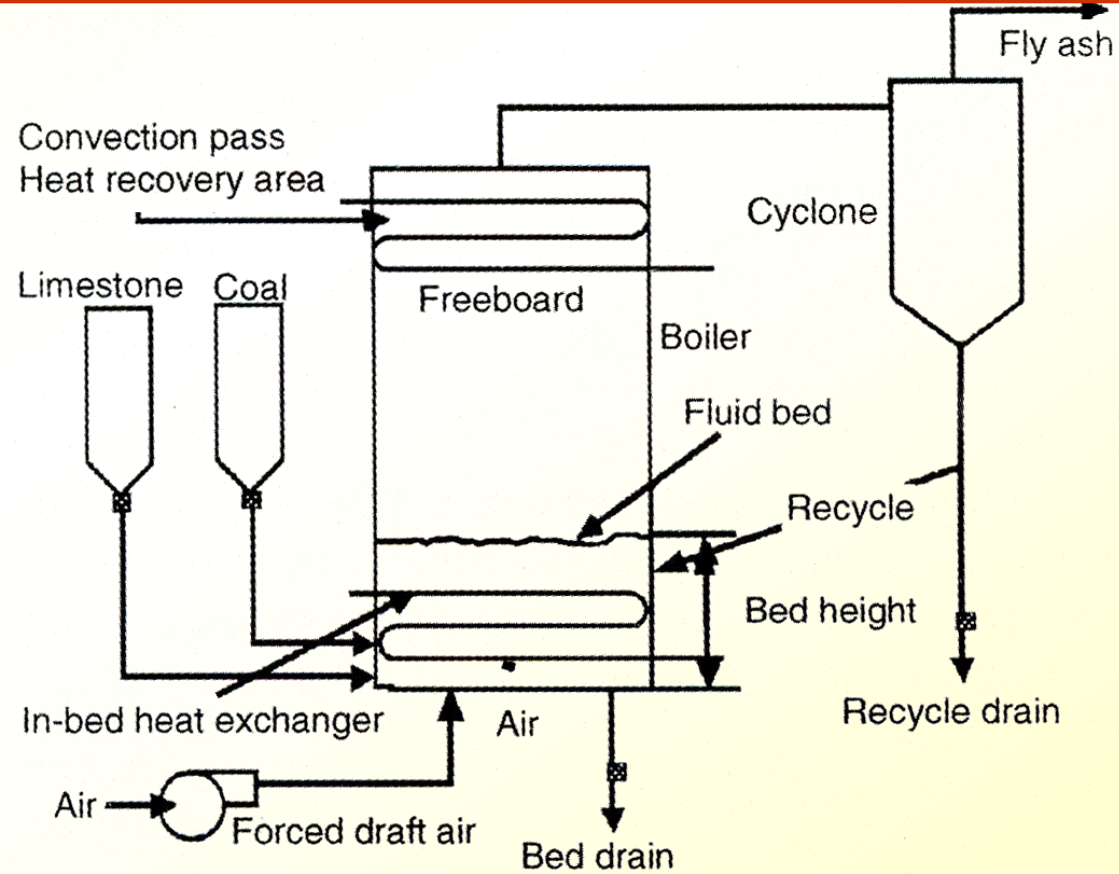
Για εγκαταστάσεις μεγαλύτερης δυναμικότητας αυξάνεται το πλάτος της μονάδας. Στην διάταξη αυτή η τροφοδοσία του στερεού στην κλίνη γίνεται από επάνω και χρησιμοποιείται ενιαία διάταξη εναλλαγής θερμότητας με συναγωγή.



Η χαμηλή θερμοκρασία της κλίνης μειώνει την δημιουργία επισκωριώσεων και επικαθίσεων

Στο ελεύθερο όριο (**freeboard**) επιτυγχάνεται ένα επιπλέον 10% με 20% της καύσης του άνθρακα. Όμως, τα μικρά σωματίδια συμπαρασύρονται και πρέπει να απομακρυνθούν σε ένα κυκλώνα. Η περιεκτικότητα των σωματιδίων που απομακρύνονται σε άκαυστο άνθρακα και ασβεστόλιθο που έχει αντιδράσει, είναι ιδιαίτερα υψηλή και δικαιολογεί την ανακύκλωση στην κλίνη. Η ιπτάμενη τέφρα κατακρατείται σε μία ηλεκτροστατική συσκευή καθίζησης, ή ένα υφασμάτινο σακκόφιλτρο.

αριθμός, αφού διασπασθεί, αντιδρά με  $\text{SO}_2$  για παραμονής στην κλίνη είναι περίπου 1 λεπτό, το 90%.



Σχηματική απεικόνιση ρευστοστερεάς κλίνης φυσαλίδων υπό ατμοσφαιρική πίεση



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Η χαμηλή θερμοκρασία της κλίνης μειώνει την δημιουργία επισκωριώσεων και επικαθίσεων και τον σχηματισμό  $\text{NO}_x$ , ενώ ο ασβεστόλιθος, αφού διασπασθεί, αντιδρά με  $\text{SO}_2$  για σχηματισμό θειϊκού ασβεστίου. Ο χρόνος παραμονής στην κλίνη είναι περίπου 1 λεπτό, το οποίο συνήθως αρκεί για καύση κατά 80-90%.

Στο ελεύθερο όριο (**freeboard**) επιτυγχάνεται ένα επιπλέον 10% με 20% της καύσης του άνθρακα. Όμως, τα μικρά σωματίδια συμπαρασύρονται και πρέπει να απομακρυνθούν σε ένα κυκλώνα. Η περιεκτικότητα των σωματιδίων που απομακρύνονται σε άκαυστο άνθρακα και ασβεστόλιθο που έχει αντιδράσει, είναι ιδιαίτερα υψηλή και δικαιολογεί την ανακύκλωση στην κλίνη.

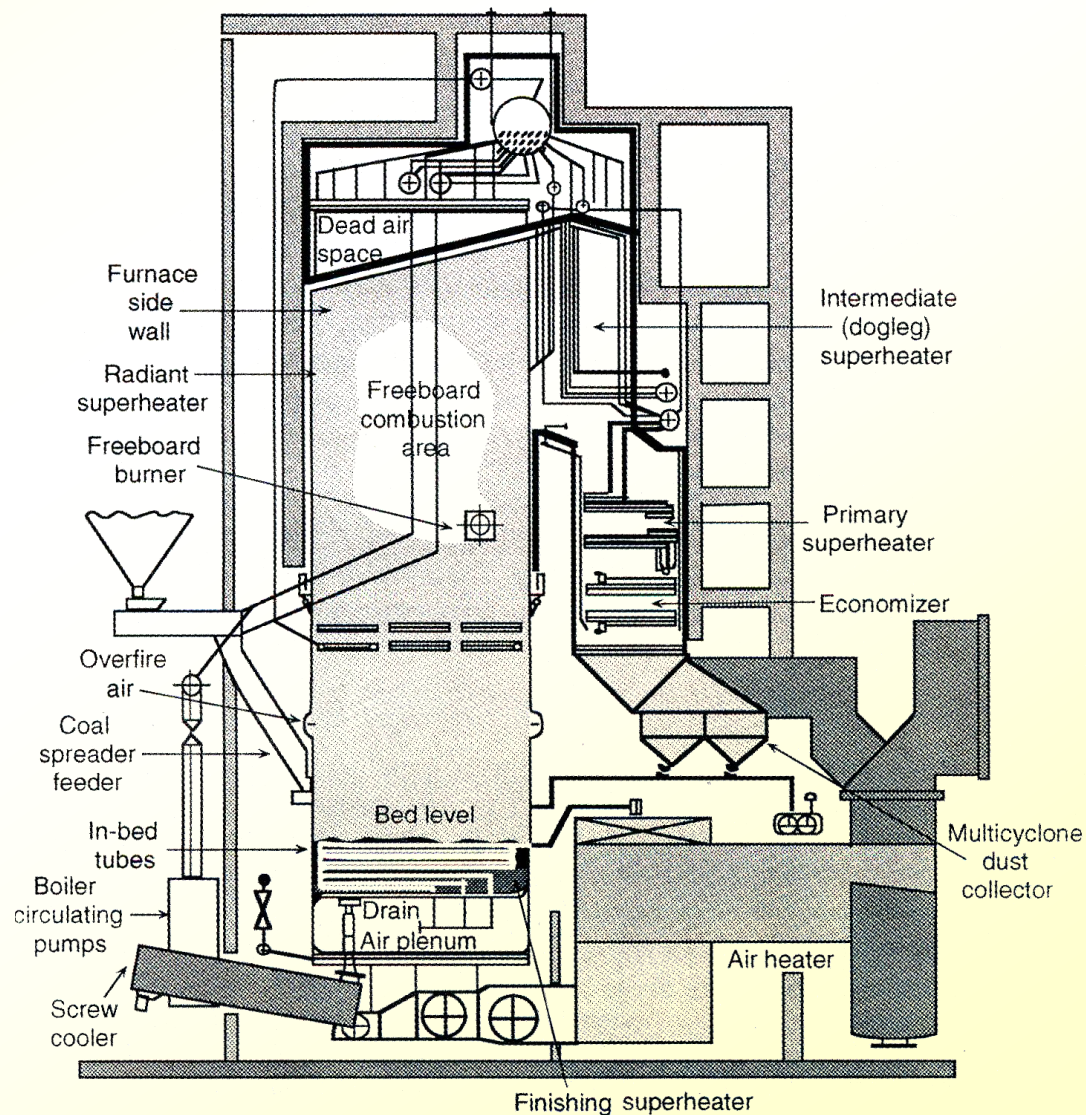
Η ιπτάμενη τέφρα κατακρατείται σε μία ηλεκτροστατική συσκευή καθίζησης, ή ένα υφασμάτινο σακκόφιλτρο.



# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Ένα παράδειγμα της διάταξης της κλίνης φουσαλίδων είναι η μονάδα **Black Dog 2** της Εταιρίας **Northern States Power**, η οποία τέθηκε σε εμπορική λειτουργία το **1986**.





# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Η απόδοση της μονάδας αξιολογήθηκε με βάση την διαθεσιμότητά της, των στατιστικών λειτουργίας του κλιβάνου και των χρόνων που απαιτούνται για την έναρξη λειτουργίας. Η διαθεσιμότητα για μία περίοδο δοκιμής το 1988 ήταν 58,3%. Η αποδοτικότητα του κλιβάνου σε πλήρη λειτουργία ήταν 86,8%. Η έναρξη λειτουργίας από το σημείο αδράνειας (έναρξη από κρύο) απαιτούσε περίπου 8 ώρες, ενώ η έναρξη λειτουργίας υπό θερμοκρασία περίπου 1 ώρα.

Η μονάδα χρησιμοποίησε διάφορα καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων και υποασφαλτούχων ανθράκων, επιδεικνύοντας επιτυχώς την ευελιξία στην χρήση του καυσίμου που προσφέρει αυτή η τεχνολογία.





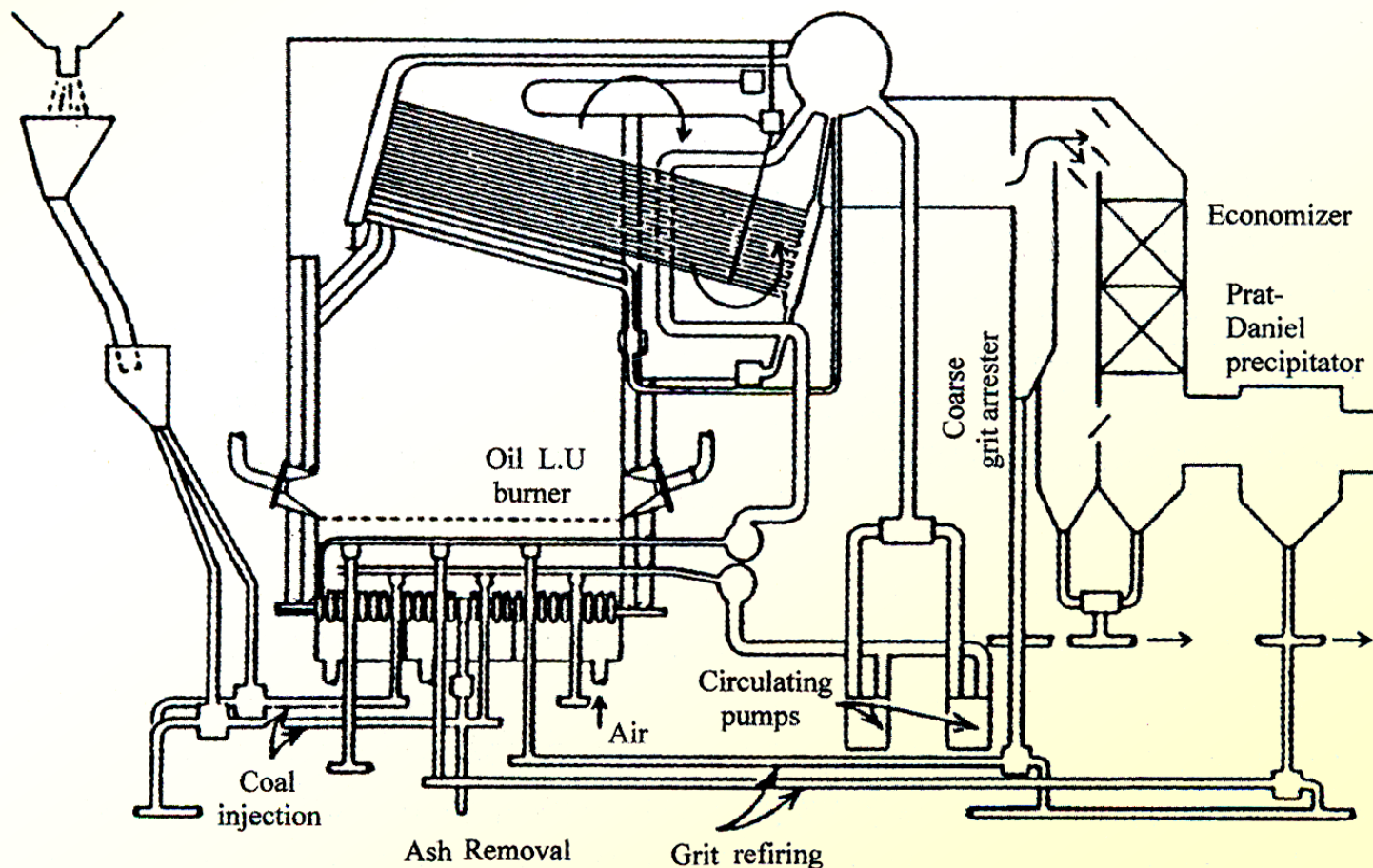
# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

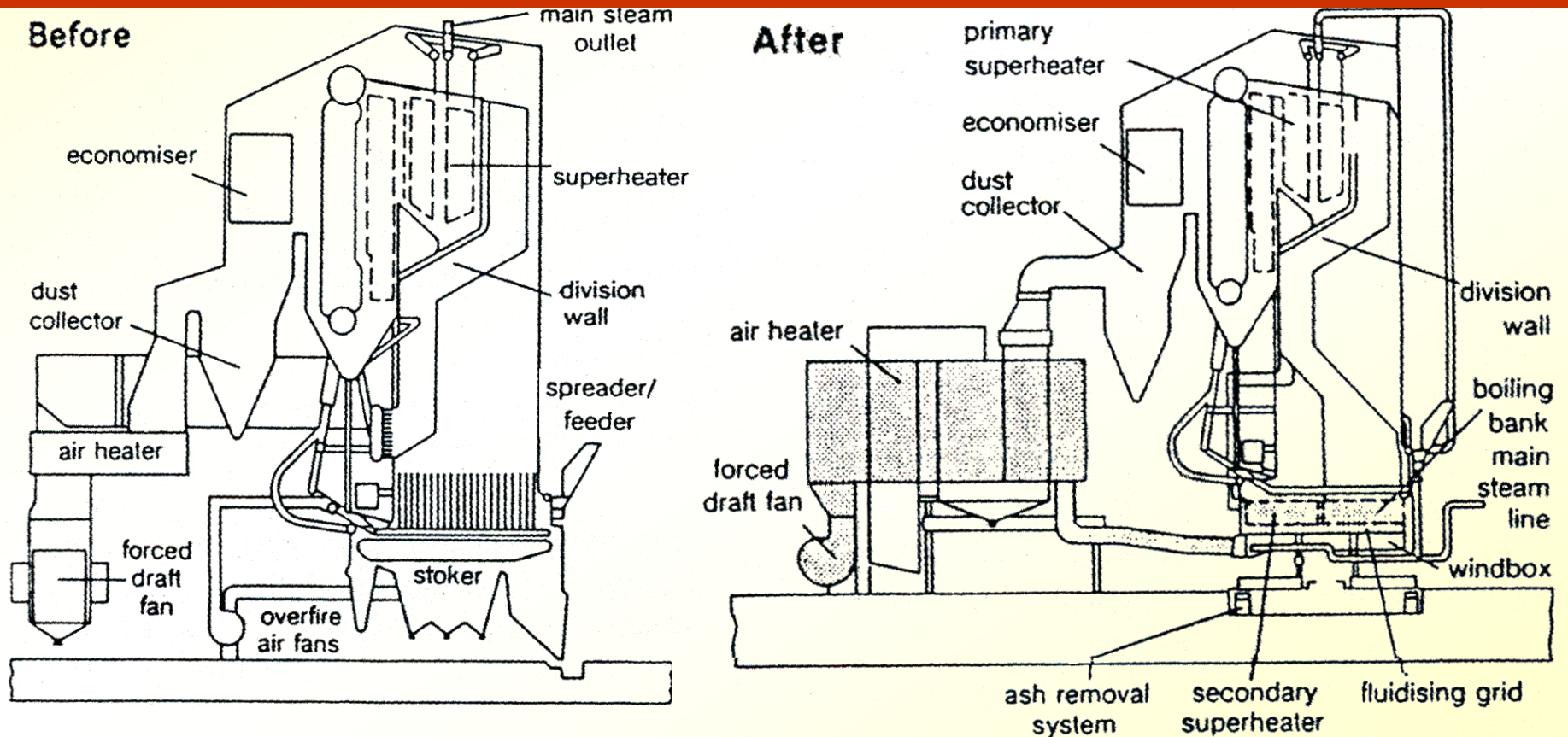
Η πρώτη πιλοτική μονάδα καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό ατμοσφαιρική πίεση κατασκευάστηκε στην Σκωτία, από την Εταιρία Babcock Combustion System Ltd., το 1975.

Το μέγεθος αυτής της κλίνης ήταν 3m x 3m.

Από τότε η τεχνολογία καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό ατμοσφαιρική πίεση έχει επιδειχθεί σε κλιβάνους ηλεκτροπαραγωγικών εταιρειών με μονάδες μέχρι 150MW.



Η μονάδα χρησιμοποιούσε αρχικά μία εστία διασποράς, και το 1987 μετατράπηκε σε μονάδα ρευστοστερεάς κλίνης με φουσαλλίδες, χαμηλής ταχύτητας ρευστοαιώρησης. Αξιοποιήθηκε το υπάρχον σύστημα τροφοδοσίας μεταβλητής ταχύτητας καθώς και ο εξοπλισμός του λέβητα και των μονωτικών τοιχωμάτων του λέβητα. Προστέθηκαν τυρβώδης προθερμαντής αέρα, φουσητήρες ελκυσμού, όργανα ελέγχου και βοηθητικό σύστημα ρευστοαιώρησης. Για την δημιουργία της κλίνης τροφοδοτείται άμμος με βαρύτητα από δύο δοχεία, διαμέσου δύο σημείων φόρτωσης πάνω από την αρχική εστία.



Μετατροπή μιας εστίας διασποράς 80 Mwe σε ένα σύστημα ABFC κλίνης φουσαλίδων (HFA)



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Η μονάδα χρησιμοποιούσε αρχικά μία εστία διασποράς, και το 1987 μετατράπηκε σε μονάδα ρευστοστερεάς κλίνης με φυσαλλίδες, χαμηλής ταχύτητας ρευστοαιώρησης. Αξιοποιήθηκε το υπάρχον σύστημα τροφοδοσίας μεταβλητής ταχύτητας καθώς και ο εξοπλισμός του λέβητα και των μονωτικών τοιχωμάτων του λέβητα. Προστέθηκαν τυρβώδης προθερμαντής αέρα, φυσητήρες ελκυσμού, όργανα ελέγχου και βοηθητικό σύστημα ρευστοαιώρησης. Για την δημιουργία της κλίνης τροφοδοτείται άμμος με βαρύτητα από δύο δοχεία, διαμέσου δύο σημείων φόρτωσης πάνω από την αρχική εστία.

Η εγκατάσταση λειτούργησε για 5500 h τον πρώτο χρόνο λειτουργίας. Κάποια προβλήματα συσσωμάτωσης της κλίνης, παρατηρήθηκαν το πρώτο διάστημα λειτουργίας, λόγω της εμφάνισης τοπικών αναγωγικών συνθηκών. Προβλήματα επικαθήσεων και "λάσπης" (τηγμένης τέφρας) που ήταν συχνά στην αρχική εγκατάσταση μηδενίστηκαν.

Η μονάδα εμφάνισε αξιόπιστη λειτουργία για φορτία μεταβαλλόμενα από 25 έως 80 MWe. Απαιτήθηκαν μόνο ορισμένες αντικαταστάσεις αυλών και επισκευές για την αντιμετώπιση μηχανικής διάβρωσης. Για την προστασία των επιφανειών εναλλαγής από μηχανική διάβρωση χρησιμοποιήθηκε ειδική επικάλυψη.



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Οι κλίβανοι καύσης AFBC με ανακυκλοφορία είναι σε πολλά σημεία παρόμοιοι με τους κλιβάνους καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη φυσαλίδων υπό ατμοσφαιρική πίεση. Οι διαφορές έγκεινται στις μικρότερες διαστάσεις των σωματιδίων άνθρακα και ασβεστόλιθου και στις υψηλότερες ταχύτητες των αερίων.

Ετσι, οι κλίβανοι είναι υψηλότεροι, με μικρότερες διατομές και συνήθως δεν συμπεριλαμβάνουν εναλλάκτες θερμότητας ενσωματωμένους στην κλίνη, λόγω της πιθανότητας διάβρωσης από τις υψηλές ταχύτητες.

Το σύστημα τροφοδοσίας απαιτεί λιγότερα σημεία τροφοδοσίας, κατά μία τάξη μεγέθους, λόγω της αυξημένης ανάμειξης των στερεών, ενώ ο κυκλώνας βρίσκεται πριν από τις επιφάνειες συναγωγής θερμότητας, ώστε να τις προστατεύει από την διάβρωση εξ' αιτίας της μεγάλης ποσότητας και ταχύτητας των στερεών, και λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες.

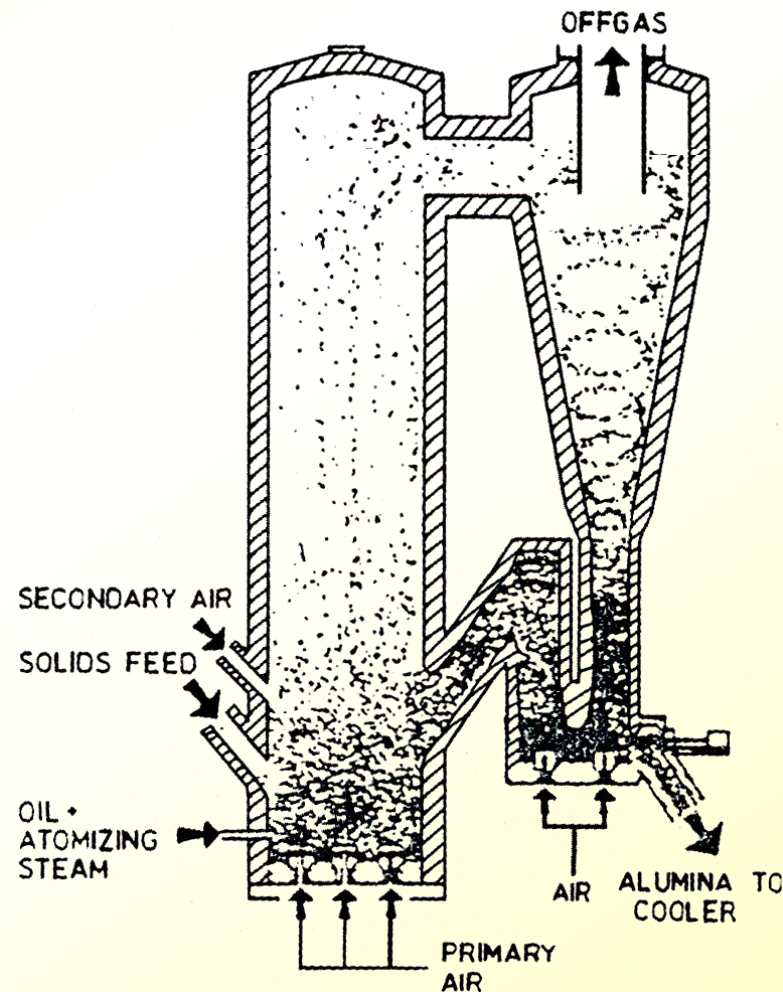


# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Η κλίνη καλύπτει όλον τον όγκο του κλιβάνου, αν και το μεγαλύτερο μέρος της μάζας βρίσκεται στο χαμηλότερο τρίτο της κλίνης.

Ένα μεγάλο τμήμα των στερεών μεταφέρεται έξω από τον κλίβανο, διαχωρίζεται στον κυκλώνα και επιστρέφει στον κλίβανο. Η καύση λαμβάνει χώρα, τόσο στον κλίβανο, όσο και στον κυκλώνα.



Καύση σε 2 στάδια σε μια ρευστοστερεά κλίνη Lurgi με ανακυκλοφορία



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Μεταξύ των πλεονεκτημάτων των κλιβάνων καύσης AFBC με ανακυκλοφορία είναι η δυνατότητά τους να **χρησιμοποιούν καύσιμα μικρής θερμογόνου δύναμης**, τα οποία έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε μη καύσιμη ύλη και οι υψηλοί ρυθμοί εναλλαγής θερμότητας (λόγω των μικρών μεγεθών των σωματιδίων και των υψηλότερων ταχυτήτων των αερίων), οι οποίοι επιτρέπουν αυξημένη φόρτιση.

Επιπρόσθετα, λόγω της σταδιακής καύσης, ο σχηματισμός NO<sub>x</sub> μειώνεται. Επίσης, η αντίδραση αποθείωσης εκτελείται με ταχύτερο ρυθμό, περισσότερη χρήση ασβεστόλιθου και συνολικά μεγαλύτερη συγκράτηση θείου με λεπτότερα σωματίδια, έτσι ώστε να αναμένεται τελικά ένας υψηλότερος βαθμός συγκράτησης θείου σε χαμηλές αναλογίες Ca/S (μικρότερες του 1,5). Αυτά τα ευρήματα έχουν επιβεβαιωθεί για άνθρακες χαμηλής τάξης με υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και θείο (45% και 8%, αντίστοιχα).



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και οξειδίων του θείου από δοκιμές πιλοτικής κλίμακας που καίνε λιγνίτη, υποασφαλτούχο και ασφαλτούχο άνθρακα, τόσο σε μία ρευστοστερεά κλίνη με ανακυκλοφορία, όσο και σε έναν κλίβανο κονιοποιημένου άνθρακα, συγκρίνονται στον Πίνακα.

### Σύγκριση εκπομπών από άνθρακες δοκιμών

	Pittsburgh #8		Powder River Basin		North Dakota	
	CFB <sup>a</sup>	pc	CFB	Pc	CFB	pc
NO <sub>x</sub> , lb/MM Btu	0.11	1.38	0.32	1.23	0.19	0.96
N <sub>2</sub> O lb/MM Btu	0.16	~0	0.03	~0	0.06	~0
Εκπεμπόμενο SO <sub>2</sub> , lb/MM Btu	3.02	3.36	0.68	0.55	1.40	1.42
Απορροφητικό υλικό απαιτούμενο για κατακράτηση 90%, lb/MM Btu	15.6	NA <sup>b</sup>	3.0	NA	5.1	NA
Χρησιμοποίηση απορροφητικού υλικού, %	39	NA	31	NA	37	NA

<sup>a</sup> CFB στους 1550 °F, 20% περίσσεια αέρα, ταχύτητα 16-ft/sec, και κατανομή πρωτογενούς και δευτερογενούς αέρα 60:40.

<sup>b</sup> Δεν ισχύει

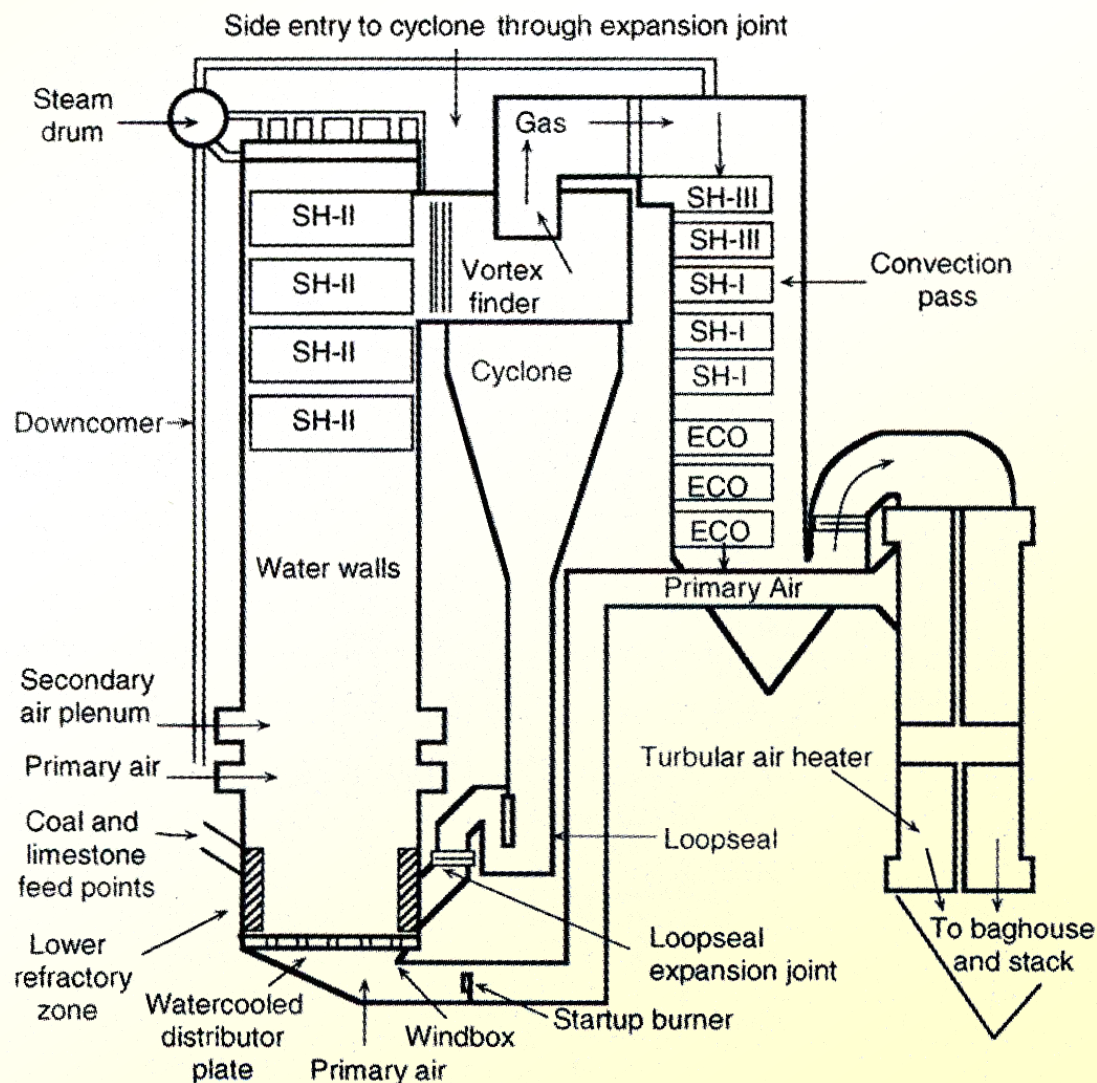


# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Ένα παράδειγμα της τεχνολογίας καύσης AFBC με ανακυκλοφορία είναι η μονάδα του θερμοηλεκτρικού σταθμού της Colorado-Ute Electric Association Nucla.

Η μονάδα χρησιμοποιούσε, σαν καύσιμο έναν τοπικό άνθρακα σε τρεις κλιβάνους εστίας καύσης. Αναβαθμίστηκε με ένα κλίβανο καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη με ανακυκλοφορία, για την παραγωγή 110MW με χαμηλά επίπεδα εκπομπών.







# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Η μονάδα τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το 1988. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποδοχής έδειξαν μία αποδοτικότητα καύσης της τάξης του 98,9% και κατακράτηση θείου της τάξης του 70% και 95%, σε αναλογίες Ca/S 1,5 και 4 αντίστοιχα. Οι σωματιδιακές εκπομπές είχαν ένα βαθμό αδιαφάνειας κάτω από 5%. Η εκπομπή NO<sub>x</sub> ήταν περίπου η μισή από το όριο σχεδιασμού των 129 mg/MJ. Η εκπομπή SO<sub>2</sub> βρισκόταν στο όριο συμμόρφωσης των 172 mg/MJ.

Σε όλον τον κόσμο, βρίσκονται υπό κατασκευή, ή λειτουργούν, 22 μονάδες δυναμικότητας μεγαλύτερης από 100 MWe. Μελλοντικά, προβλέπεται να υπάρχουν μονάδες δυναμικότητας μέχρι 650MWe.



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Η μεγαλύτερη μονάδα συστήματος καύσης ρευστοστερεάς κλίνης, υπό ατμοσφαιρική πίεση με ανακυκλοφορία, έχει δυναμικότητα 250 MWe και λειτουργεί στην περιοχή Provence/Gardanne στην Γαλλία, από την εταιρία GEC Alstrom-Stein. Βασίζεται σε σχεδιασμό της Lurgi και βρίσκεται σε εμπορική λειτουργία από το 1996.

Έχει σχεδιασθεί να χρησιμοποιεί υποασφαλτούχο άνθρακα με περιεκτικότητα σε θείο περίπου 3,8%. Μία αποδοτικότητα αποθείωσης μεγαλύτερη από 97% μπορεί να επιτευχθεί στην μονάδα αυτή, όταν η φυσική αναλογία Ca και S είναι μεγαλύτερη από 2,5. Η απουσία προβλημάτων επικαθίσεων ή επισκωριώσεων επιτρέπει την μείωση της περίσσειας αέρα στο 17% κατά την κανονική λειτουργία, με αποδοτικότητα λέβητα περίπου 95%.

Η Εταιρία Texas-New Mexico Power, παρήγαγε δύο μονάδες ρευστοστερεάς κλίνης με ανακυκλοφορία, δυναμικότητας 165 MWe, που χρησιμοποιούν λιγνίτη, οι οποίες ξεπέρασαν όλες τις προσδοκίες απόδοσης και προστασίας του περιβάλλοντος.



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Πρόσφατα, αναπτύσσονται σχεδιασμοί συστημάτων καύσης ρευστοστερεάς κλίνης με ανακυκλοφορία, με μειωμένη κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας, μικρότερες ανάγκες πυριμάχων, πιο κατάλληλα συστήματα υποστήριξης και υπερκρίσιμες πιέσεις ατμού, με στόχο την βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους, όπως η μονάδα δυναμικότητας 250 MWe, στην Mangrol της Ινδίας, που χρησιμοποιεί λιγνίτη με μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 2,5% και η οποία ξεκίνησε να λειτουργεί το 1999.

Η μελλοντική παραγωγή ισχύος, από άνθρακες, αναμένεται να προέρχεται από μονάδες "Ολοκληρωμένης Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου", που βασίζονται σε συστήματα καύσης και αεριοποίησης ρευστοστερεάς κλίνης με ανακυκλοφορία.



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)

Ξεκινώντας από μία συνολική δυναμικότητα θερμοηλεκτρικών σταθμών που χρησιμοποιούν άνθρακα και συστήματα καύσης ρευστοστερεάς κλίνης με ανακυκλοφορία 1,36 GWe στην Ευρώπη (8 GWe σε όλον τον κόσμο), το 1995, η δυναμικότητα αυτή αναμένεται να αυξηθεί σε **6,7GWe στην Ευρώπη** (42,4 GWe σε όλον τον κόσμο) **μέχρι το 2010** και σε **9,9 GWe στην Ευρώπη** (και 74,2 GWe σε όλον τον κόσμο) **μέχρι το 2020**.



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)

Μία μεγάλη προσπάθεια εστιάζεται στην ανάπτυξη κλιβάνων ρευστοστερεάς κλίνης υπό πίεση (PFBC). Πέρα από το ότι αυτοί διατηρούν όλα τα πλεονεκτήματα λειτουργίας των ρευστοποιημένων κλινών υπό ατμοσφαιρική πίεση, προσφέρουν επίσης:

- ✓ μείωση του μεγέθους του θαλάμου καύσης για μία δεδομένη θερμική δυναμικότητα, επειδή ο ρυθμός της αντίδρασης αυξάνεται με την πίεση λειτουργίας (0,3 – 1 MPa) - το εμβαδόν της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας πρέπει να αυξηθεί ανάλογα με την αύξηση της πίεσης και κατά συνέπεια η κλίνη πρέπει να είναι βαθύτερη από ότι στην περίπτωση της καύσης υπό ατμοσφαιρική πίεση, ώστε οι επιπλέον σωλήνες να βυθίζονται-
- ✓ η αποδοτικότητα της καύσης είναι τέτοια, ώστε μία κανονικά σχεδιασμένη μονάδα να εξαλείφει την ανάγκη ανακύκλωσης των στερεών
- ✓ η κατακράτηση θείου βελτιώνεται με την πίεση, χρησιμοποιώντας δολομίτη αντί για ασβεστόλιθο, και
- ✓ οι εκπομπές NO<sub>x</sub> είναι σημαντικά χαμηλότερες από ότι στην περίπτωση μίας κλίνης που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση.



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)

Η πλήρης εκμετάλλευση των μονάδων καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση απαιτεί την **χρήση αεριοστροβίλων στο κύκλωμα.**

Για την επίτευξη βελτιωμένης θερμικής αποδοτικότητας ακολουθούνται δύο βασικές προσεγγίσεις. Η μία χρησιμοποιεί **συνδυασμένο κύκλο στροβίλων ατμού-αερίου.** Η θερμότητα η οποία εξάγεται από την ρευστοστερεά κλίνη χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και τα αέρια της καύσης εκτονώνονται διαμέσου ενός αεριοστροβίλου. Η άλλη, χρησιμοποιεί ένα **αδρανές αέριο ή αέρα σε ένα κλειστό κύκλωμα,** για την εξαγωγή της θερμότητας από την κλίνη. Όμως, για την μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων, θα πρέπει ακόμα να παραχθεί ατμός σε κάποιο στάδιο μετά τον στρόβιλο των αερίων της καύσης, καθώς και στις μεταξύ των σταδίων συσκευές ψύξης του στροβίλου του κλειστού κυκλώματος.

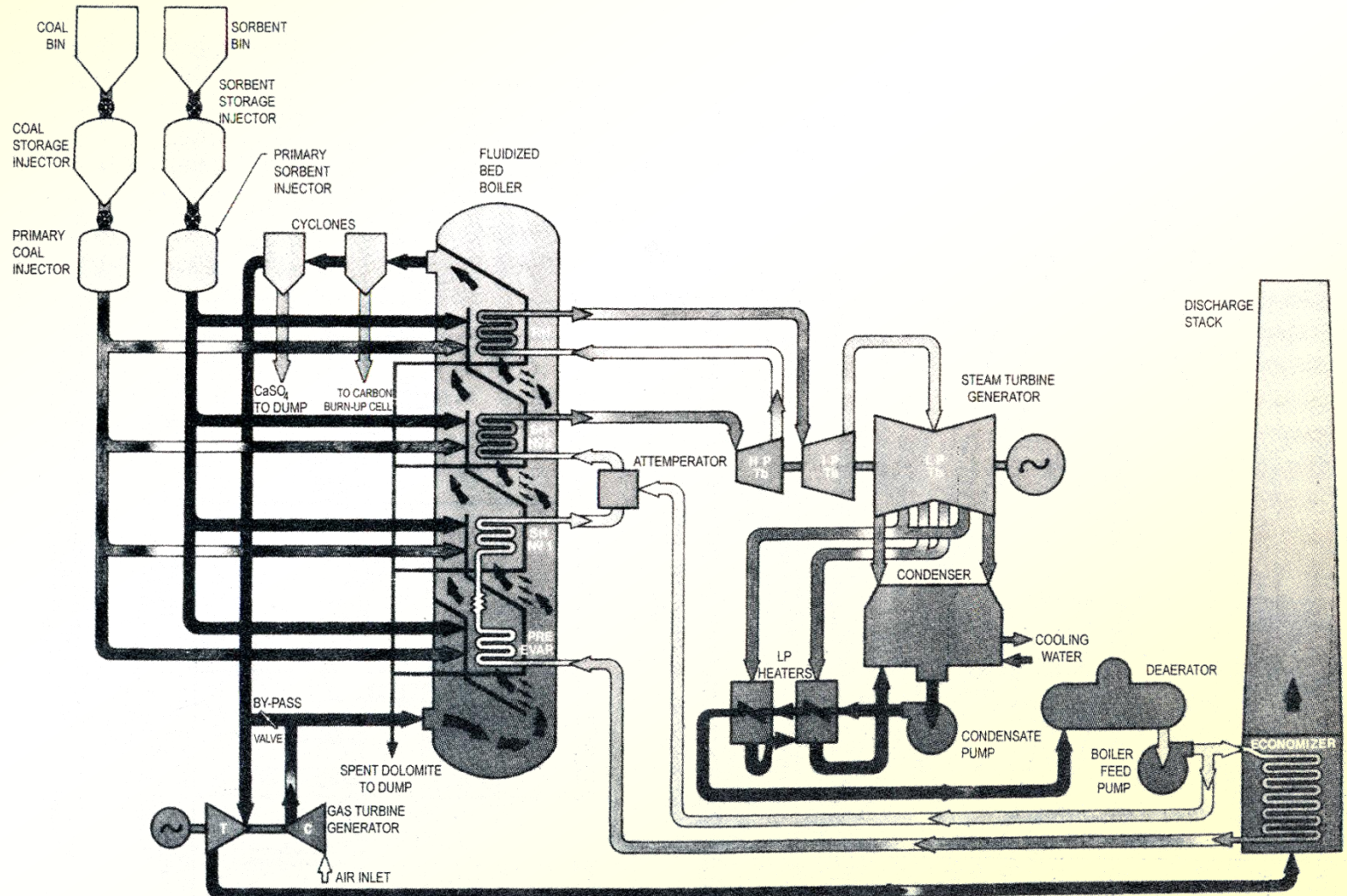
Η χρήση των συνδυασμένων κύκλων ατμού και αερίου παρέχει στο σύστημα καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση ένα πλεονέκτημα αποδοτικότητας της τάξης του 3-4%, έναντι των συστημάτων καύσης ρευστοστερεάς κλίνης υπό ατμοσφαιρική πίεση.



# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)

Στο Σχήμα απεικονίζεται διαγραμματικά η διάταξη μεταβολών του κύκλου.

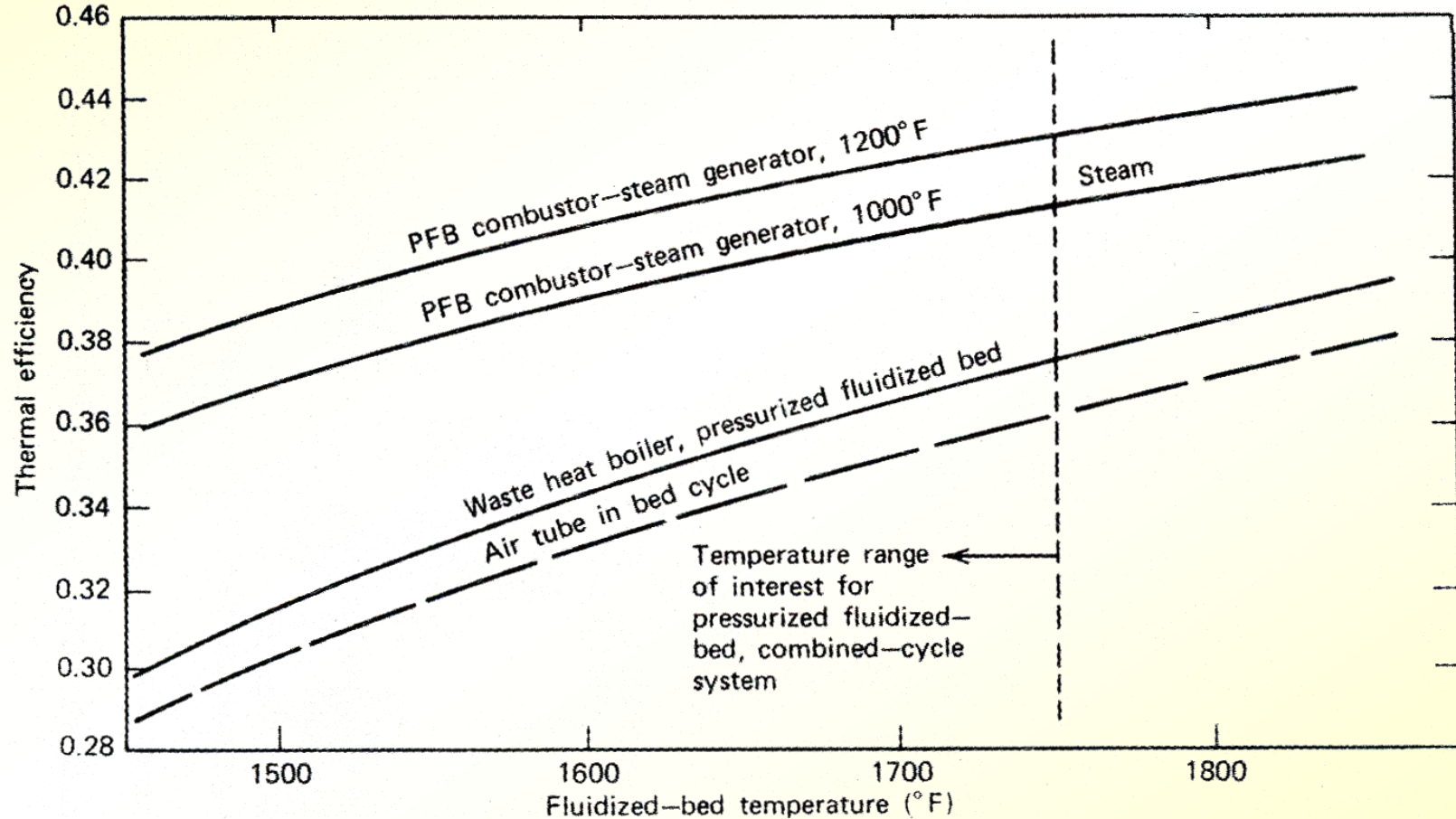


Θερμοηλεκτρικός σταθμός συνδυασμένου κύκλου με χρήση άνθρακα



# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)



Σύγκριση αποδοτικότητας εναλλασσομένων κύκλων, έναντι της θερμοκρασίας του κλιβάνου ρευστοστερεάς κλίνης



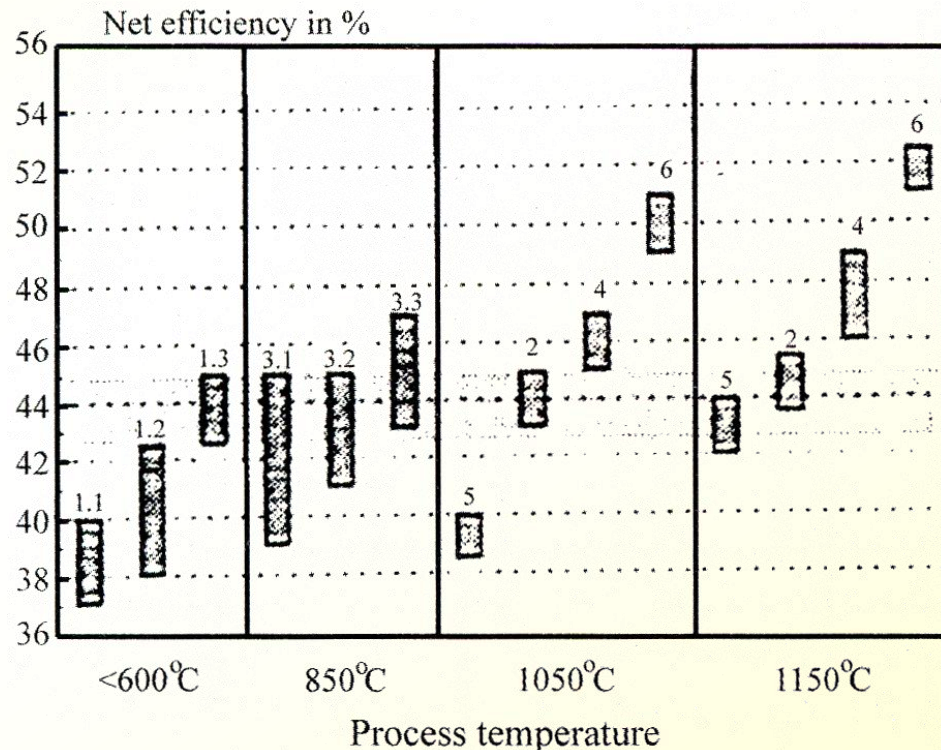


# Καύση άνθρακα

## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)

Με την υφιστάμενη σήμερα τεχνολογία μπορούν να κατασκευασθούν θερμοηλεκτρικοί σταθμοί συνδυασμένου κύκλου, με αδιαβατική καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση. Μέσω διαφόρων μετατροπών των διεργασιών, και ειδικότερα επαναθέρμανση των καυσαερίων, είναι δυνατόν να αυξηθεί η μέση θερμοκρασία της διεργασίας και κατά συνέπεια η αποδοτικότητα της μονάδας.

Το Σχήμα δείχνει την αποδοτικότητα διαφόρων διεργασιών ενός θερμοηλεκτρικού σταθμού, ανάλογα με τις μέγιστες θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται.



1. Conventional steam process
  - 1.1 Lignite 540°C
  - 1.2 Bituminous coal <560°C
  - 1.3 Bituminous coal <600°C
2. Compound/Combined process
3. Pressurized fluidized bed combustion
  - 3.1 Bituminous coal (Cooled combustion chamber)
  - 3.2 Bituminous coal (Uncooled combustion chamber)
  - 3.3 Lignite (Uncooled combustion chamber)
4. Pressurized bituminous coal combustion
5. Pressurized coal gasification
6. Natural gas combined cycle



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)

Μονάδες για λιγνίτη, και ειδικά αυτές με επαναθέρμανση των καυσαερίων ή ολοκληρωμένη ξήρανση, έχουν πετύχει αποδοτικότητες πάνω από 45% (οι διεργασίες συνδυασμένου κύκλου με καύση σε PFBC ταιριάζουν ιδιαίτερα στην περίπτωση του λιγνίτη, επειδή το ύδωρ που περιέχεται στο καύσιμο συνεισφέρει στην παραγωγή ενέργειας στον στρόβιλο αερίου).



# Καύση άνθρακα



## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)

Τα συστήματα καύσης σε PFBC δεν είναι προς το παρόν τόσο ώριμα τεχνικά, όσο τα συστήματα καύσης σε AFBC. Τα τελευταία έτη, η έρευνα και ανάπτυξη των κλιβάνων καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση προχώρησε σημαντικά.

Με βάση τα αποτελέσματα μίας πιλοτικής μονάδας 15 MWe στο Malmo της Σουηδίας, κατασκευάσθηκαν πέντε μονάδες κλιβάνων καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση, με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρισμού μεταξύ 70 και 80MW από διάφορους άνθρακες, συμπεριλαμβανομένων ανθράκων χαμηλής τάξης υψηλής περιεκτικότητας σε θείο και τέφρα. Δύο μονάδες έχουν κατασκευασθεί στο Vartan της Σουηδίας, μία στο Tidd του Ohio στις ΗΠΑ, μία στο Escatron της Ισπανίας, και μια στο Wakamatsu της Ιαπωνίας. Δυο ακόμα μονάδες, δυναμικότητας 350 MWe η κάθε μία, έχουν πρόσφατα εγκατασταθεί στο Mountaneer των ΗΠΑ και στο Kgushu της Ιαπωνίας.



# Καύση άνθρακα

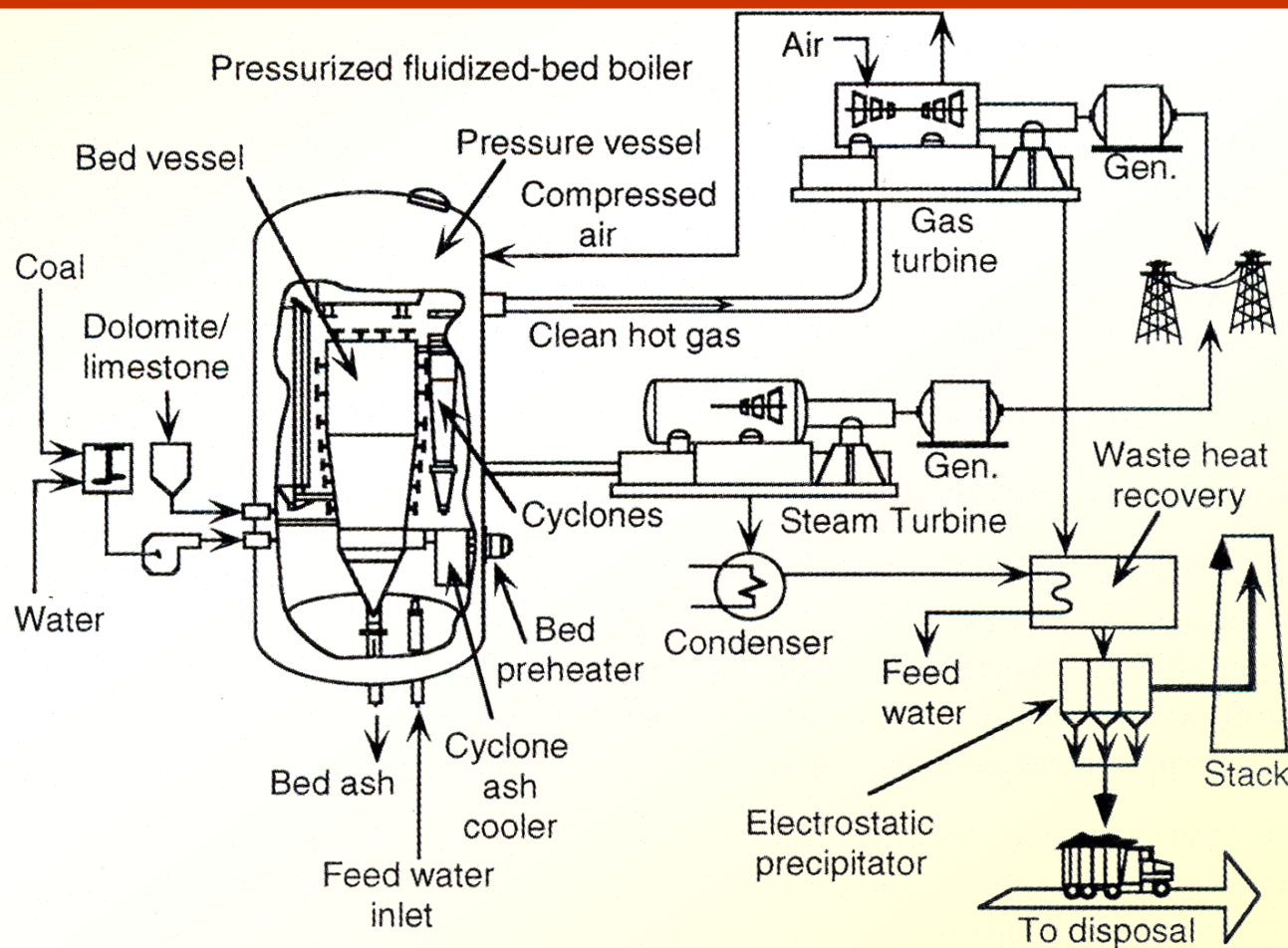


## Καύση σε ρευστοστερεά κλίνη υπό Πίεση (PFBC)

Το 1995 η συνολική δυναμικότητα των μονάδων καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση στην Ευρώπη ήταν 0,2 GWe (1,4 GWe σε παγκόσμια κλίμακα).

Η δυναμικότητα αυτή αναμένεται να αυξηθεί **μέχρι το 2010 σε 1,8 GWe στην Ευρώπη** (7,6 GWe σε παγκόσμια κλίμακα) και σε **4 GWe** (13,9 GWe σε παγκόσμια κλίμακα) **μέχρι το 2020.**

Τα αέρια τα οποία εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο ψύχονται περαιτέρω στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας, ο οποίος θερμαίνει το ύδωρ τροφοδοσίας του κλιβάνου. Τα αέρια καθαρίζονται στην ηλεκτροστατική συσκευή καθίζησης πριν τελικά εξαχθούν. Το ύδωρ τροφοδοσίας μετατρέπεται σε υπερθερμασμένο ατμό στον λέβητα του κλιβάνου καύσης, σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση και ο ατμός περνά από τον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή επιπλέον ηλεκτρισμού 58MW.



**Οι στόχοι του έργου ήταν η επίδειξη ενός κλιβάνου καύσης PFBC 70MW, η επαλήθευση της καταλληλότητας καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση με εφαρμογή συνδυασμένου κύκλου, η απομάκρυνση του SO<sub>2</sub> πάνω από 90%, η διατήρηση των εκπομπών NO<sub>x</sub> σε επίπεδα κάτω από 86 mg/MJ και η επίτευξη συνολικής αποδοτικότητας της μονάδας 38%, χρησιμοποιώντας το υφιστάμενο σύστημα ατμού.**

**Ο κλίβανος καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση λειτουργεί στα 1,2 MPa και ο αέρας καύσης παρέχεται από τον συμπιεστή του αεριοστρόβιλου. Ο πολτός νερού και άνθρακα τροφοδοτείται στην κλίνη της τέφρας του άνθρακα και του απορροφητικού υλικού, του δολομίτη. Τα θερμά αέρια της καύσης και τα συμπαρασυρόμενα σωματίδια περνούν μέσω των κυκλώνων, για απομάκρυνση του 98% των σωματιδίων. Τα θερμά αέρια, στην συνέχεια, εκτονώνονται στον αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρισμού 16 MW.**

**Τα αέρια τα οποία εξέρχονται από τον αεριοστρόβιλο ψύχονται περαιτέρω στον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας, ο οποίος θερμαίνει το ύδωρ τροφοδοσίας του κλιβάνου. Τα αέρια καθαρίζονται στην ηλεκτροστατική συσκευή καθίζησης πριν τελικά εξαχθούν. Το ύδωρ τροφοδοσίας μετατρέπεται σε υπερθερμασμένο ατμό στον λέβητα του κλιβάνου καύσης, σε ρευστοστερεά κλίνη υπό πίεση και ο ατμός περνά από τον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή επιπλέον ηλεκτρισμού 58MW.**