



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Εργαστήριο Εξευγενισμού και  
Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων

«Νέες Τεχνολογίες Αξιοποίησης  
Γαιανθράκων για Παραγωγή  
Ενέργειας»

---

Καθηγήτρια Δ. Βάμβουκα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΚΑΥΣΗ ΤΟΥ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΑ

#### 3.1. Εισαγωγή

#### 3.2. Χημικές Αντιδράσεις και Μηχανισμοί

3.2.1. Καύση των Πτητικών

3.2.2. Καύση του Εξανθρακώματος

#### 3.3. Χαρακτηριστικά του Γαιάνθρακα που Επηρεάζουν την Καύση

3.3.1. Δομή και Πετρογραφική Σύνθεση του Γαιάνθρακα

3.3.2. Περιεκτικότητα σε Οργανικά Στοιχεία

3.3.3. Περιεκτικότητα σε Υγρασία και Πτητικά

3.3.4. Θερμαντική Αξία

3.3.5. Ιδιότητες Αλεσιμότητας και Συσσωμάτωσης

3.3.6. Περιεκτικότητα σε Τέφρα και Σύνθεση αυτής

*I. Επίδραση στην Θερμοκρασία Αποσκλήρυνσης της Τέφρας*

*II. Επίδραση στο Ιξώδες της Σκωρίας*

*III. Επίδραση στις Επικαθίσεις*

3.3.7. Περιεκτικότητα σε Θείο



## **3.4. Συμβατικές Μέθοδοι Καύσης**

### 3.4.1. Εστίες Καύσης

*I. Εστίες Διασποράς*

*II. Εστίες Αλυσωτής Εσχάρας*

*III. Εστίες Καύσης Δονούμενης Εσχάρας*

*IV. Εστίες Καύσης με Τροφοδοσία Κάτω απ την Εσχάρα*

### 3.4.2. Κλίβανοι Κονιοποιημένου Γαιάνθρακα

### 3.4.3. Κλίβανοι Καύσης τύπου Κυκλώνα

## **3.5. Αναδυόμενες «Καθαρές» Τεχνολογίες**

### 3.5.1. Καύση Ρευστοστερεάς Κλίνης

*I. Διεργασία και Κύρια Σημεία*

*III. Διατάξεις που βασίζονται στην Πίεση Λειτουργίας*

### 3.5.2. Τεχνολογίες Ελέγχου Οξειδίων του Θείου και του Αζώτου

*I. Τεχνολογίες Ελέγχου Οξειδίων του Θείου*

*II. Τεχνολογίες Ελέγχου Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου*

### 3.5.3. Έργα Επίδειξης «Καθαρής» Καύσης Γαιάνθρακα

# Καύση του Γαιάνθρακα

---





## 3.1 Εισαγωγή

---

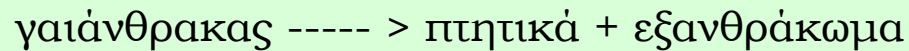
- ο γαιάνθρακας αποτελεί ένα ευρέως διαθέσιμο καύσιμο >4.5 Gtons παράγονται και καταναλώνονται ετησίως
- σε σχέση με το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο έχει εκτεταμένα αποθέματα, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν με χαμηλότερο κόστος
- η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα γίνεται:
  - 41% από γαιάνθρακα
  - 22% από φυσικό αέριο
  - 4% από πετρέλαιο
- όμως η καύση γαιάνθρακα έχει προξενήσει σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω εκπομπής ρυπαντών
- αντιμετώπιση: ανάπτυξη νέων τεχνολογιών: νέες μέθοδοι καύσης που εστιάζουν στον έλεγχο των εκπομπών

## 3.2. Χημικές Αντιδράσεις και Μηχανισμοί

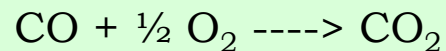
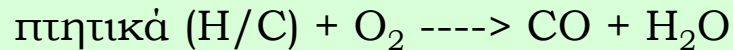
---

### Στάδια καύσης γαιάνθρακα:

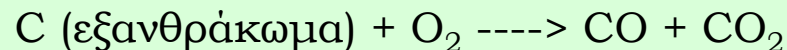
1. Θερμική διάσπαση δομής γαιάνθρακα



2. Οξείδωση πτητικής ύλης στην αέρια φάση μέσω απλών αντιδράσεων

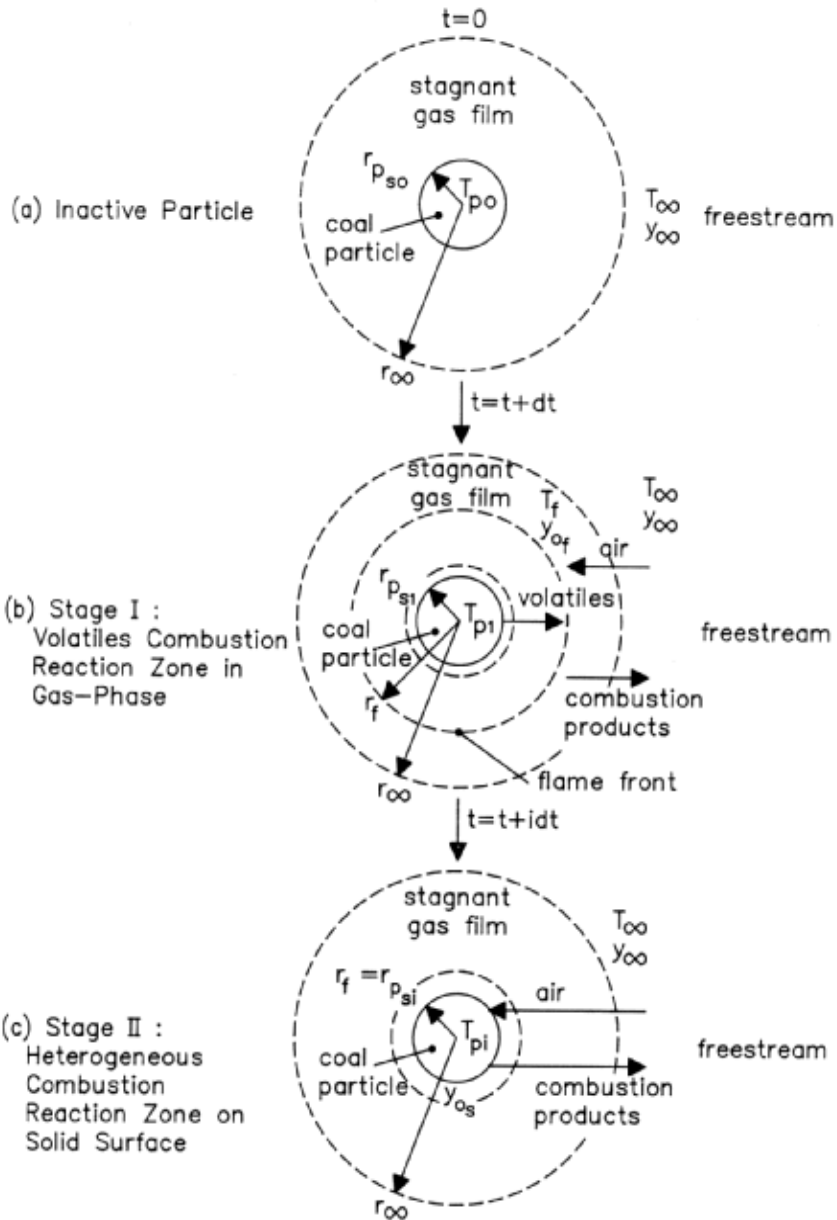


3. Καύση ανθρακούχου υπολείμματος (εξανθράκωματος) μέσω σύνθετων αντιδράσεων



### 3.2.1. Καύση των Πηητικών

#### Μοντέλο «καύσης σταγόνας πειρελαίου»



Αδρανές σωματίδιο

↓  
θέρμανση

Απελευθέρωση πηητικών γύρω από σωματίδιο  
→ ανάμιξη με αέρα → ακαριαία καύση

Θύλακας φλόγας πεπερασμένου πάχους διαδίδεται μέσα στο μίγμα αερίων και σταθεροποιείται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του στερεού, όπου μπορεί να φτάσει αρκετός αέρας για την καύση των πηητικών.

*Ο ρυθμός καύσης ελέγχεται από τον ρυθμό διάχυσης των αερίων στο οριακό στρώμα.*

Η ανάφλεξη ξεκινά σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του σωματιδίου, έτσι ώστε η καύση στην αέρια φάση και η ετερογενής καύση να εξελίσσονται ταυτόχρονα.

*Ο ρυθμός καύσης ελέγχεται από τον ρυθμό αποπητικοποίησης.*

## 3.2.2. Καύση του Εξανθρακώματος

Η αντίδραση καύσης περιγράφεται από παρακάτω βήματα:

- α)** Διάχυση αντιδρώντος αερίου μέσω του οριακού στρώματος προς την επιφάνεια του σωματιδίου
- β)** Μεταφορά θερμότητας μεταξύ σωματιδίου  $\leftrightarrow$  αντιδρώντος αερίου
- γ)** Διάχυση μάζας και θερμότητας μέσω των πόρων του σωματιδίου
- δ)** Εγγενής αντίδραση μεταξύ αντιδρώντος αερίου  $\leftrightarrow$  ενεργές επιφάνειες στο εσωτερικό και εξωτερικό του σωματιδίου
- ε)** Ομογενής οξείδωση μονοξειδίου άνθρακα μέσα στους πόρους του σωματιδίου και το αέριο οριακό στρώμα.

*Οι διεργασίες αυτές ελέγχονται κυρίως από τη φυσική δομή του εξανθρακώματος (δομή πόρων, εμβαδόν επιφάνειας, μέγεθος σωματιδίου, περιεκτικότητα σε ανόργανα).*



## Στάδιο δ:

ετερογενής καύση εξανθρακώματος περιλαμβάνει τις αντιδράσεις οξείδωσης:

### Κύριες αντιδράσεις:

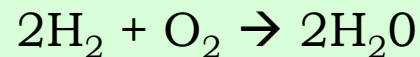
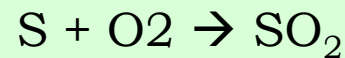
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$  Χημική προσρόφηση οξυγόνου πάνω στην επιφάνεια εξανθρακώματος και αντίδραση

$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$  Οξείδωση μονοξειδίου προς διοξείδιο του άνθρακα (για μεγάλα σωματίδια  $>2000\mu m$  επιτελείται στην περιοχή του οριακού στρώματος της αέριας φάσης, ενώ για μικρά σωματίδια ( $<100\mu m$ ) στην επιφάνεια του στερεού ή την περιοχή της ελεύθερης ροής)

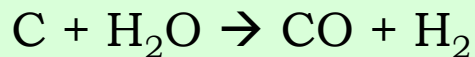
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$  Το διοξείδιο του άνθρακα προσκρούει στο θερμό εξανθράκωμα και ανάγεται σε μονοξείδιο

$C + O_2 \rightarrow CO_2$  ή διαφεύγει στο ρεύμα απαερίων

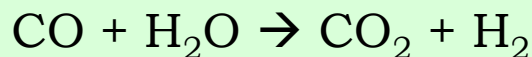
### Οξείδωση μη ανθρακούχων ατόμων:



### Ακολουθούν:



Αντίδραση άνθρακα-ατμού

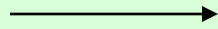


Αντίδραση μετάπτωσης ύδατος-αερίου

# Ζώνες αντίδρασης

## •Χαμηλή θερμοκρασία (ΖΩΝΗ I):

Εγγενής  
αντίδραση  
αργή

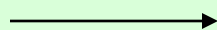


Τα αντιδρώντα διαχέονται στο κέντρο του σωματιδίου και το σωματίδιο καίγεται εξωτερικά με σταθερή διάμετρο και μειούμενης πυκνότητας

*ο ρυθμός αντίδρασης καύσης ελέγχεται από την κινητική των χημικών αντιδράσεων*

## •Μέση θερμοκρασία (ΖΩΝΗ II):

Ρυθμός  
Εγγενούς  
αντίδρασης  
αυξάνεται

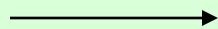


Η κατανάλωση αντιδρώντος αερίου υπερβαίνει τον ρυθμό εσωτερικής διάχυσης και το σωματίδιο καίγεται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά με μειούμενη διάμετρο και πυκνότητα

*ο ρυθμός αντίδρασης καύσης ελέγχεται από τη διάχυση του οξυγόνου στους πόρους*

## •Υψηλή θερμοκρασία (ΖΩΝΗ III):

Γρήγορη  
Εγγενής  
αντίδραση



Η αντίδραση επιτελείται μόνο στην επιφάνεια σωματιδίου. Το σωματίδιο καίγεται με μειούμενη διάμετρο και σταθερή πυκνότητα

*ο ρυθμός αντίδρασης καύσης ελέγχεται μόνο από τη διάχυση στο οριακό στρώμα*

## 3.3 Χαρακτηριστικά του Γαιάνθρακα που Επηρεάζουν την Καύση

3.3.1. Δομή και Πετρογραφική Σύθεση του Γαιάνθρακα

3.3.2. Περιεκτικότητα σε Οργανικά Στοιχεία

3.3.3. Περιεκτικότητα σε Υγρασία και Πτητικά

3.3.4. Θερμαντική Αξία

3.3.5. Ιδιότητες Αλεσιμότητας και Συσσωμάτωσης

3.3.6. Περιεκτικότητα σε Τέφρα και Σύθεση αυτής

3.3.7. Περιεκτικότητα σε Θείο



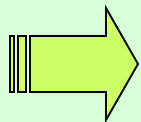
### 3.3.1 Δομή και Πετρογραφική Σύνθεση του Γαιάνθρακα

Αντιδραστικότητα εξανθρακώματος σε υψηλές θερμοκρασίες προσδιορίζεται κυρίως από:

- ✓ δομή μακροπόρων γαιάνθρακα
  - ✓ Ενεργά κέντρα
  - ✓ Εμβαδόν επιφάνειας
- Όπως προκύπτουν από την αποπτητικοποίηση
- ✓ Τα διάφορα πετρογραφικά συστατικά Σωματίδια με:
- βιτρινίτη διαστέλλονται σχηματίζοντας κυψελοειδείς δομές & έχουν ταχύτερο ρυθμό καύσης
  - φουσινίτη δεν διαστέλλονται
  - ινερτινίτη είναι συνήθως μη δραστικά

### 3.3.2 Περιεκτικότητα σε Οργανικά Στοιχεία

- ✓ Οξυγόνο
  - Κατά την θέρμανση διαχωρίζεται το  $O_2$  από την οργανική μήτρα αφήνοντας αντιδραστικές περιοχές για καύση
  - Οι χαρακτηριστικές ομάδες οξυγόνου είναι κέντρα δέσμευσης κατιόντων όπως  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$
- ✓ Άζωτο
  - δεν θεωρείται σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό των εκπομπών  $NO_x$  κατά την καύση, όταν και οι θερμοκρασίες της φλόγας είναι χαμηλές.



Οι γαιάνθρακες χαμηλής τάξης είναι πιο αντιδραστικοί αφού έχουν σημαντικά περισσότερο  $O_2$  και αυξημένο πορώδες

### 3.3.3. Περιεκτικότητα σε Υγρασία και Πτητικά



Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία γαιανθράκων χαμηλής τάξης δημιουργεί:

- Προβλήματα στα συστήματα διανομής, αποθήκευσης, διαχείρισης → αύξηση κόστους μεταφοράς
- Σε συνδυασμό με υψηλή περιεκτικότητα σε αργιλικές ενώσεις, προβλήματα επικάθισης και έμφραξης στα συστήματα τροφοδοσίας
- Ανάγκη για υψηλή θερμοκρασία πρωτογενούς αέρα ξήρανσης στους μύλους
- Περιορισμό στον ρυθμό τροφοδοσίας των συσκευών κονιοποίησης (επίδραση στην αλεσιμότητα του γαιάνθρακα)
- Μείωση θερμικής απόδοσης λέβητα → αύξηση εκπομπών CO<sub>2</sub>/KWh

Λόγω της μικρής παραγωγής καύσιμων πτητικών των γαιανθράκων χαμηλής τάξης:

- Καίγονται αργά και συχνά απαιτείται η χρήση βοηθητικού καυσίμου για την σταθεροποίηση της φλόγας
- Για επίτευξη σταθερής φλόγας απαιτείται περιεκτικότητα σε πτητικά > 30%



*Γαιάνθρακες χαμηλής τάξης απαιτούν μεγαλύτερους καυστήρες για επίτευξη ίδιων επιπέδων παραγωγής ενέργειας σε σχέση με γαιάνθρακες υψηλής τάξης.*

### 3.3.4. Θερμαντική Αξία



Λόγω της μικρής θερμαντικής αξίας γαιανθράκων χαμηλής τάξης:

- Απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου για επίτευξη σταθερού ρυθμού παραγωγής ατμού ή ηλεκτρικής ενέργειας
- Μύλοι, κλίβανοι και λοιπός εξοπλισμός πρέπει να είναι μεγαλύτερου μεγέθους
- Η μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου που χρησιμοποιείται αυξάνει τη φθορά των μηχανημάτων και την παραγωγή ιπτάμενης τέφρας.

### 3.3.5. Ιδιότητες Αλεσιμότητας και Συσσωμάτωσης

Λόγω της μικρής αλεσιμότητας γαιανθράκων χαμηλής τάξης:

- Χρειάζεται τροποποίηση και προσαρμογή της Δοκιμής Αλεσιμότητας (Hardgrove Grindability Test) σε γαιάνθρακες μεγάλης περιεκτικότητας σε υγρασία.
- Απαιτούνται μύλοι μεγαλύτερης κωρητικότητας

Επειδή οι γαιάνθρακες χαμηλής τάξης δεν διέρχονται από στάδιο αποσκλήρυνσης & τήξης:

- Δεν παρουσιάζουν φαινόμενα συσσωμάτωσης κατά τη θέρμανση
- Δεν απαιτείται ο ίδιος βαθμός λεπτότητας σωματιδίων για να εξασφαλιστεί η καύση όπως με τους γαιάνθρακες υψηλής τάξης

### 3.3.6. Περιεκτικότητα σε Τέφρα και Σύνθεση αυτής

---

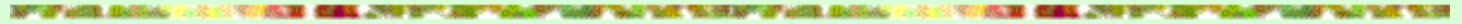
*Η τέφρα και η πτητική ανόργανη ύλη που παράγονται από τη θερμική μετατροπή του γαιάνθρακα:*

- Συνεισφέρει στις εκπομπές καπνοδόχων
- Μειώνει τη μεταφορά θερμότητας στον κλίβανο και τροποποιεί την ροή των αερίων
- Επικάθεται σε επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας → μείωση διαμέτρων σωλήνων, υψηλές ταχύτητες αερίων → επιτάχυνση διάβρωσης σωλήνων → αύξηση κόστους συντήρησης → αύξηση κόστους παραγόμενης ενέργειας.

*Γενικά:*

- Μερικές ανόργανες ύλες μπορεί να έχουν θετική επίδραση στην καύση πχ.  $\text{CaCO}_3$
- Η έκταση των προβλημάτων που σχετίζονται με την τέφρα εξαρτώνται από:
  - Την ποσότητα και τον τρόπο σύνδεσης των ανόργανων συστατικών
  - Τις συνθήκες καύσης
  - Την γεωμετρία του συστήματος
- Η σύνθεση της τέφρας επηρεάζει τη θερμοκρασία αποσκλήρυνσης, το ιξώδες και τις επικαθίσεις

# I. Επίδραση στην Θερμοκρασία Αποσκλήρυνσης της Τέφρας



Υπεύθυνα για την σύντηξη της τέφρας είναι τα οξείδια των στοιχείων:

✓ Al, Si, Ti, Ca, Mg, Na, K και ειδικά το  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

Όταν η σύνθεση της τέφρας :

✓ Προσεγγίζει το  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  → καθίσταται πυρίμαχη

✓ Περιέχει CaO, MgO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  → μειώνεται η θερμοκρασία τήξης της

✓ Έχει υψηλές περιεκτικότητες σε S από σιδηροπυρίτες → μειώνεται η αρχική θερμοκρασία παραμόρφωσης και αυξάνεται το εύρος θερμοκρασιών τήξης

*Προσδιορισμός θερμοκρασίας αποσκλήρυνσης (δείκτης ευτηκικότητας) κατά ASTM:*

$$ST(^{\circ}\text{F}) = 2326 - 6.9\text{SiO}_2 + 0.1\text{Al}_2\text{O}_3 - 4.3\text{Fe}_2\text{O}_3 - 128\text{TiO}_2 + 8.5\text{CaO} + 14.9\text{MgO} - 8.7\text{Na}_2\text{O} + 80\text{K}_2\text{O} - 5.1\text{SO}_3$$

Οι τέφρες λιγνιτών έχουν υψηλές συγκεντρώσεις Na, Ca, Mg, και χαμηλές Al, Si



**Εάν** θερμοκρασία σύντηξης της τέφρας  $\ll$  θερμοκρασία κλιβάνου → τέφρα λιώνει  
→ απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός για να είναι δυνατή η απορροή τέφρας  
διαφορετικά δημιουργούνται προβλήματα



## II. Επίδραση στο Ιξώδες της Σκωρίας

- Τα χαρακτηριστικά ροής τεφρών 2 διαφορετικών γαιανθράκων συγκρίνονται με βάση το ιξώδες! Η ροή της σκωρίας επιτυγχάνεται όταν το ιξώδες είναι 50-150 poise.
- Σε κλίβανους σταθερής θερμοκρασίας το ιξώδες της σκωρίας διαφέρει ανάλογα με τη χημική σύνθεση της τέφρας

Η σχέση μεταξύ ιξώδους και χημικής σύνθεσης της τέφρας εκφράζεται ως:

✓ Ισοδύναμο ποσοστού πυριτίου = 
$$\frac{\text{SiO}_2 \times 100}{(\text{SiO}_2 + \text{totaliron} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})}$$

Σκωρίες με παρόμοια τιμή ΙΠΠ έχουν παρόμοια συσχέτιση ιξώδους-θερμοκρασίας

✓ Ποσοστό φερίτη = 
$$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{(\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.11\text{FeO} + 1.43\text{Fe})} \times 100$$

Το FeO λειτουργεί ως δότης οξειδίων, οδηγώντας στην διάσπαση αργιλοπυριτικών πολυμερών & στην μείωση του ιξώδους

✓ Λόγος βασικών προς όξινων = 
$$\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}$$

Το ιξώδες μειώνεται όσο η τιμή του ΛΒΠΟ αυξάνεται, τείνοντας προς τη μονάδα

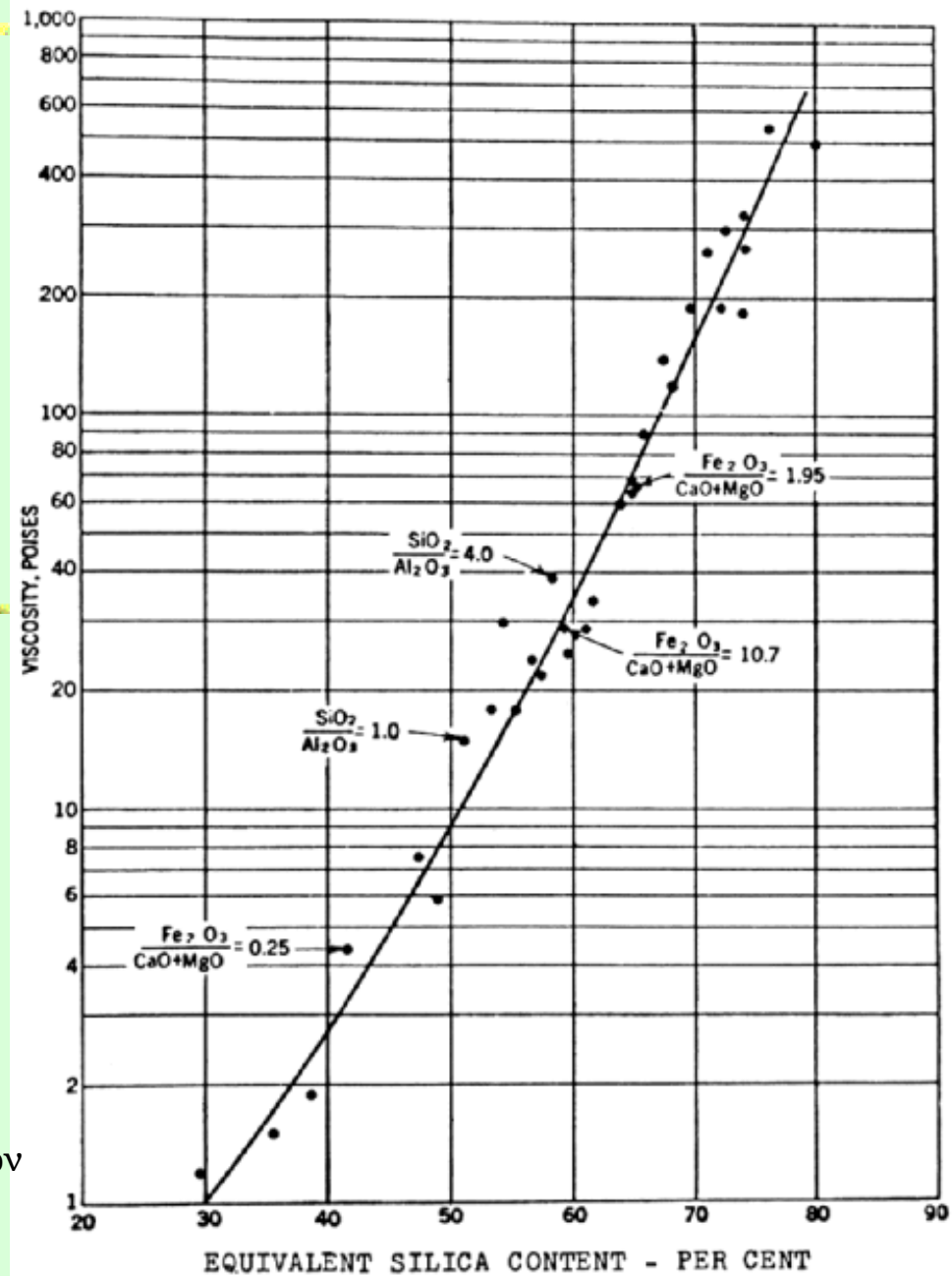
➤ Ο καλύτερος διαθέσιμος τρόπος υπολογισμού του ιξώδους από τη σύνθεση της σκωρίας γαιανθράκων χαμηλής τάξης σήμερα είναι η τροποποιημένη εξίσωση Urbain:

$$\ln \eta = \ln A + \ln T + 10^3 B / T - \delta$$

$$\ln A = -(0.2693B + 11.6725)$$

$$\& \delta = mT + b$$

**Σχήμα 3.3**\_ Ιξώδες σκωρίας τέφρας γαιανθράκων τους 1427 °C στον αέρα



### III. Επίδραση στις Επικαθίσεις

Οι επικαθίσεις είναι η κάθε μορφή εναπόθεσης τέφρας, η οποία μειώνει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και εμποδίζει την ροή των αερίων διαμέσου της μονάδας.

Ταξινομούνται σαν:

#### ➤ Επικαθίσεις τηγμένης σκωρίας



αναπτύσσονται κύρια στις επιφάνειες που είναι εκτεθειμένες σε μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία



πχ. στα τοιχώματα του κλιβάνου και στις πρώτες σειρές σωλήνων του λέβητα ή του υπερθερμαντήρα

#### ➤ Επικαθίσεις υψηλής θερμοκρασίας



αναπτύσσονται στις επιφάνειες μεταγωγής θερμότητας σε περιοχές μετρίως υψηλής θερμοκρασίας αερίων



κυρίως στον υπερθερμαντήρα

#### ➤ Επικαθίσεις χαμηλής θερμοκρασίας

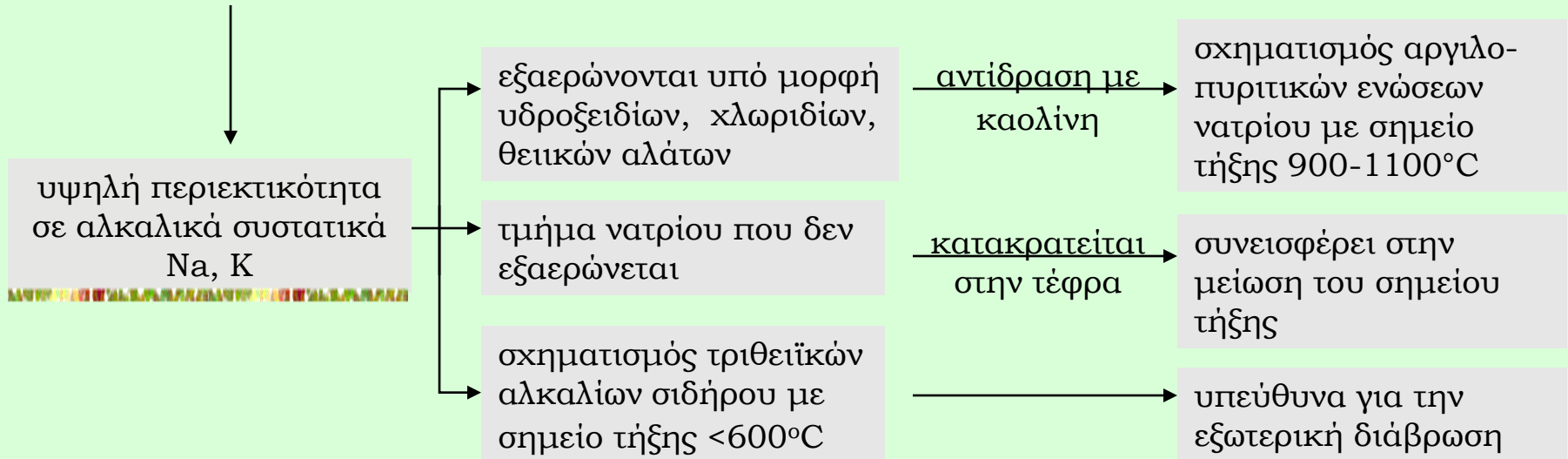


αναπτύσσονται σε επιφάνειες επαγωγής θερμότητας



στον οικονομητή και στον  
θερμαντήρα του αέρα

γαιάνθρακες χαμηλής τάξης --> εμφανίζουν συνήθως επικαθίσεις υψηλής θερμοκρασίας



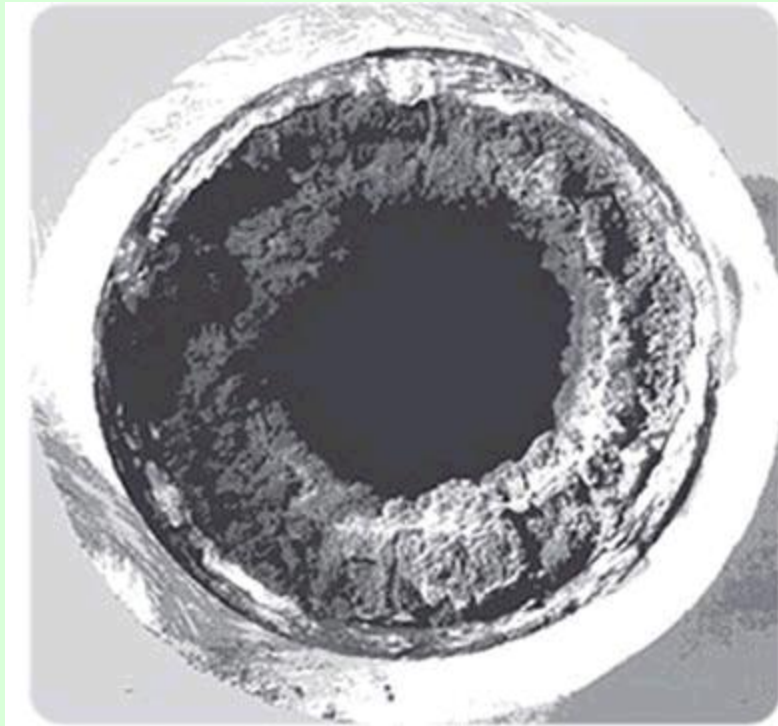
Άλλα προβλήματα που σχετίζονται με την υψηλή περιεκτικότητα σε νάτριο:

- ✓ Σχηματισμός συσσωρεύσεων του υλικού της κλίνης σε ατμοσφαιρικές ρευστοποιημένες κλίνες
- ✓ Όταν η ποσότητα  $\text{Na}_2\text{O}$  στην τέφρα ξεπερνά το 8% υπάρχουν σοβαρές επικαθίσεις
- ✓ Παράγωγή θεικών αλάτων τα οποία αυξάνουν τις εκπομπές λεπτών σωματιδίων
- ✓ Όταν η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο σε κονίαμα τσιμέντου portland μπορεί να προκληθούν ανεπιθύμητες αντιδράσεις

Από την άλλη πλευρά όμως:

- ✓ Μειώνει την αντιδραστικότητα της ιπτάμενης τέφρας , έτσι υποβοηθά την συλλογή της σε ηλεκτροστατικές συσκευές καθίζησης → καθιστά δυνατή την χρήση της σαν απορροφητικό υλικό για το διοξείδιο του θείου, που εκλύεται κατά την διάρκεια της καύσης

# Φωτογραφίες επικαθίσεων



Επικαθίσεις στο εσωτερικό σωληνώσεων

### **Ασβέστιο:**

- ✓ είναι κυρίως διεσπαρμένο σε μοριακό επίπεδο, επειδή συνδέεται με καρβοξυλικές ομάδες
- ✓ Κατά την διάρκεια της καύσης συσσωρεύεται γρήγορα σε συμπλέγματα Ca-O & CaO
- ✓ Το οργανικά συνδεδεμένο ασβέστιο αντιδρά με χαλαζία & αργιλικές ενώσεις → σχηματίζει πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα → μειώνουν το σημείο τήξης → δημιουργία επικαθίσεων
- ✓ Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η υψηλή περιεκτικότητα σε Ca στην τέφρα μειώνει τις επικαθίσεις

### **Διοξείδιο του πυριτίου:**

- ✓ Υψηλό ποσοστό διοξειδίου του πυριτίου στην τέφρα μπορεί να διαβρώσει τα συστήματα τροφοδοσίας και τους καυστήρες
- ✓ Όταν η συνδυάζεται με υψηλή περιεκτικότητα σε νάτριο μπορούν να σχηματισθούν επικαθίσεις μεγάλου μεγέθους πάνω στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας

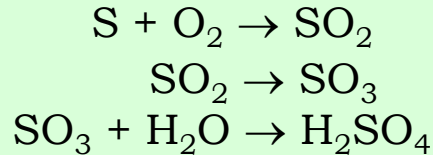
# Βασικές προσεγγίσεις για τον έλεγχο των επικαθίσεων

---

- Συντηρητικός σχεδιασμός του ύψους και της επιφάνειας του κλιβάνου, ώστε να υπάρχει άφθονος χρόνος για καύση, και επομένως να μειωθεί η θερμοκρασία εξόδου του κλιβάνου
- Εγκατάσταση ικανοποιητικού αριθμού φουσητήρων αιθάλης σε σημεία που αναμένονται να είναι προβληματικά
- Χρήση πρόσθετων στο καύσιμο που περιέχουν ασβέστιο ή μαγνήσιο για την μείωση της δυνατότητας ροής κάθε φάσης τηγμένης τέφρας, ή που περιέχουν αλουμίνιο για τον σχηματισμό υλικών υψηλού σημείου τήξης
- Περιορισμός της περιεκτικότητας του γαιάνθρακα σε νάτριο με χρήση επιλεκτικής εξόρυξης, ανάμειξης, ή εναλλαγής ιόντων
- Θραύση του γαιάνθρακα σε μεγέθη μικρών για την παραγωγή μικρότερων και πιο αδύναμων επικαθίσεων
- Συν-καύση του γαιάνθρακα με άλλα καύσιμα για την παραγωγή επικαθίσεων που περιέχουν κύρια πυρίτιο, σίδηρο και αλουμίνιο και λιγότερο από 0.8% νάτριο

### 3.3.7. Περιεκτικότητα σε Θείο

- Κατά την καύση το θείο που υπάρχει στον γαιάνθρακα μπορεί να δημιουργήσει διάβρωση των αγωγών της μονάδας του λέβητα, μέσω των αντιδράσεων:



- Συνήθως, < 3% του SO<sub>2</sub> οξειδώνεται σε SO<sub>3</sub> και οι συγκεντρώσεις ατμών του θειϊκού οξέος στα καυσαέρια είναι γενικά χαμηλές (10-50ppm)--> Όμως, ακόμα και τόσο χαμηλά επίπεδα μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση των επιφανειών του κλιβάνου
- Η παραγωγή τριοξειδίου του θείου και θειϊκού οξέος, μπορούν να μειωθούν με:
  - ~την παρουσία υδρατμών
  - ~την προσθήκη ενώσεων ικανών να αφαιρέσουν τα άτομα οξυγόνου
  - ~την έγχυση ιπτάμενης τέφρας για επικάλυψη των σωλήνων του υπερθερμαντήρα
- Γαιάνθρακες χαμηλής τάξης: συνδυάζουν μικρή περιεκτικότητα σε θείο με τέφρα υψηλής αλκαλικότητας ---> δυνατή η απομάκρυνση SO<sub>2</sub> με ελάχιστη ή και καμία προσθήκη απορροφητικών υλικών, όπως ο ασβεστόλιθος.

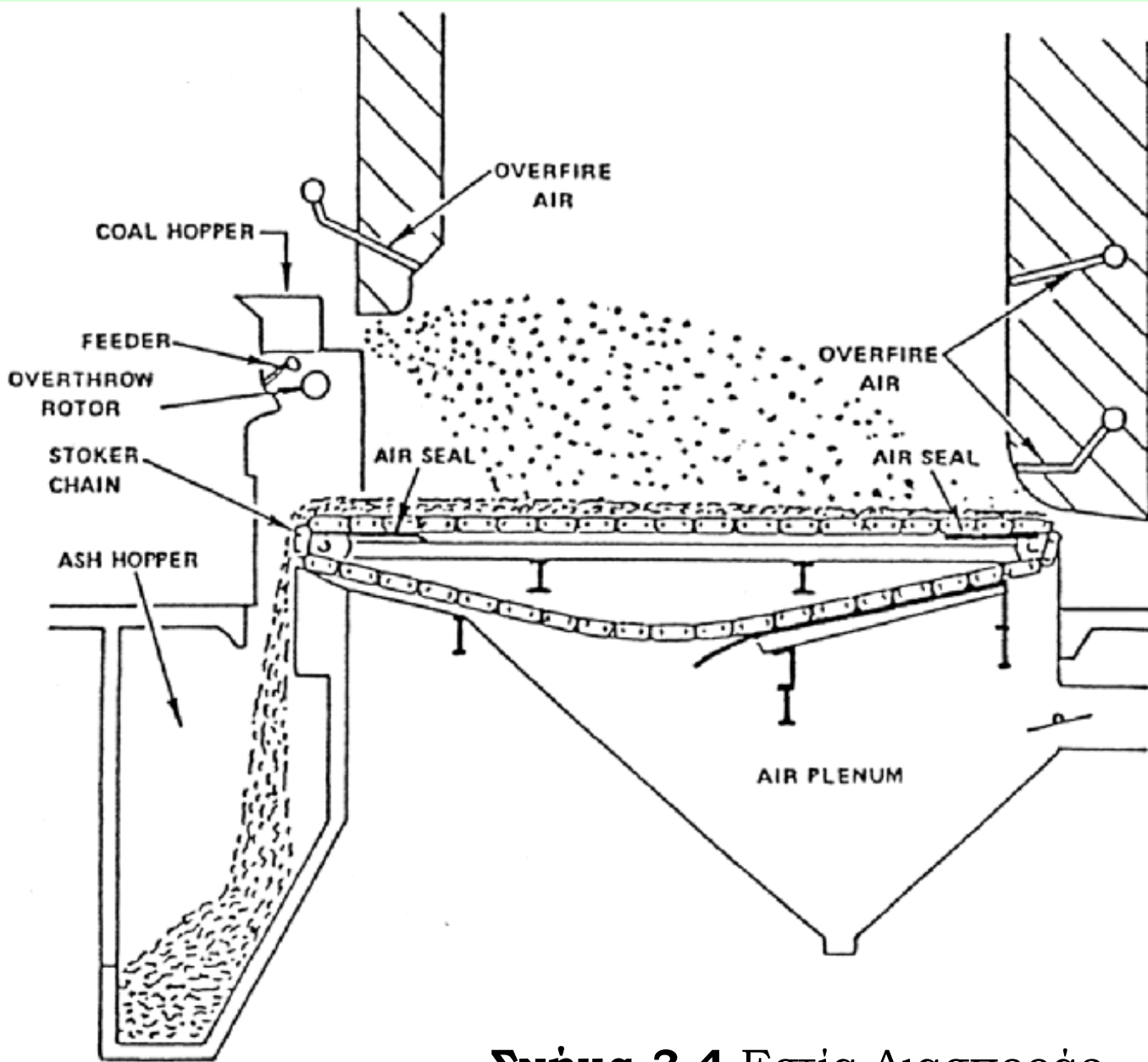


## 3.4. Συμβατικές Μέθοδοι Καύσης

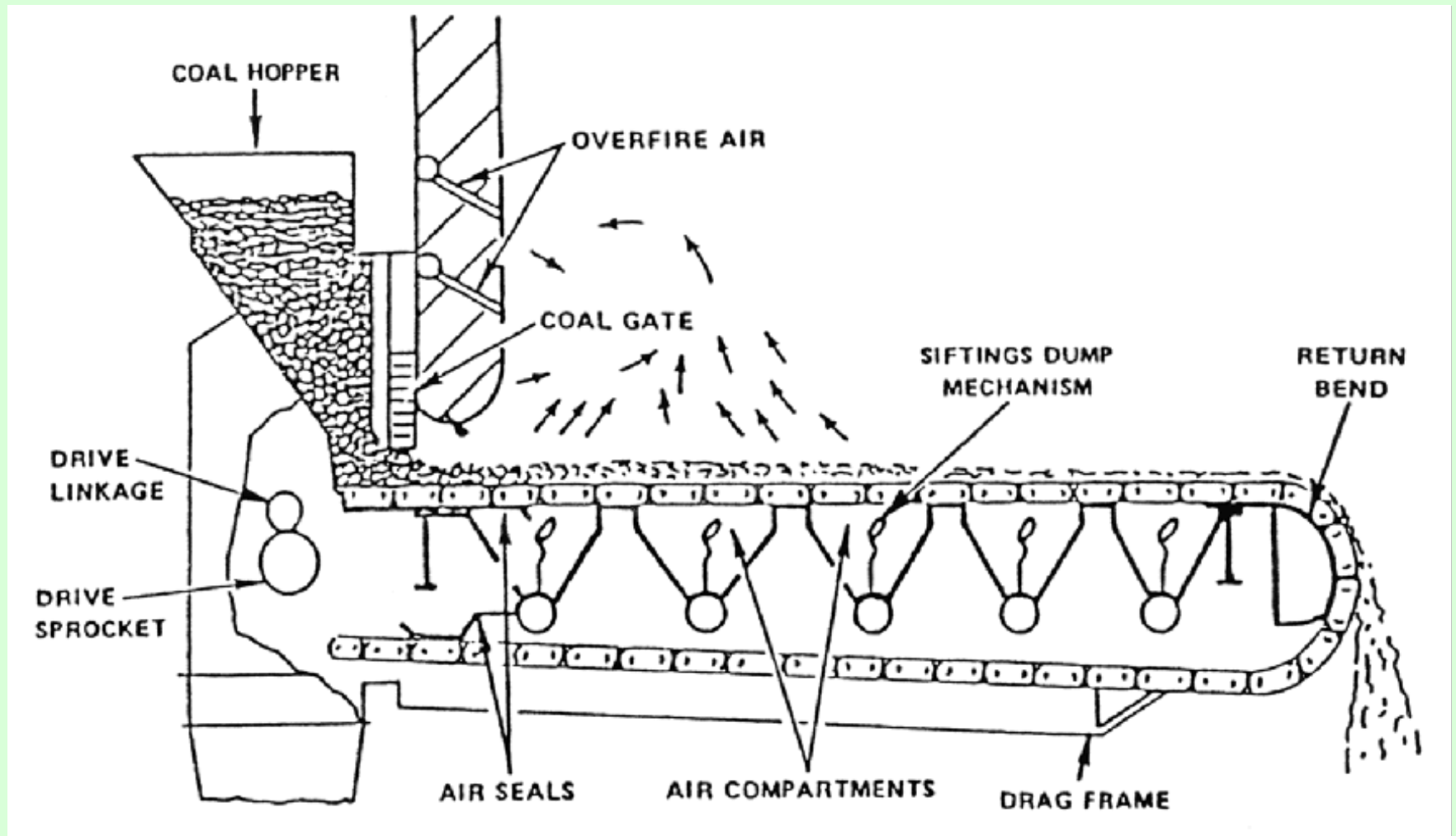
Η άμεση καύση του γαιάνθρακα είναι μία ευρέως διαδομένη τεχνολογία για παραγωγή ενέργειας ή για θέρμανση

Κύριοι τρόποι καύσης γαιάνθρακα:

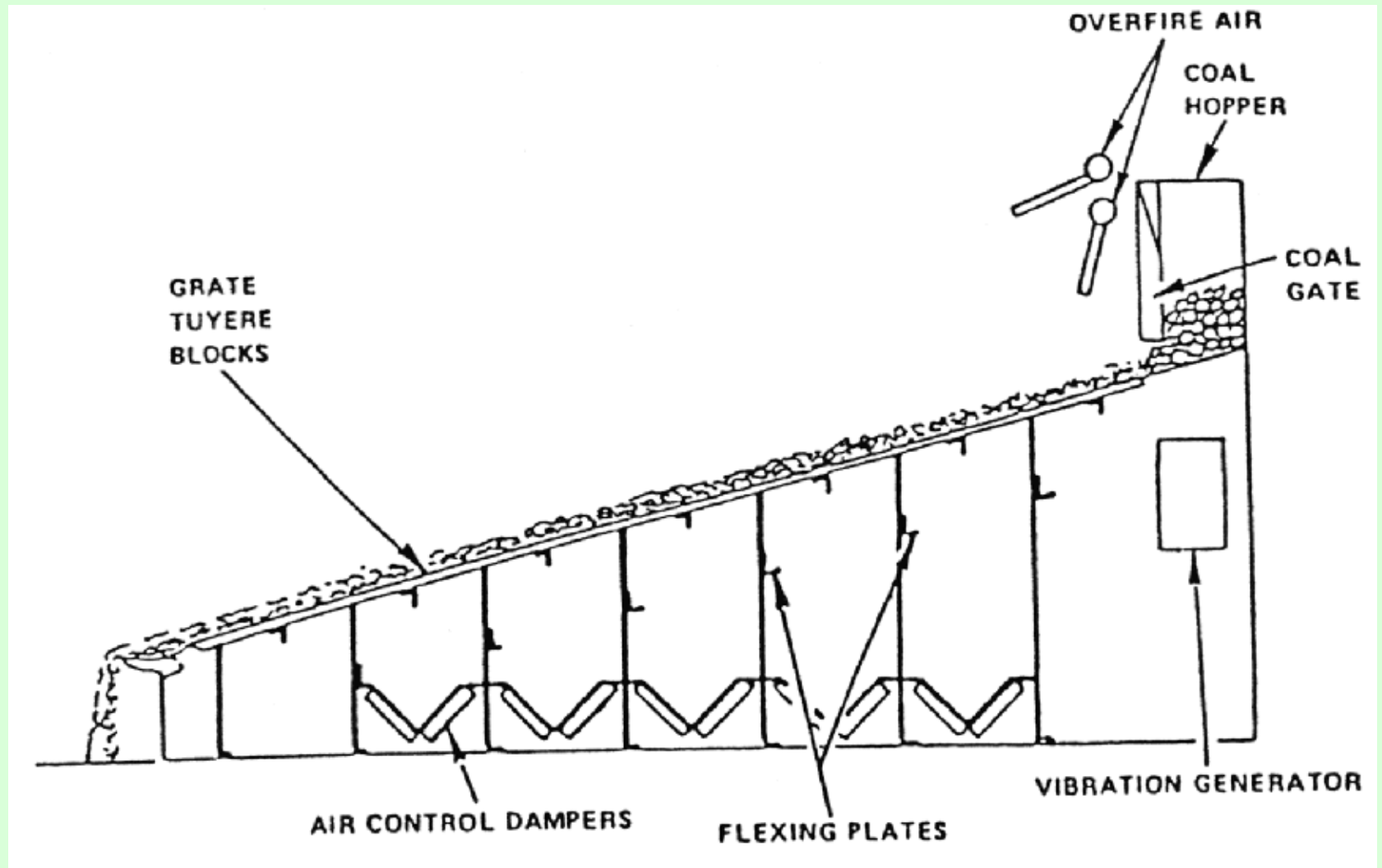
Τρόπος καύσης	Γαιάνθρακας	Τύπος του συστήματος καύσης	Τύπος της καύσης	Ρυθμός παραγωγής θερμότητας/ατμού
Σε κλίνη καυσίμου	χονδρόκοκκος	Εστία καύσης	Προσδιορίζεται από την διεύθυνση της ροής του καυσίμου και του αέρα.	Μέχρι $11 \times 10^6 \text{kJ/m}^2\text{h}$ ή $135 \text{ tn ατμού /h}$
		Κλίβανος κονιοποιημένου γαιάνθρακα	Παρασύρεται πλήρως στην ροή του αέρα	
Σε αιώρηση	λεπτόκοκκος	Κλίβανος κυκλώνα	Στροβιλίζεται από την ροή του αέρα	Για υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής ατμού
		Κλίβανος ρευστοστερεάς κλίνης	Μία κλίνη σωματιδίων αιωρείται από ανερχόμενη ροή αέρα, χωρίς να παρασύρεται έξω από την μονάδα	



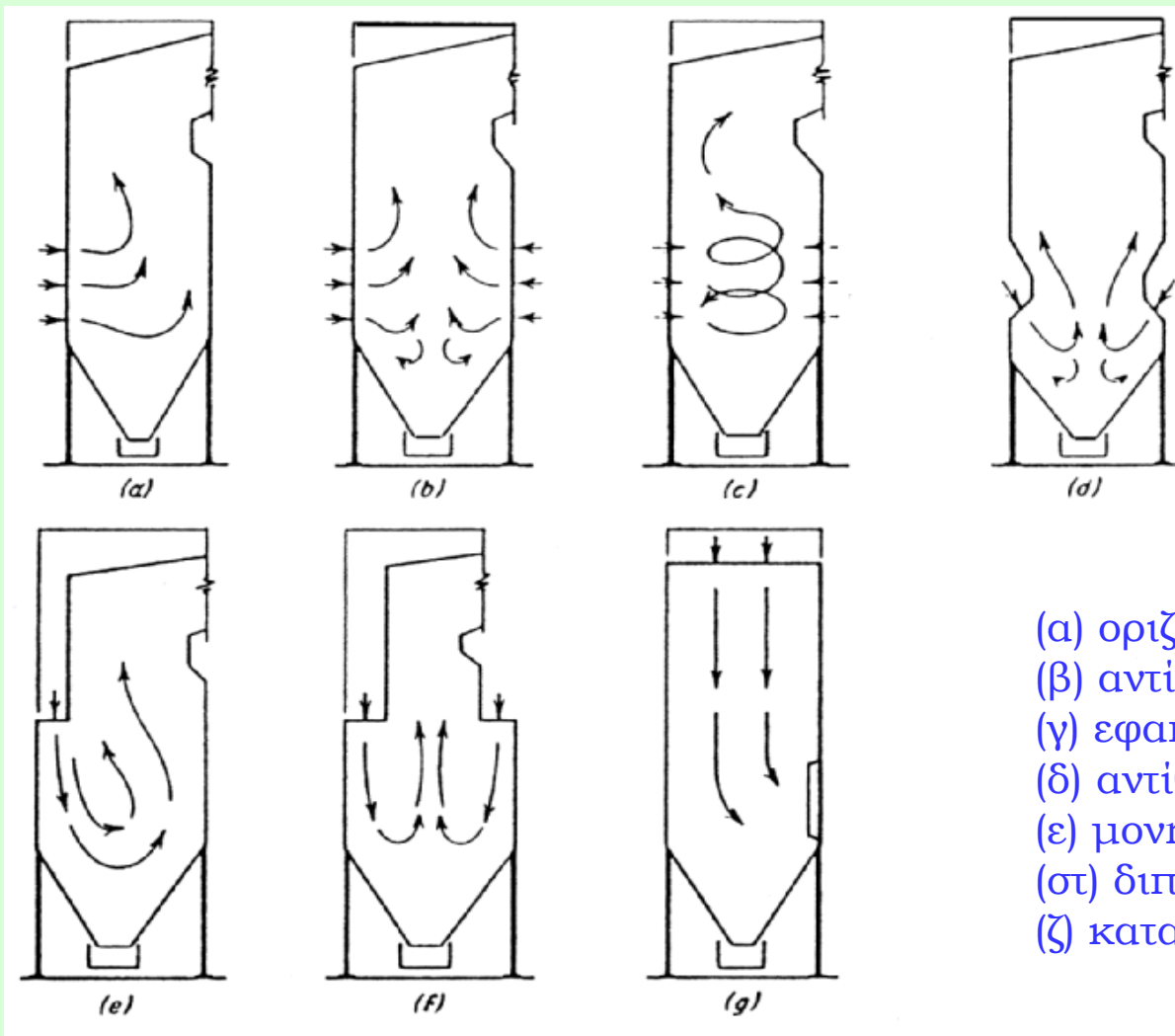
**Σχήμα 3.4** Εστία Διασποράς



**Σχήμα 3.5** Εστία καύσης αλυσωτής εσχάρας

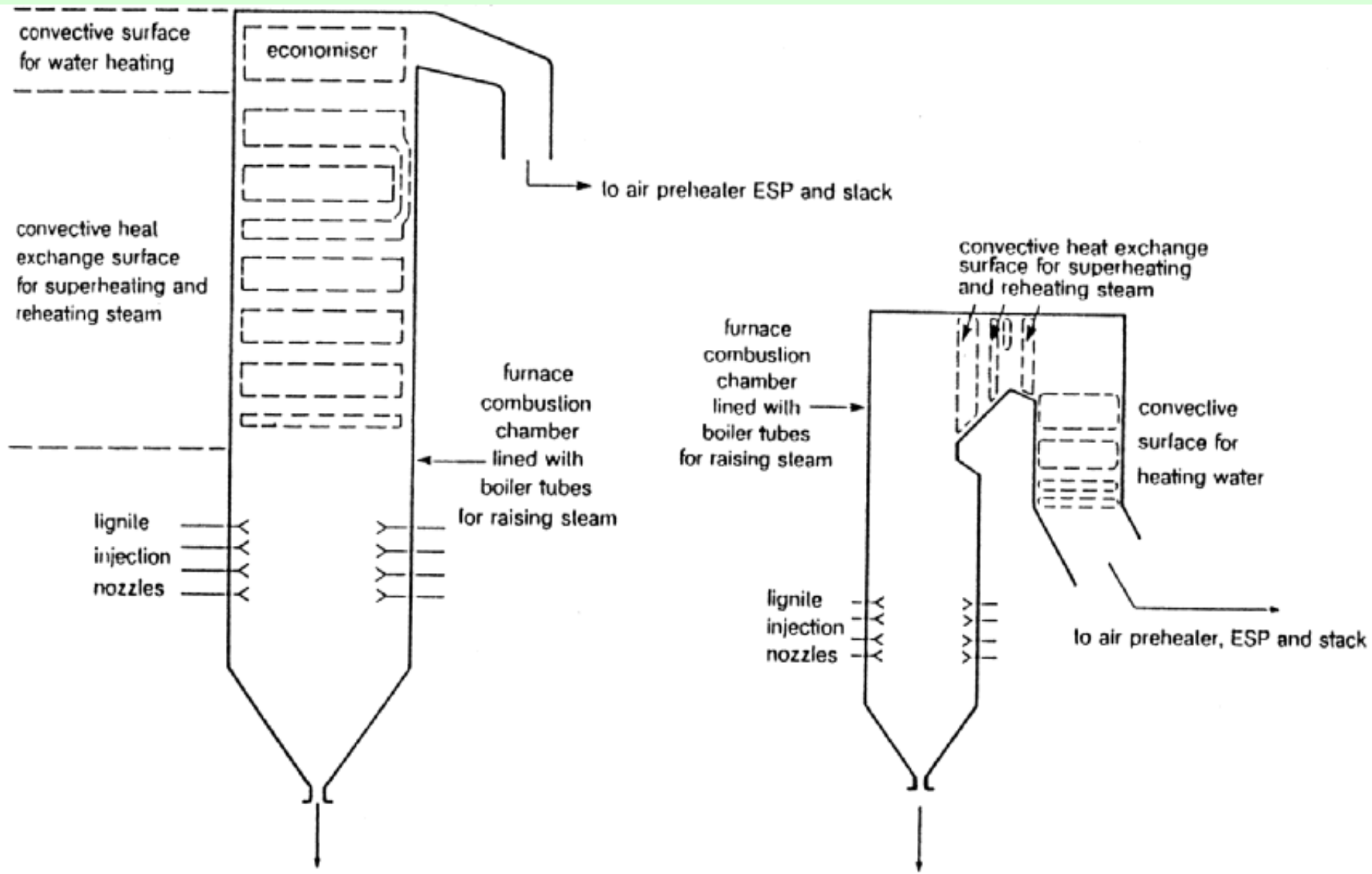


**Σχήμα 3.6** Εστία δονούμενης εσχάρας



- (α) οριζόντια (εμπρόσθια ή οπίσθια)
- (β) αντίθετη οριζόντια
- (γ) εφαιπομενική
- (δ) αντίθετη κεκλιμένη
- (ε) μονή φλόγα σχήματος U
- (στ) διπλή φλόγα σχήματος U
- (ζ) κατακόρυφη

**Σχήμα 3.8** Διατάξεις κλιβάνου & καυστήρα ξηρού πυθμένα

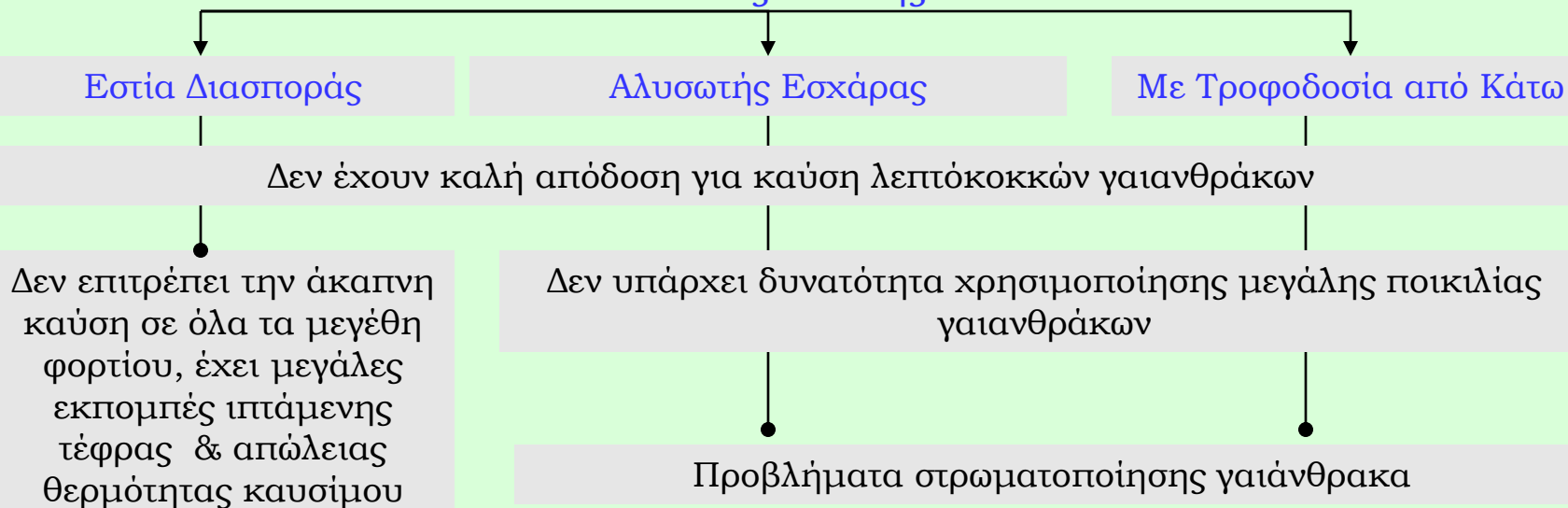


**Σχήμα 3.12** Βασικές διατάξεις κλιβάνου για καύση λιγνίτη 30

# Μειονεκτήματα συμβατικών μεθόδων καύσης

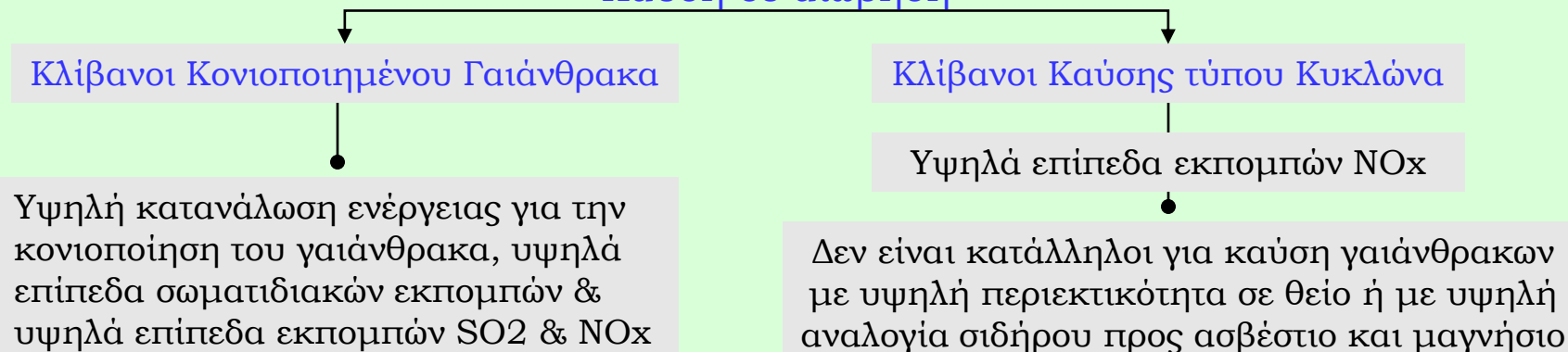
1.

## Εστίες Καύσης



2.

## Καύση σε αιώρηση



## 3.5 Αναδυόμενες «Καθαρές» Τεχνολογίες

---

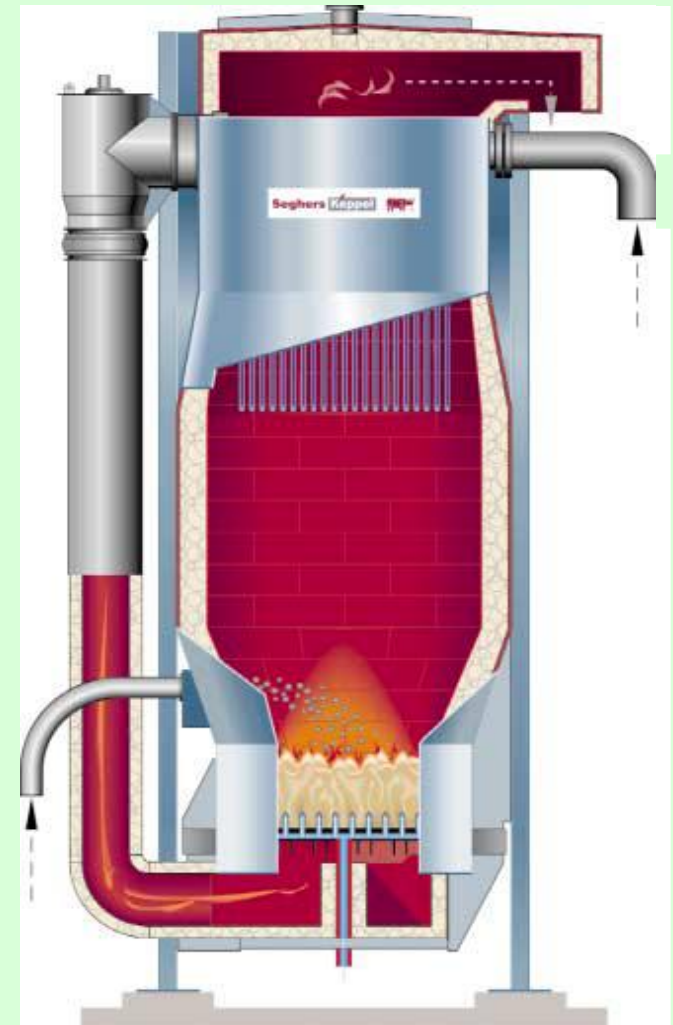




## 3.5.1 Καύση Ρευστοστερεάς Κλίνης

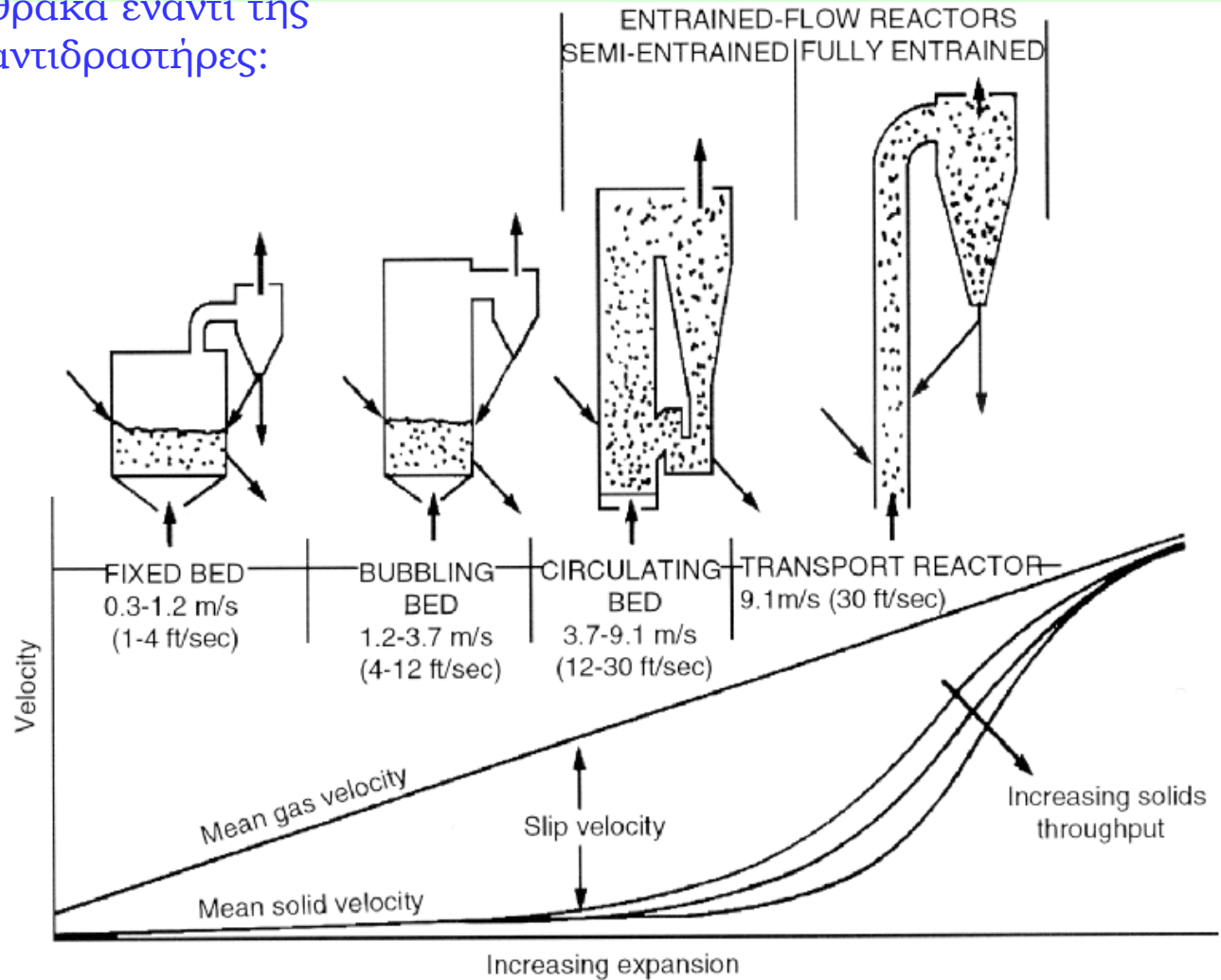
### *I. Διεργασία και Κύρια Σημεία*

- Μία από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στην καύση γαιάνθρακα
- 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 γαιάνθρακα ή απορροφητικά υλικά θείου, όπως ασβεστόλιθος ή δολομίτης.
- Τα σωματίδια του γαιάνθρακα αποτελούν μόνο το 1% της μάζας της κλίνης



## Ταχύτητες αερίου & γαιάνθρακα έναντι της διόγκωσης της κλίνης για αντιδραστήρες:

- σταθερής κλίνης
- κλίνης φουσαλίδων
- ρευστοστερεάς κλίνης με ανακυκλοφορία
- κλίνης παράσυρης



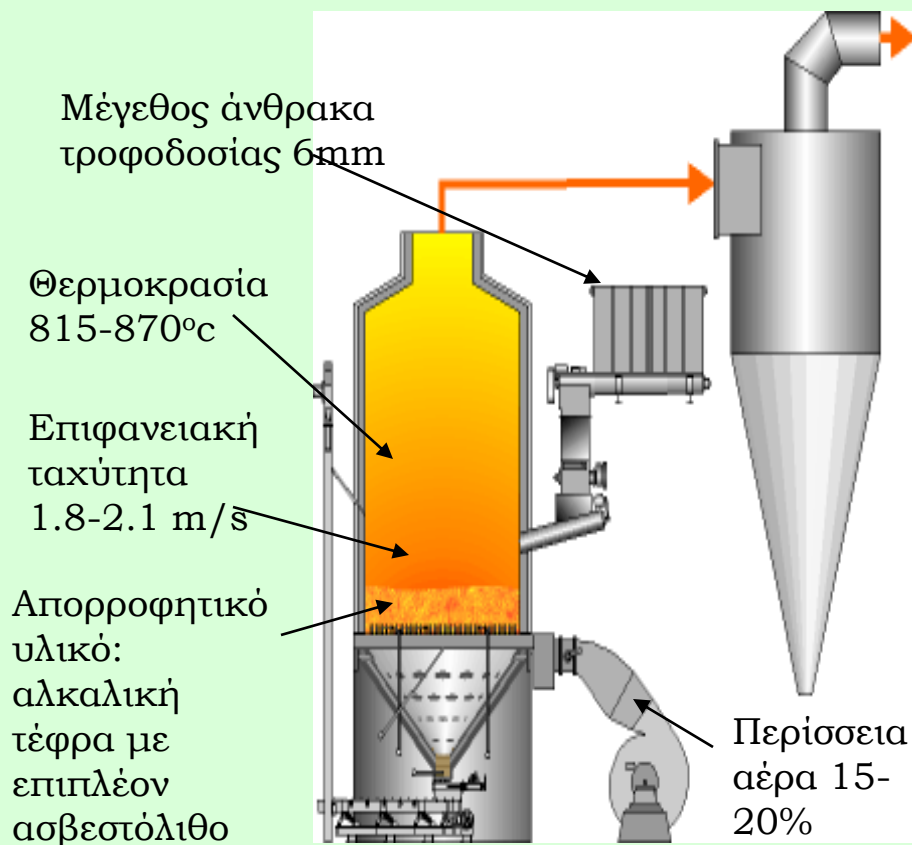
**Σχήμα 3.14** Ταχύτητες αερίου & γαιάνθρακα ~ διόγκωση κλίνης

# Πλεονεκτήματα καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη

- Υψηλότεροι ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας στην κλίνη με αποτέλεσμα την μείωση του μεγέθους των μονάδων και την μείωση των κεφαλαιουχικών επενδύσεων και κόστους συντήρησης
- Αυξημένη απόδοση καύσης και αυξημένοι ρυθμοί απαγωγής θερμότητας, μέχρι  $3\text{MW}/\text{m}^2$  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  $1000^\circ\text{C}$ ) και ομαλότερη κατανομή θερμοκρασιών με αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών  $\text{NO}_x$
- Σημαντική μείωση εκπομπών  $\text{SO}_x$ , λόγω της χρήσης υλικών που απορροφούν το θείο στην κλίνη, εξαλείφοντας την ανάγκη ελέγχου εκπομπών οξειδίων του θείου μετά την καύση
- Εύχρηστο και χρήσιμο υπό-προϊόν και
- Ευελιξία επιλογής καυσίμου και δυνατότητα χρήσης γαιανθράκων χαμηλής τάξης, ακόμη και με μεγάλη περιεκτικότητα σε τέφρα, καθότι λειτουργούν με χαμηλό απόθεμα καυσίμων στην κλίνη

## Σχεδιασμός Κλιβάνων Ρευστοστερεάς Κλίνης

«Βέλτιστες» συνθήκες λειτουργίας για γαιάνθρακες χαμηλής τάξης:



## Συσσωμάτωση Στερεών σε Κλιβάνους Ρευστοστερεάς Κλίνης

Εάν:

περιεκτικότητα τέφρας σε Na >3% → σχηματίζονται αργιλοπυριτικές ενώσεις νατρίου με χαμηλά σημεία τήξης → τάση για συσσωματώματα

Αντιμετώπιση:

προσθήκη ασβεστόλιθου ή αλουμίνας → μειώνουν συγκέντρωση του οξειδίου του πυριτίου στην κλίνη

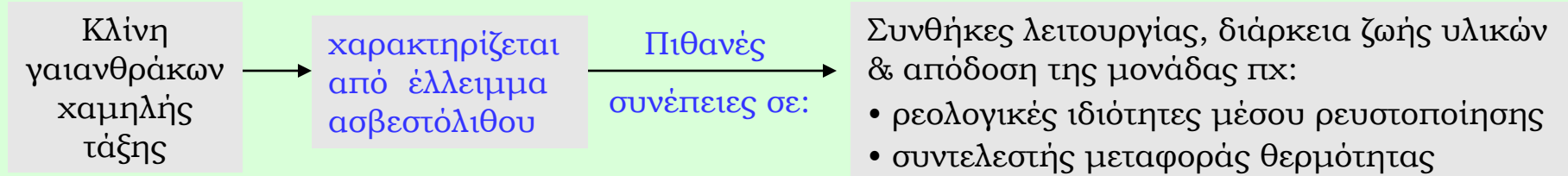
Προσδιορισμός τάσης συσσωμάτωσης από:

- ~ θερμοκρασία κλίνης
- ~ περιεκτικότητα γαιάνθρακα σε Na, Ca
- ~ μεθόδους λειτουργίας (ανακύκλωση τέφρας, θέση της τροφοδοσίας καυσίμου και απόδοση πλατώ διανομής)

Η συσσωμάτωση μειώνει την ποιότητα της ρευστοποίησης της κλίνης λόγω:

- ~ ανεπαρκούς ανάμειξης της κλίνης
- ~ μεταβολών θερμοκρασίας
- ~ χαμηλής απόδοσης καύσης

# Ιδιότητες Ρευστοστερεάς Κλίνης με Έλλειμμα Ασβεστόλιθου

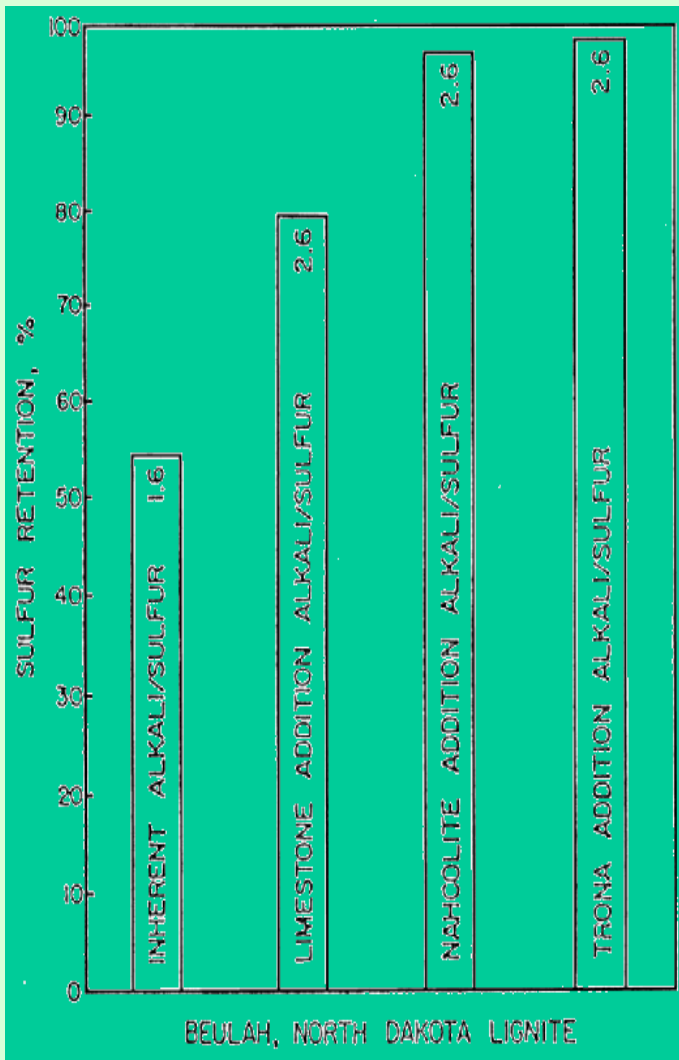


## Κατακράτηση Θείου

- Εγγενής περιεκτικότητα γαιανθράκων χαμηλής τάξης σε αλκάλια συνεισφέρει στον έλεγχο των εκπομπών SO<sub>2</sub>
- Για επιπλέον κατακράτηση του θείου γίνεται προσθήκη απορροφητικών υλικών (Ca/S>2)
- Βασικές λειτουργικές μεταβλητές που επηρεάζουν την κατακράτηση του θείου είναι οι:
  - > μέση θερμοκρασία της κλίνης (~760°C)
  - > επιφανειακή ταχύτητα των αερίων (κατακράτηση ↓ με ↑ ταχύτητας)
  - > αναλογία αέρα~καυσίμου (κατακράτηση ↑ με ↑ αναλογίας)

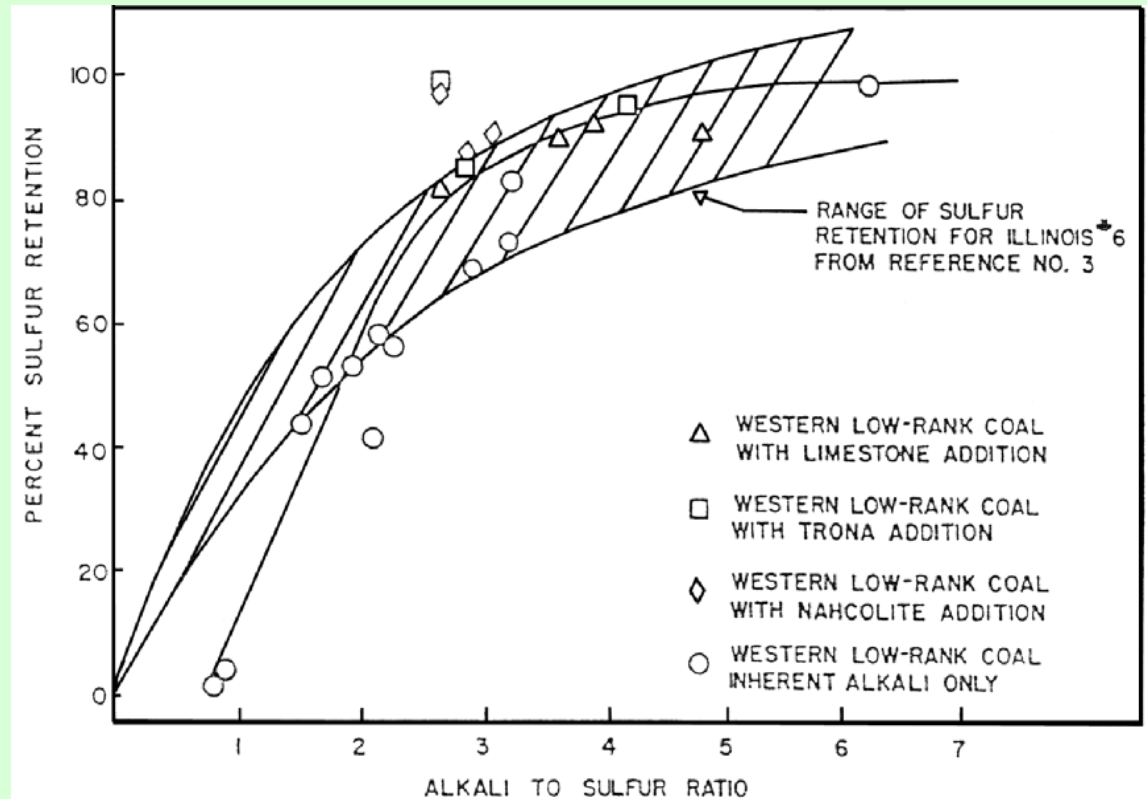
## Προβλήματα Υλικών & Διάθεση των Καταναλωμένων Στερεών

- Υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια → μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα διάβρωσης
- Απόβλητα προϊόντα → έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε θειικά άλατα αλκαλίων → περισσότερο διαλυτά στο ύδωρ → μπορεί να έχει σοβαρή περιβαλλοντική επίπτωση



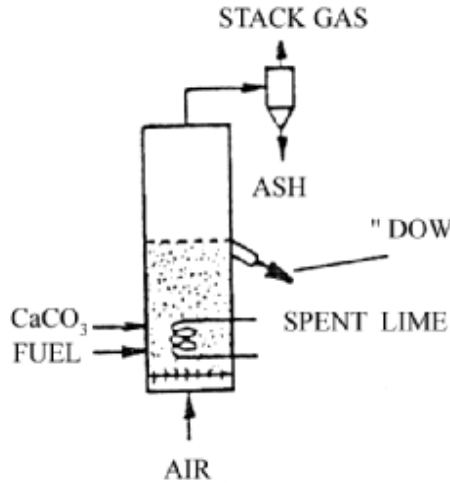
**Σχήμα 3.15.** Επίδραση του τύπου του απορροφητικού υλικού στην κατακράτηση θείου

**Σχήμα 3.16.** Ποσοστό κατακράτησης θείου σαν συνάρτηση της συνολικής αναλογίας αλκαλίων προς θείο



## II. Διάταξη για Επαφή Στερεού-Αερίου

### Λειτουργία καθοδικής ροής



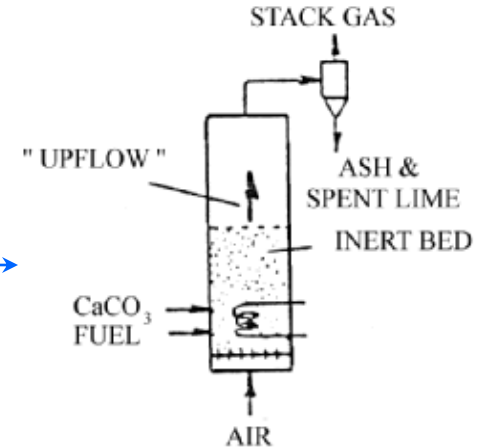
Ταχύτητες αερίων  
 χαμηλές απάγεται μικρή ποσότητα CaO  
 Υψηλές & υλικά τροφοδοσίας πιο λεπτόκοκκα → όλο το CaO & η τέφρα απάγονται

Απομάκρυνση στέρεου υπολείμματος με εκτόπιση από φρέσκια τροφοδοσία & εξαγωγή μέσω σωλήνα υπερχείλισης.

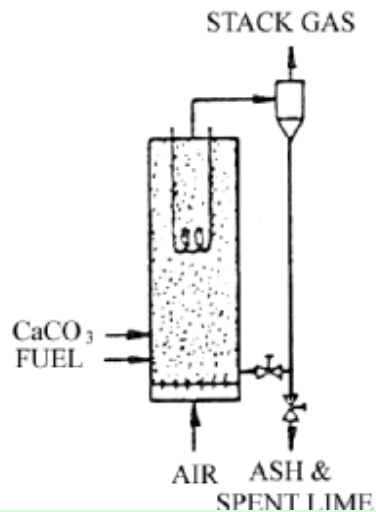
Λειτουργία κατάλληλη σε γρήγορες αντιδράσεις αερίου-στερεού (ο χρόνος κράτησης των στερεών είναι μικρός)

Το ύψος της κλίνης παραμένει σταθερό.

### Λειτουργία ανοδικής ροής



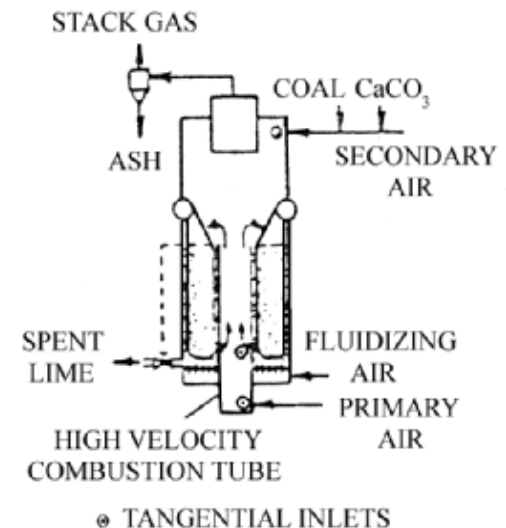
### Ρευστοστερεά κλίνη πολλαπλών στερεών



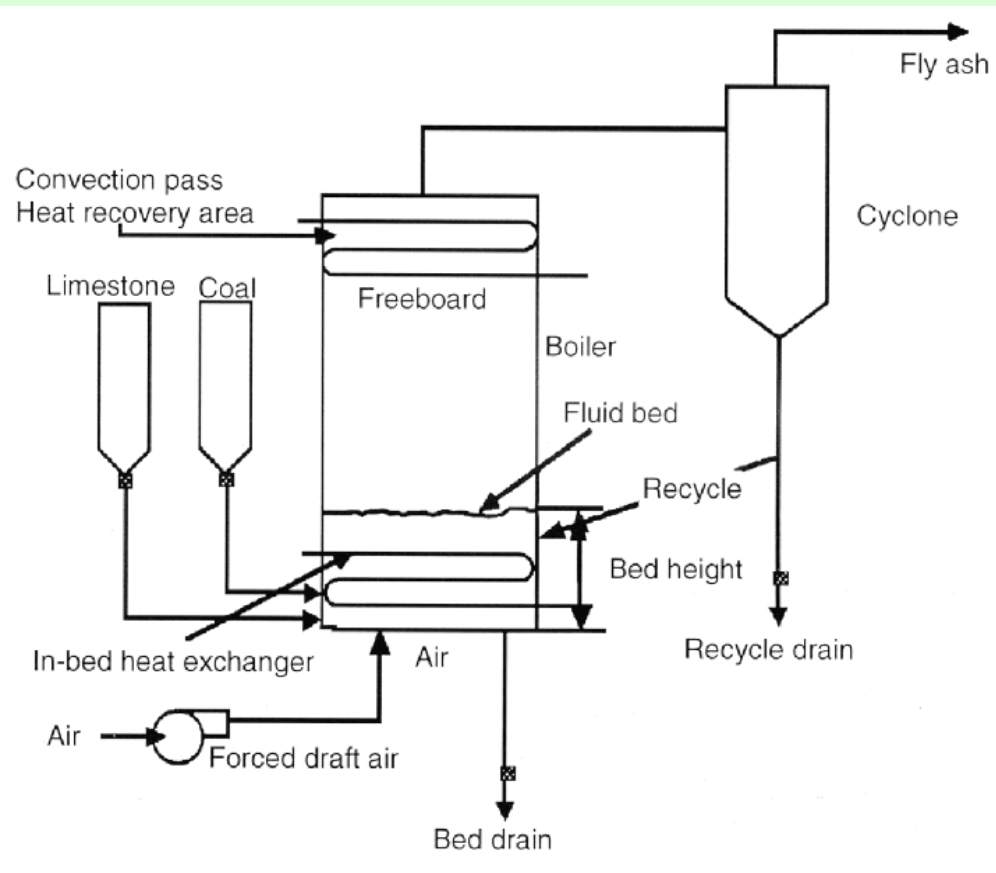
Πάνω από το υλικό της κλίνης βρίσκεται κλίνη παράσυρσης σωματιδίων CaO με ανακυκλοφορία. Η θερμότητα που εκλύεται από την καύση μεταφέρεται στην κλίνη παράσυρσης με ανακυκλοφορία, από σωλήνες που βρίσκονται πάνω από την πυκνή κλίνη.

Καύση εξανθράκωματος & ασβεστόλιθου σε κυκλικό θάλαμο υψηλής ταχύτητας → μετακίνηση στην κορυφή της διάταξης (χαμηλών ταχυτήτων) όπου εγχύεται γαιάνθρακας & αέρας. Τα άκαυστα στερεά εκπίπτουν από την ροή αερίου και κατανέμονται στην περιμετρο της μονάδας (στροβιλώδης κίνηση) → Είσοδος σε δακτυλιοειδή ρευστοστερεά κλίνη (υψηλή θερμοκρασία). Το ύψος της κλίνης μένει σταθερό

### Κυκλωνική ρευστοστερεά κλίνη



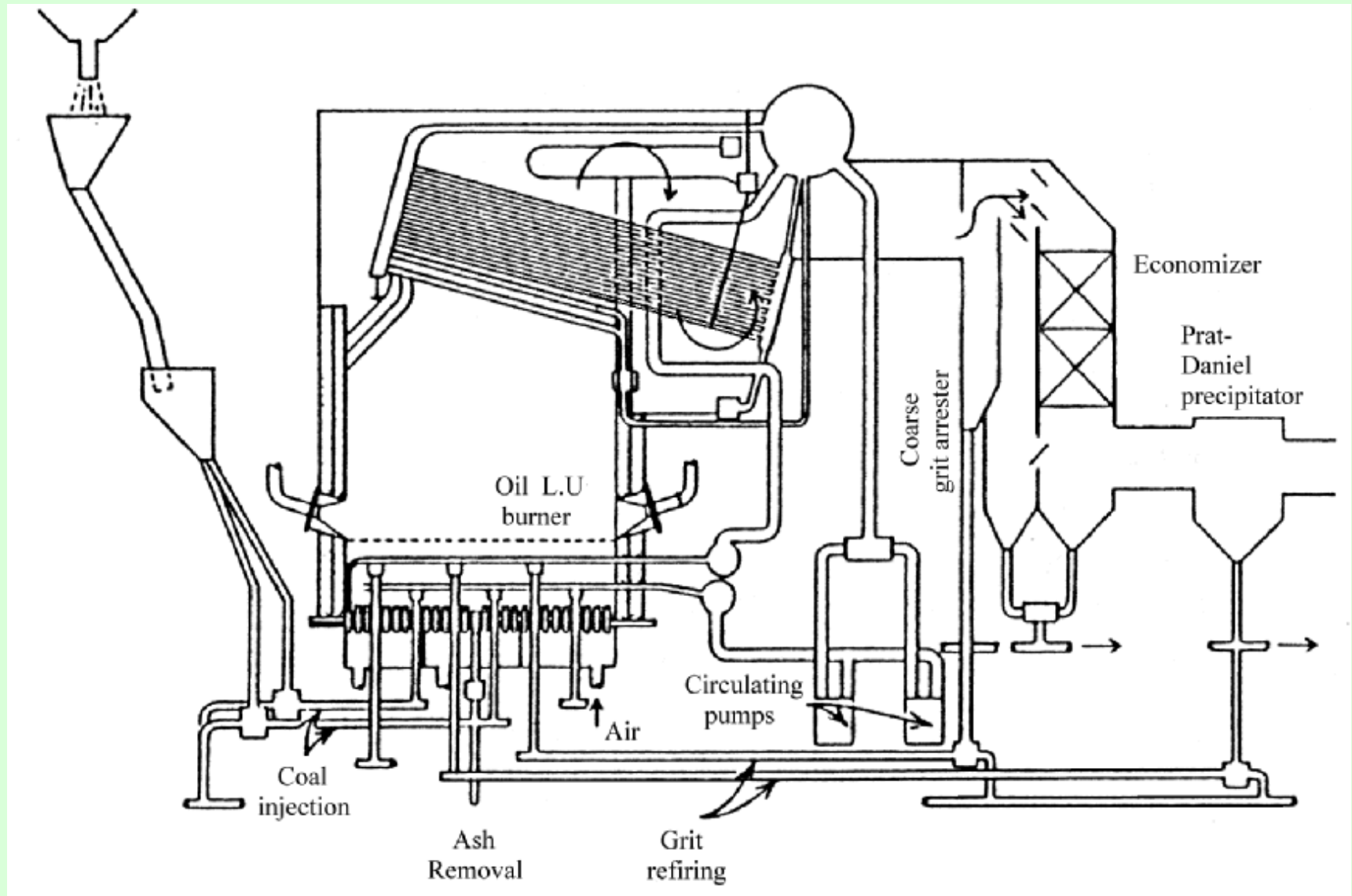
### III. Διεργασία Καύσης σε Ρευστοστερεά Κλίνη υπό Ατμοσφαιρική Πίεση (AFBC)



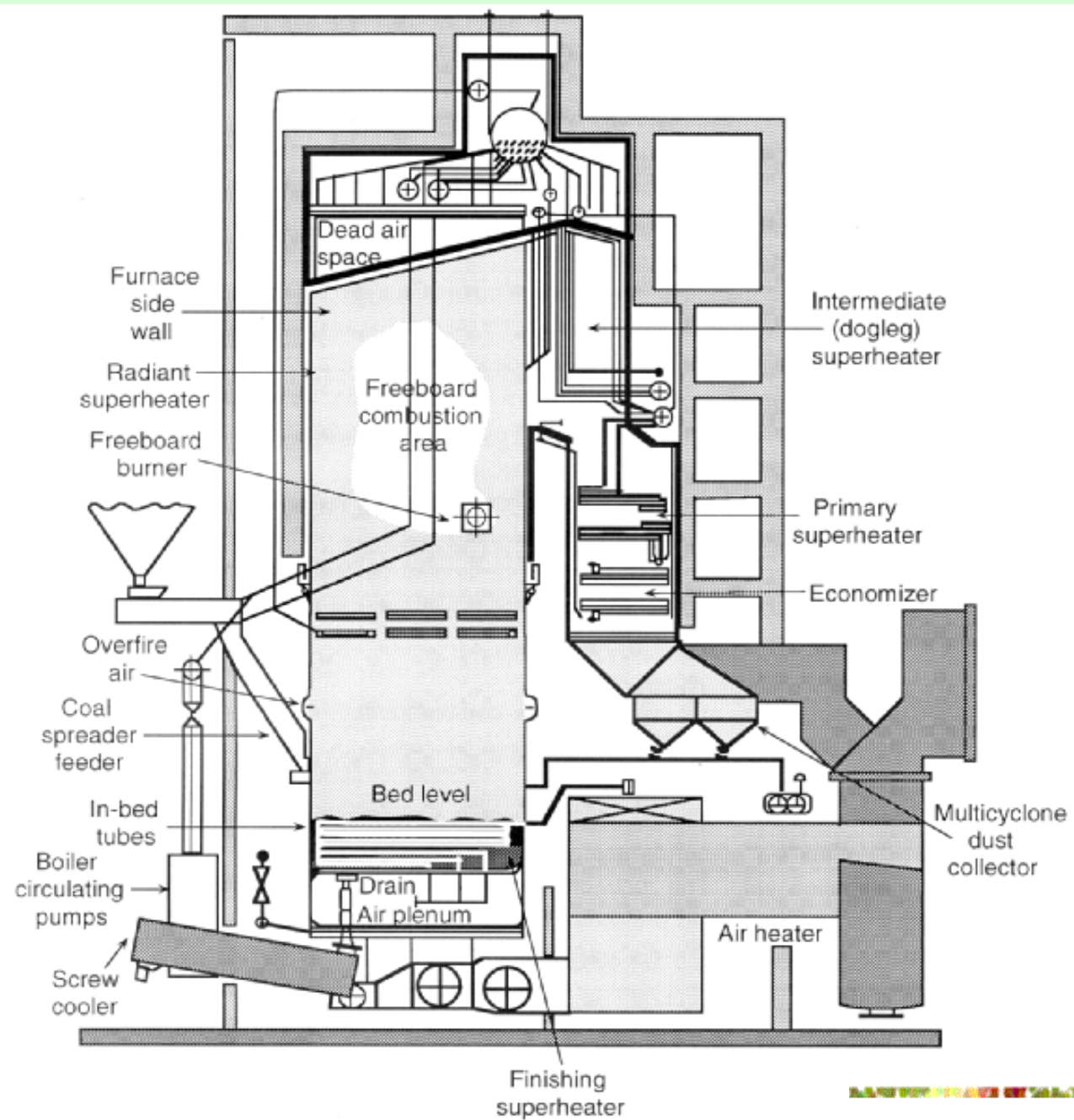
**Σχήμα 3.18** Σχηματική απεικόνιση κλίνης φουσαλίδων

- Εφαρμόζεται κυρίως σε μεγάλους βιομηχανικούς κλιβάνους (90t/h ατμού ή μεγαλύτερους) για παραγωγή ατμού σε βιομηχανικές διεργασίες, θέρμανση ή/και παραγωγή ηλεκτρισμού
- Ο κλιβανός χρησιμοποιεί μια διάταξη κλίνης φουσαλίδων ή κλίνης με ανακυκλοφορία.
- Συνήθης θερμοκρασία λειτουργίας ~850°C (διατηρείται σταθερή, λόγω των μεγάλων ρυθμών μεταφοράς και απαγωγής θερμότητας )
- Η χαμηλή θερμοκρασία μειώνει τον σχηματισμό επισκωρώσεων και επικαθίσεων και NO<sub>x</sub> ενώ ο ασβεστόλιθος, αφού διασπασθεί, αντιδρά με SO<sub>2</sub> → CaSO<sub>4</sub>
- Ο χρόνος παραμονής στην κλίνη είναι περίπου 1 λεπτό
- Στο ελεύθερο όριο (freeboard) επιτυγχάνεται ένα επιπλέον 10% με 20% της καύσης του γαιάνθρακα.
- Ο κυκλώνας απομακρύνει τα μικρά σωματίδια που συμπαρασύρονται.

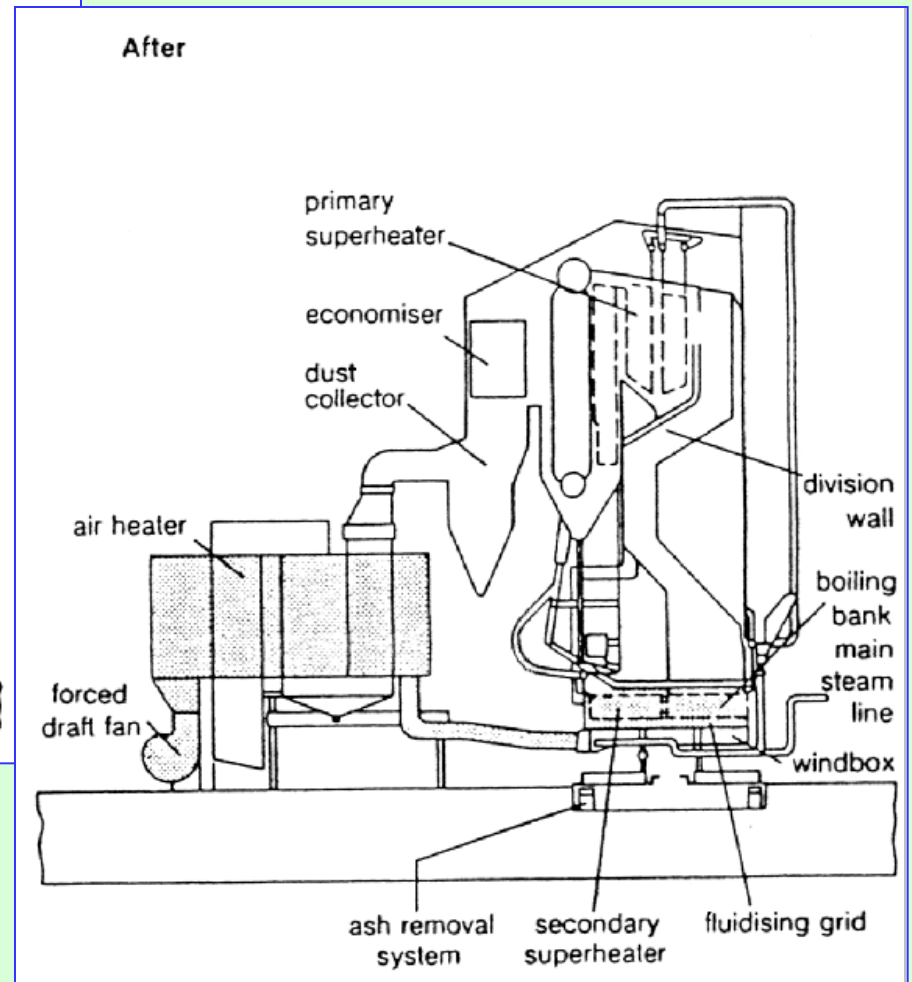
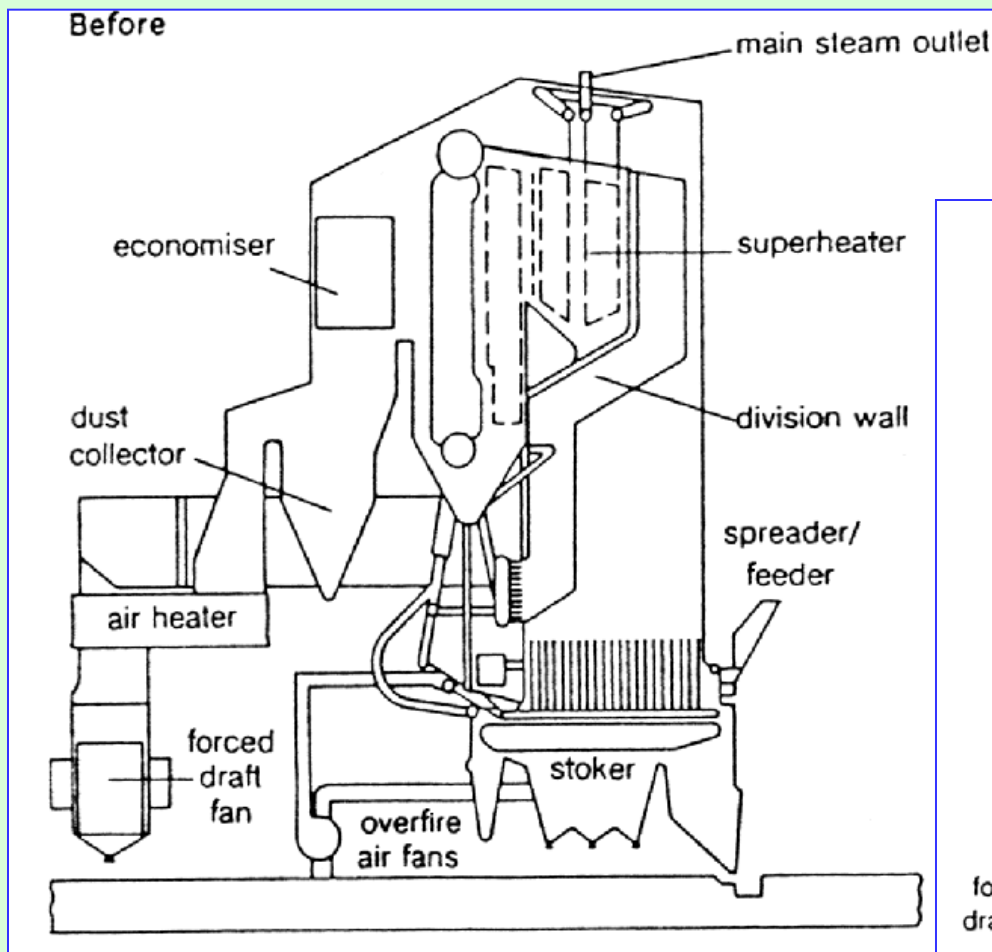




**Σχήμα 3.19.** Πιλοτική μονάδα AFBC, κατασκευασμένη από την εταιρία Babcock Combustion System Ltd.

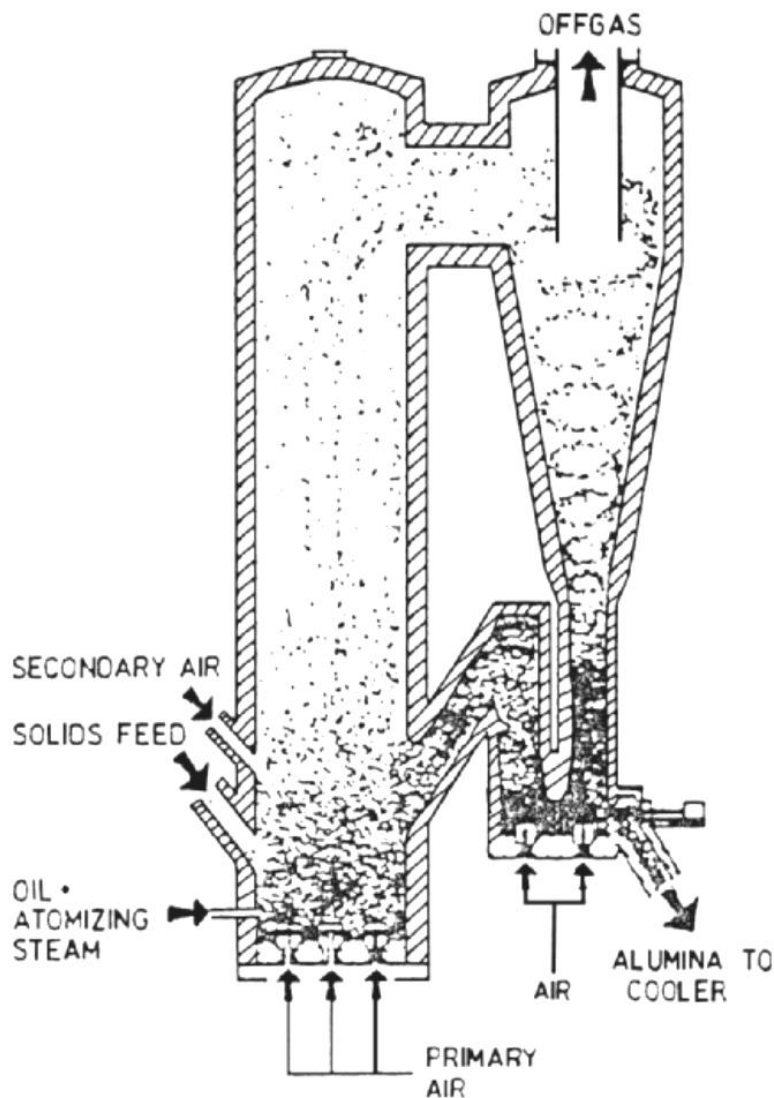


**Σχήμα 3.20**  
 Κλίβανος AFBC  
 κλίνης φυσαλίδων  
 Black Dog



**Σχήμα 3.21** Μετατροπή μίας εστίας διασποράς 80MWe σε ένα σύστημα AFBC κλίνης φυσαλίδων(Montana Dakota) <sup>43</sup>

# Κλίβανοι καύσης AFBC με ανακυκλοφορία



- Παρόμοιοι με τους κλίβανους καύσης σε ρευστοστερεά κλίνη φουσαλίδων υπό ατμοσφαιρική πίεση
- Μικρότερες διαστάσεις σωματιδίων γαιάνθρακα και ασβεστόλιθου και υψηλότερες ταχύτητες αερίων
- Υψηλότεροι κλίβανοι με μικρότερες διατομές
- Συνήθως δεν συμπεριλαμβάνουν εναλλάκτες θερμότητας ενσωματωμένους στην κλίνη λόγω πιθανής διάβρωσης από τις υψηλές ταχύτητες
- Το σύστημα τροφοδοσίας απαιτεί λιγότερα σημεία τροφοδοσίας, κατά μία τάξη μεγέθους, λόγω της αυξημένης ανάμειξης των στερεών
- Ο κυκλώνας (λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες) βρίσκεται πριν από τις επιφάνειες συναγωγής θερμότητας, ώστε να τις προστατεύει από την διάβρωση εξ' αιτίας της μεγάλης ποσότητας και ταχύτητας των στερεών
- Η καύση λαμβάνει χώρα τόσο στον κλίβανο όσο και στον κυκλώνα

**Σχήμα 3.23** Καύση σε δύο στάδια σε μία ρευστοστερεά κλίνη ανακυκλοφορία

# Πλεονεκτήματα των κλιβάνων καύσης AFBC

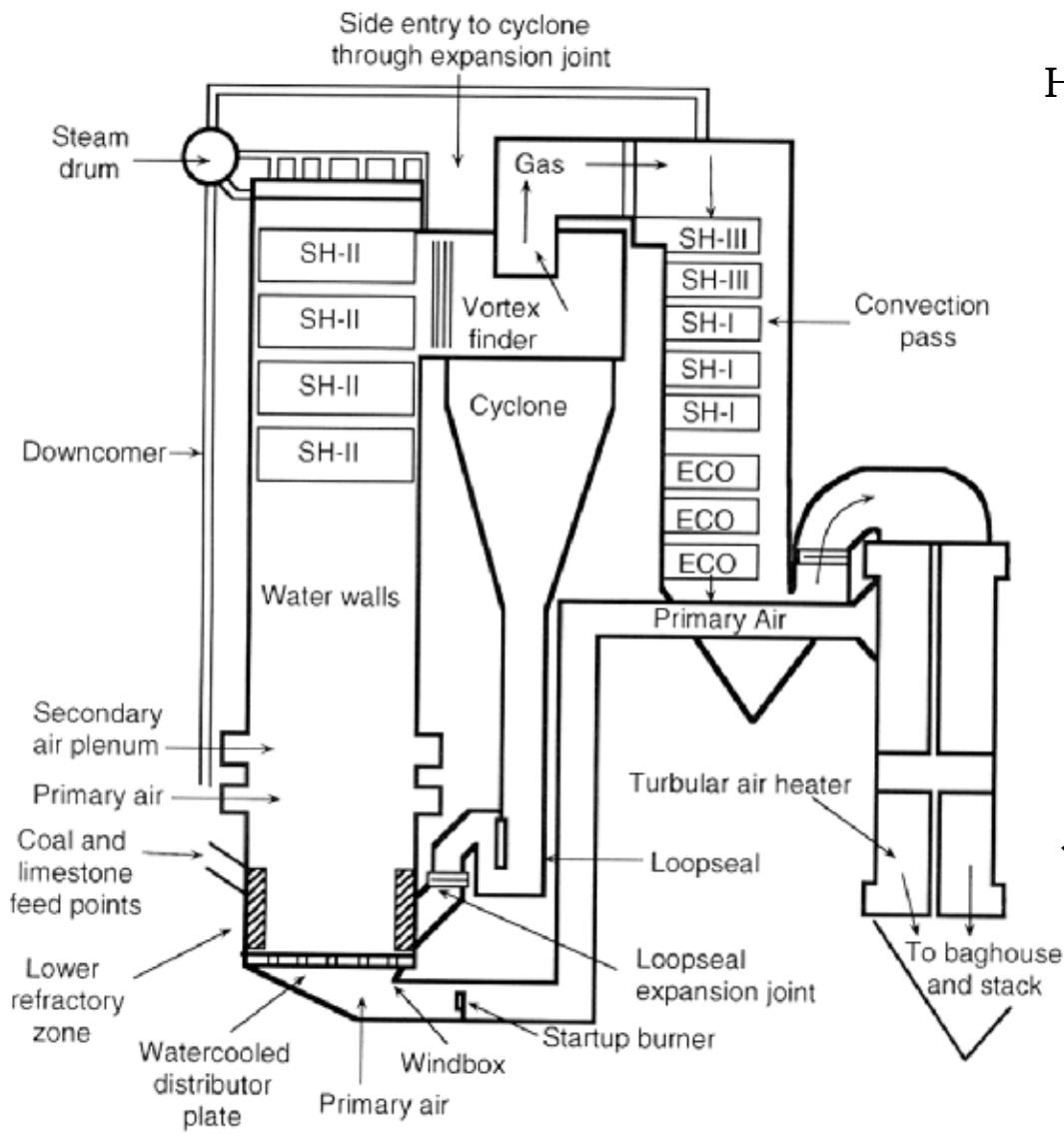
- Μπορούν να χρησιμοποιούν καύσιμα μικρής θερμογόνου δύναμης
- Υψηλοί ρυθμοί εναλλαγής θερμότητας (λόγω των μικρών μεγεθών σωματιδίων και των υψηλότερων ταχυτήτων αερίων) και αυξημένη φόρτιση
- Μείωση σχηματισμού NO<sub>x</sub> λόγω της σταδιακής καύσης
- Υψηλότερος βαθμός συγκράτησης θείου σε χαμηλές αναλογίες Ca/S (μικρότερες του 1.5), αφού η αντίδραση αποθείωσης εκτελείται με ταχύτερο ρυθμό

**Πίνακας 3.2** Σύγκριση εκπομπών από γαιάνθρακες 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
Έκπεμπόμενο 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



**Σχήμα 3.24** Κλίβανος AFBC με ανακυκλοφορία Nucla

Η μονάδα χρησιμοποιεί γαιάνθρακα για την παραγωγή 110MW.

Οι περιορισμοί στις εκπομπές αερίων ήταν 12.9mg/MJ σωματιδιακών εκπομπών, 172mg/MJ για το SO<sub>2</sub> και 215mg/MJ για τα NO<sub>x</sub>.

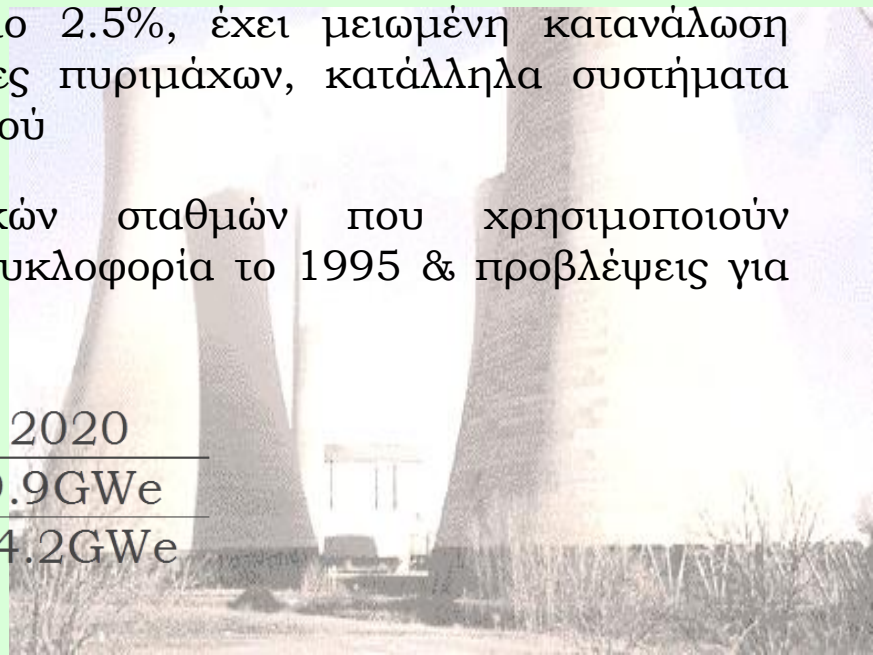
Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποδοχής έδειξαν:

- ✓ αποδοτικότητα καύσης 98.9%
- ✓ κατακράτηση θείου 70% και 95%, σε αναλογίες Ca/S 1.5 και 4, αντίστοιχα
- ✓ Οι σωματιδιακές εκπομπές είχαν ένα βαθμό αδιαφάνειας <5%
- ✓ Η εκπομπή NO<sub>x</sub> ήταν περίπου η μισή από το όριο σχεδιασμού των 129mg/MJ
- ✓ Η εκπομπή SO<sub>2</sub> βρισκόταν στο όριο συμμόρφωσης των 172mg/MJ.

# Εφαρμογές στον κόσμο: συστήματα AFBC με ανακυκλοφορία που χρησιμοποιούν λιγνίτη

- Σύστημα στο Berrenrath και στο Wachtbery, σε συνδυασμό με 4 κλιβάνους παραγωγής ατμού, συνολικής δυναμικότητας 850t/h
- 2 μονάδες, δυναμικότητας 165MWe, από την Εταιρία Texas-New Mexico Power, με υψηλή απόδοση και προστασία περιβάλλοντος
- Η μεγαλύτερη μονάδα δυναμικότητας 250MWe λειτουργεί στην περιοχή Provence /Gardanne στην Γαλλία, από την εταιρία GEC Alstrom-Stein. Χρησιμοποιεί υποασφαλτούχο γαιάνθρακα με περιεκτικότητα σε θείο περίπου 3.8%
- Η μονάδα δυναμικότητας 250MWe, στην Mangrol της Ινδίας, που χρησιμοποιεί λιγνίτη με μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 2.5%, έχει μειωμένη κατανάλωση βοηθητικής ενέργειας, μικρότερες ανάγκες πυριμάχων, κατάλληλα συστήματα υποστήριξης και υπερκρίσιμες πιέσεις ατμού
- Συνολική δυναμικότητα θερμοηλεκτρικών σταθμών που χρησιμοποιούν γαιάνθρακα σε συστήματα AFBC με ανακυκλοφορία το 1995 & προβλέψεις για τα επόμενα χρόνια:

	1995	2010	2020
Ευρώπη	1.36GWe	6.7GWe	9.9GWe
Κόσμος	8GWe	42.4GWe	74.2GWe



# Η Διεργασία Καύσης σε Ρευστοστερεά Κλίνη υπό Πίεση

- Διατηρούν όλα τα πλεονεκτήματα λειτουργίας των AFBC
- Το μέγεθος του θαλάμου καύσης για μία δεδομένη θερμική δυναμικότητα είναι μικρότερο, επειδή ο ρυθμός της αντίδρασης αυξάνεται με την πίεση λειτουργίας (0.3-1MPa). Το εμβαδόν της επιφάνειας εναλλαγής θερμότητας πρέπει να αυξηθεί ανάλογα με την αύξηση της πίεσης και κατά συνέπεια η κλίνη να είναι βαθύτερη ώστε οι επιπλέον σωλήνες να βυθίζονται
- Η απόδοση της καύσης είναι τέτοια, ώστε εξαλείφεται η ανάγκη ανακύκλωσης των στερεών
- Η κατακράτηση θείου βελτιώνεται με την πίεση, χρησιμοποιώντας δολομίτη αντί για ασβεστόλιθο
- Οι εκπομπές NOx είναι σημαντικά χαμηλότερες
- Για αυξημένη θερμική απόδοση απαιτείται η χρήση αεριοστροβίλων στο κύκλωμα:
  - ~Χρήση συνδυασμένου κύκλου στροβίλων ατμού-αερίου ή
  - ~Χρήση αδρανούς αερίου ή αέρα σε ένα κλειστό κύκλωμα για την εξαγωγή της θερμότητας από την κλίνη.
- Μονάδες για λιγνίτη, και ειδικά αυτές με επαναθέρμανση των καυσαερίων ή ολοκληρωμένη ξήρανση, έχουν πετύχει απόδοση >45%



### Πίνακας 3.3 Εκτιμήσεις περιβαλλοντικής απόδοσης για κλιβάνους ρευστοστερεάς κλίνης υπό ατμοσφαιρική πίεση

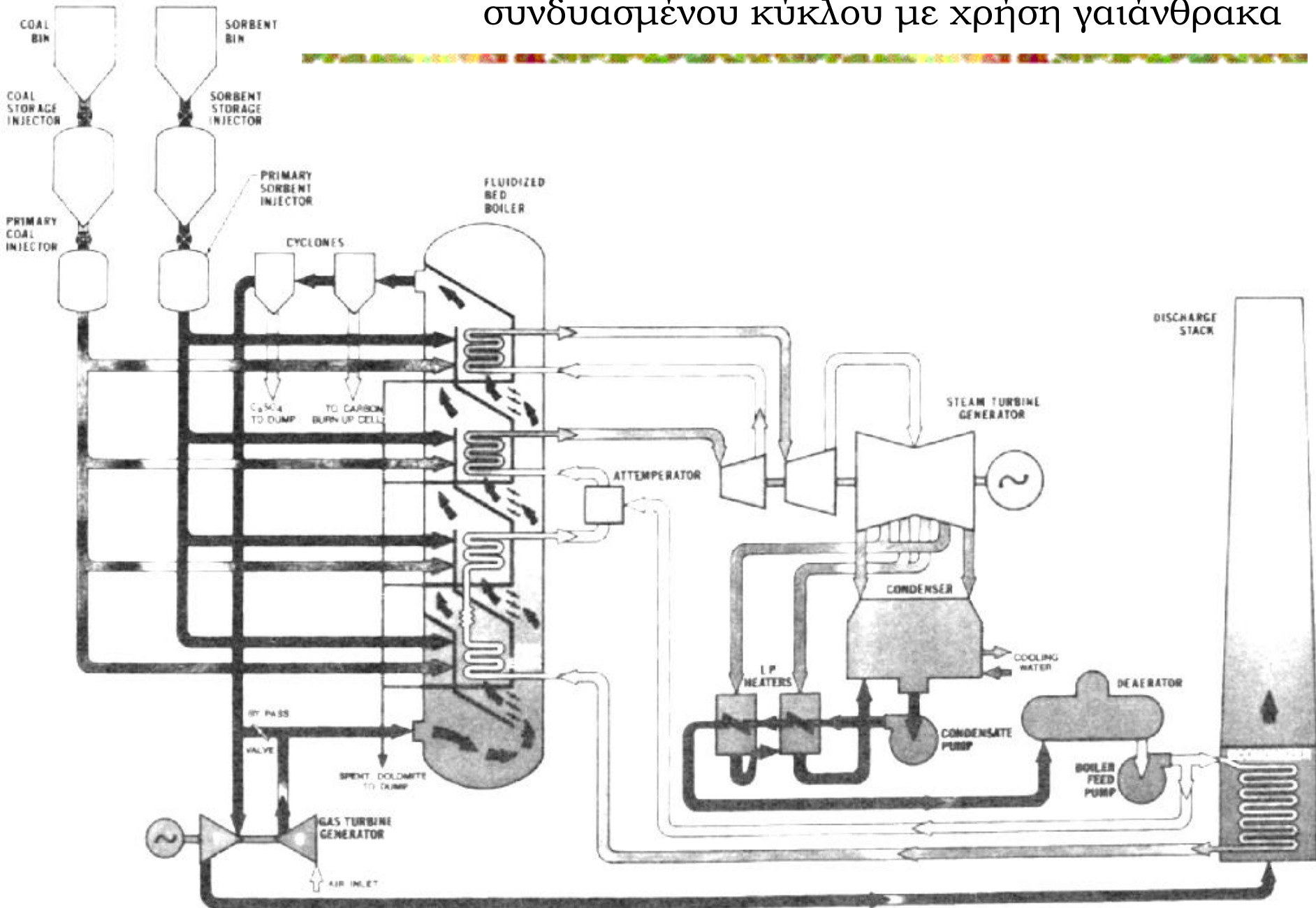
SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>		Σωματιδιακά		Δευτερεύοντα		Συνολική	Αξιολόγηση
Εκπομπές* (απομάκρυνση %)	Αξιολό- γηση	Εκπομπές* (απομάκρυνση %)	Αξιολό- γηση	Εκπομπές* (απομάκρυνση %)	Αξιολό- γηση	Εκπομπές* **	Αξιολό- γηση**	Περιβαλλοντική Αξιολόγηση**	Ποιότητας Δεδομένων
0.28 (>95%)	Πολύ καλή	0.36 (80%)	Πολύ Καλή	8.5 (0)	Πολύ Καλή	0.40	Μέση	Καλή	Πολύ Καλή

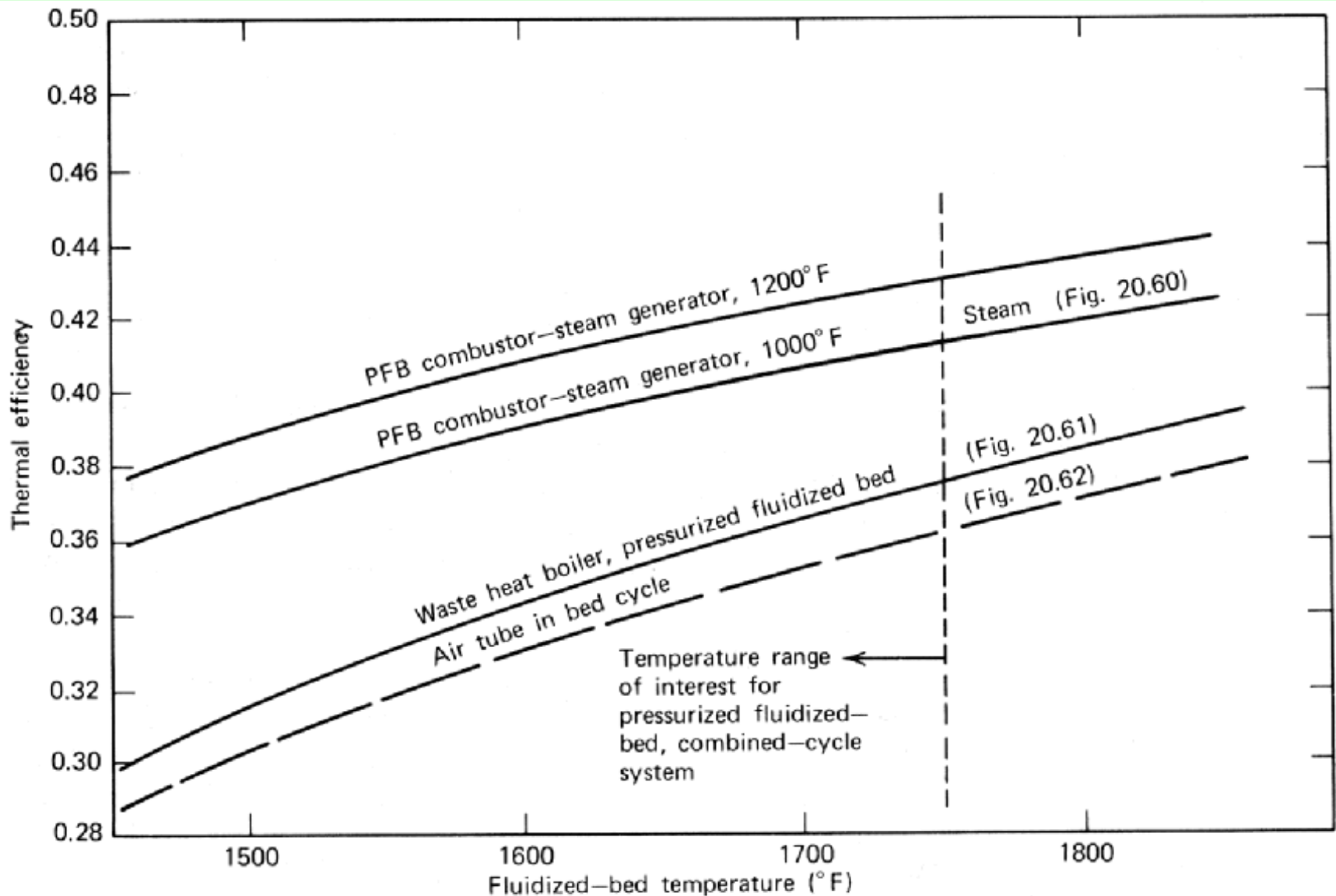
\* Οι εκπομπές των κυρίων ρυπαντών εκφράζονται σε (lbs. ρυπαντή)/(106 Btu)

\*\* Οι αξιολογήσεις είναι: πολύ υψηλή, υψηλή, μέση, χαμηλή, πολύ χαμηλή.

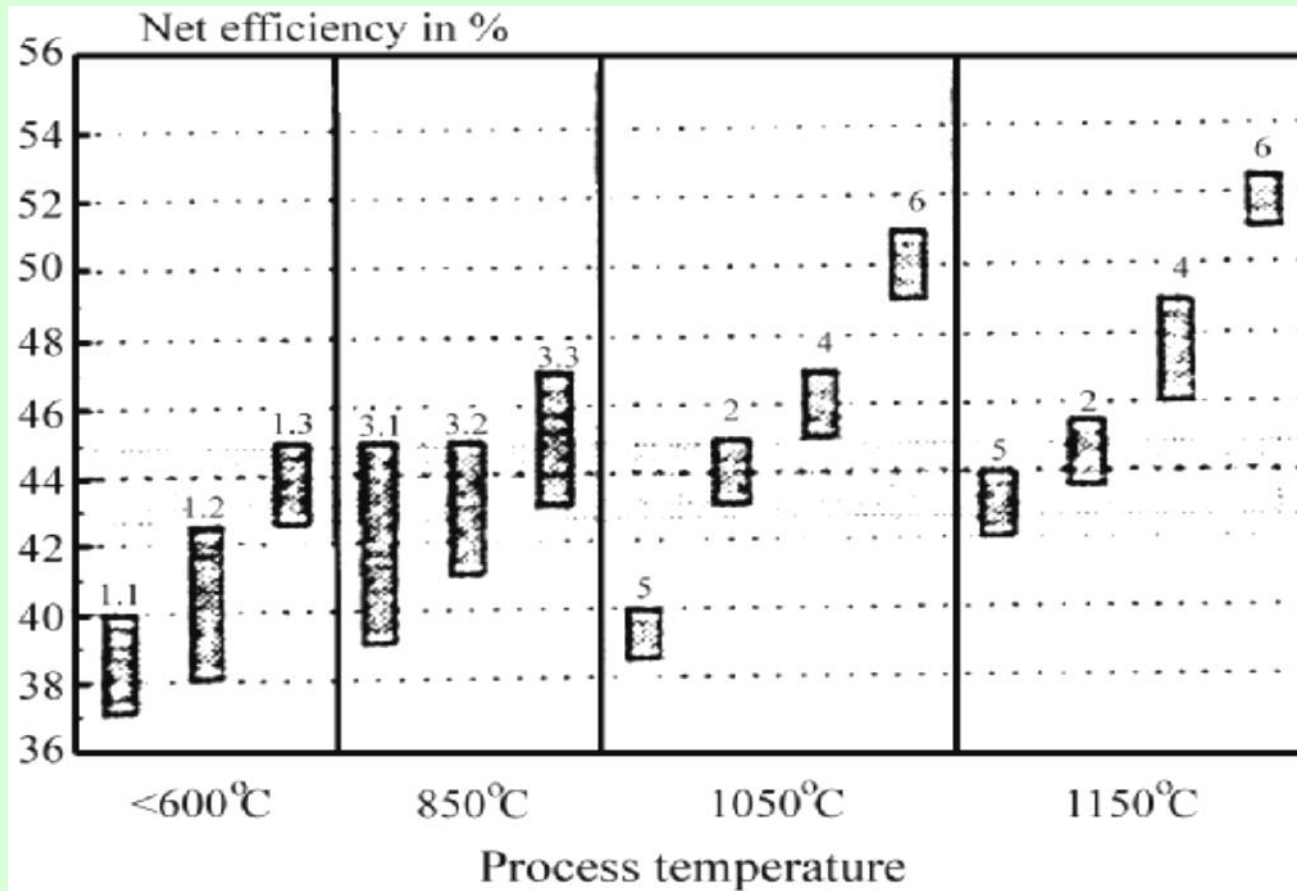
\*\*\* Οι εκπομπές δευτερευόντων ρυπαντών εκφράζονται σε (lbs)/(lb. γαιάνθρακα)

**Σχήμα 3.25** Θερμοηλεκτρικός σταθμός  
συνδυασμένου κύκλου με χρήση γαιάνθρακα





**Σχήμα 3.26** Σύγκριση αποδοτικότητας εναλλασσόμενων κύκλων, έναντι θερμοκρασίας κλιβάνου ρευστοστερεάς κλίσης



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

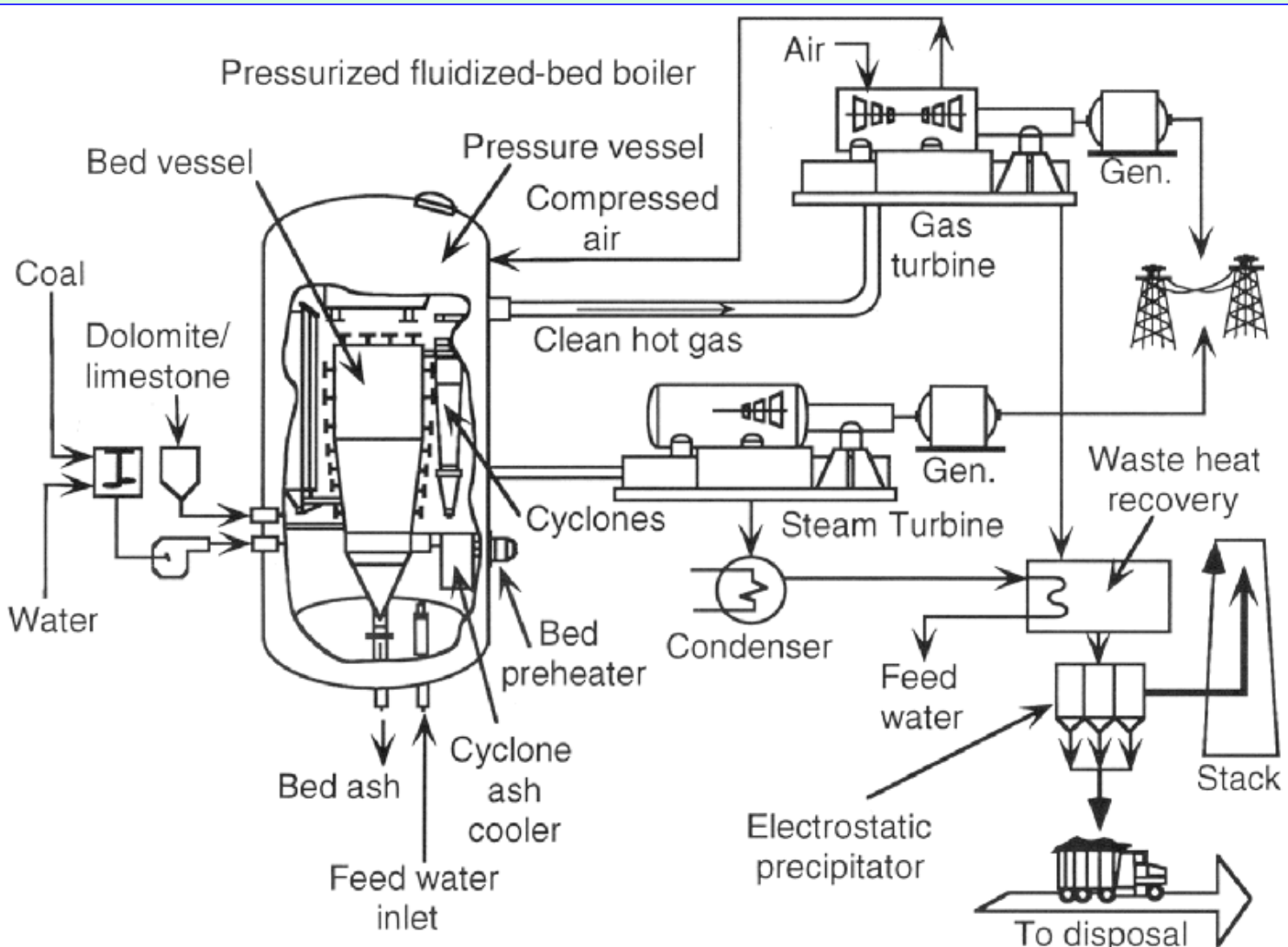
5. Pressurized coal gasification

6. Natural gas combined cycle

**Σχήμα 3.27** Διεργασίες θερμοηλεκτρικών σταθμών. Αποδοτικότητα<sub>2</sub> σε διάφορες θερμοκρασίες διεργασιών

## Σχήμα 3.28 Έργο επίδειξης καύσης σε PFBC Tidd

Τροφοδοσία: νερό & γαιάνθρακας  
Απορροφητικό υλικό: τέφρα & δολομίτης



Στόχοι έργου:

- Επίδειξη κλιβάνου καύσης 70MW
- Επαλήθευση καταλληλότητας καύσης PFBC με εφαρμογή συνδυασμένου κύκλου
- Απομάκρυνση του  $\text{SO}_2$  >90%
- Εκπομπές  $\text{NO}_x < 86$  mg/MJ
- Επίτευξη συνολικής απόδοσης μονάδας 38%

# Συστήματα PFBC στον κόσμο

- 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 PFBC προχώρησε σημαντικά
- Κατασκευάσθηκαν πέντε μονάδες PFBC (2 μονάδες έχουν κατασκευασθεί στο Värtan της Σουηδίας, 1 στο Tidd του Ohio στις ΗΠΑ, 1 στο Escatron Ισπανίας, 1 στο Wakamatsu Ιαπωνίας) με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρισμού 70MW - 80MW από διάφορους γαιάνθρακες, συμπεριλαμβανομένων γαιανθράκων χαμηλής τάξης υψηλής περιεκτικότητας σε θείο και τέφρα
- Δύο μονάδες δυναμικότητας 350MWe η κάθε μία, έχουν πρόσφατα εγκατασταθεί στο Mountaineer των ΗΠΑ και στο Kgushu της Ιαπωνίας
- Συνολική δυναμικότητα των μονάδων PFBC στην Ευρώπη και στον κόσμο το 1995 και προβλέψεις για τα επόμενα :

	1995	2010	2020
Ευρώπη	0.2GWe	1.8GWe	4GWe
Κόσμος	1.4GWe	7.6GWe	13.9GWe



## 3.5.2 Τεχνολογίες Ελέγχου Οξειδίων Θείου και Αζώτου

### I. Τεχνολογίες Ελέγχου Οξειδίων του Θείου

Προσθήκη απορροφητικών υλικών απευθείας στην κλίνη καύσης



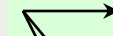
Κατάλληλη για μεσαία επίπεδα απομάκρυνσης SO<sub>2</sub>



χαμηλό κόστος κεφαλαίου & υψηλό κόστος λειτουργίας



χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρότερες μονάδες και σε εφαρμογές αναβάθμισης μονάδων



ασβεστόλιθος



δολομίτης



τέφρα του γαιάνθρακα

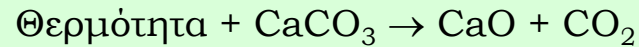
Τα απορροφητικά υλικά με βάση το ασβέστιο είναι ιδιαίτερα ελκυστικά:

- Έχουν χαμηλό κόστος και το υπό-προϊόν θειικό ή θειώδες ασβέστιο είναι αδρανές
- Η θεωρητική απαίτηση προσθήκης είναι: για κάθε 1% περιεχομένου θείου στο καύσιμο, προσθήκη απορροφητικού υλικού 3% της τροφοδοσίας του γαιάνθρακα.
- Στην πράξη η θεωρητική ποσότητα προσθήκης κατακρατεί ~ 80% του θείου, ενώ η διπλάσια ποσότητα κατακρατεί ~ 95%
- Η αποτελεσματικότητα των αντιδράσεων απορροφητικού υλικού καθορίζεται από:
  - α) τη συνολική δραστική επιφάνεια του απορροφητικού υλικού
  - β) τον χρόνο παραμονής του ασβεστίτη υπό συνθήκες που ευνοούν την θείωση
- Σε  $T > 1200^{\circ}\text{C}$  η θείωση αναστέλλεται από την πυροσυσσωμάτωση των σωματιδίων & την αύξηση του μεγέθους των κόκκων ενώ σε  $T < 800^{\circ}\text{C}$  ο ρυθμός της αντίδρασης θείωσης είναι αμελητέος  
→ το απορροφητικό υλικό εισάγεται όταν ο μέγιστος χρόνος παραμονής μπορεί να εξασφαλισθεί, σε βέλτιστες συνθήκες θερμοκρασίας.

# Επιλογές για αυξημένο έλεγχο εκπομπών SO<sub>2</sub> σε FBC

## ➤ Αύξηση τροφοδοσίας απορροφητικού υλικού (εκπεφρασμένο σαν αναλογία Ca/S)

Αύξηση του αριθμού ενεργών σωματιδίων των απορροφητικών υλικών στην κλίνη--> επιτάχυνση συνολικού ρυθμού απομάκρυνσης του SO<sub>2</sub>. Όμως, η επιλογή αυτή οδηγεί σε σημαντική καθαρή απώλεια ενέργειας, λόγω της ενδόθερμης διαπύρωσης του απορροφητικού υλικού:



Μειονεκτήματα: αυξημένο κόστος κεφαλαίου, μεγαλύτερες απαιτήσεις ελέγχου σωματιδιακών εκπομπών και αυξημένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις

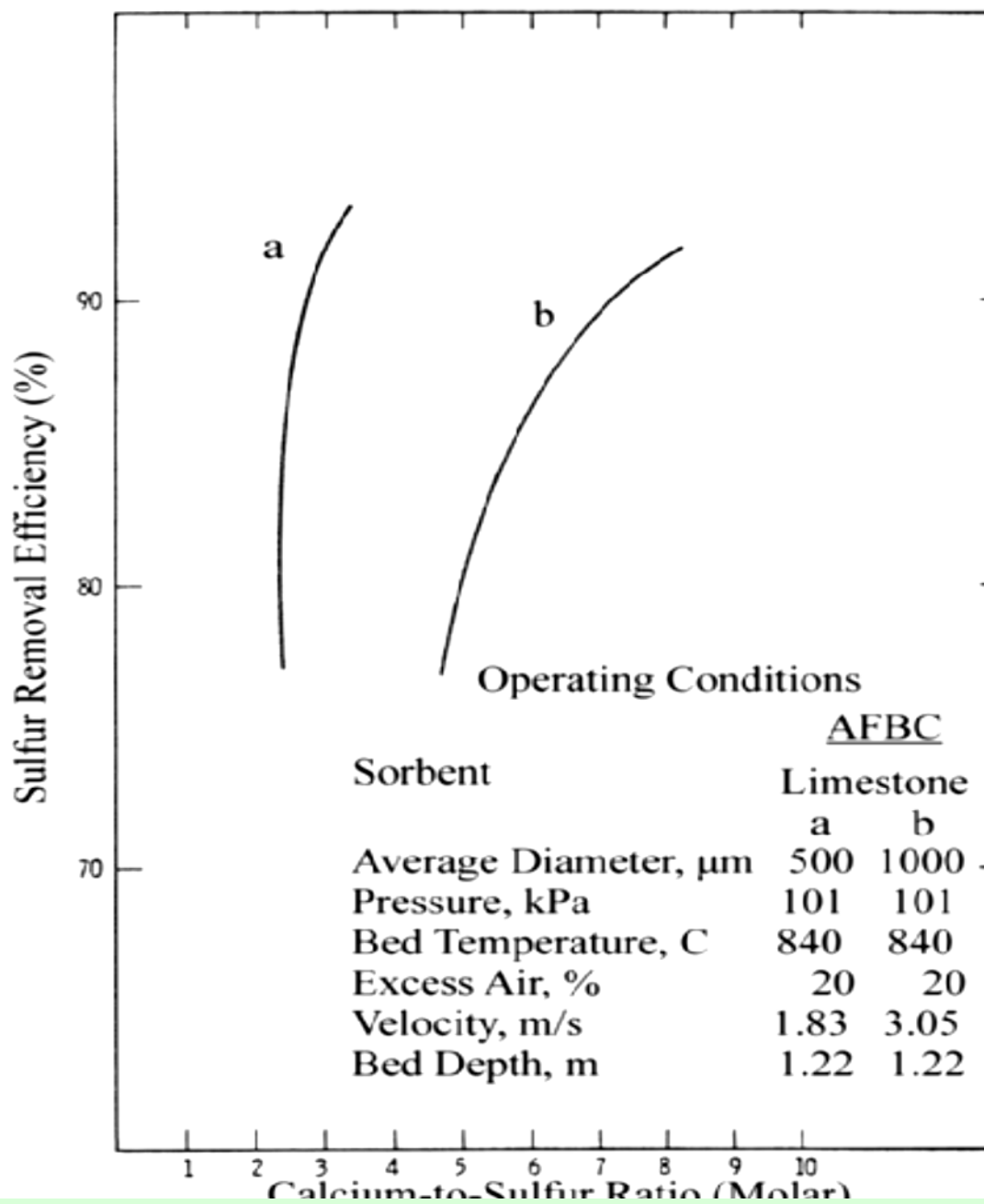
## ➤ Αύξηση χρόνου παραμονής αερίου στην κλίνη μέσω: μείωσης ταχύτητας αερίου ή αύξησης βάθους κλίνης

Περιορισμοί: Η μειωμένη ταχύτητα απαιτεί την αύξηση της επιφάνειας διατομής της κλίνης, για την διατήρηση ενός σταθερού ρυθμού θερμότητας (μικρή επίδραση στο κόστος κεφαλαίου της μονάδας).

## ➤ Μείωση μεγέθους σωματιδίου απορροφητικού υλικού (μπορεί να απαιτήσει μείωση της ταχύτητας αερίων)

Μειονέκτημα: μπορεί να απαιτηθεί λειτουργία της κλίνης με χαμηλότερες ταχύτητες αερίων ή/και μεγαλύτερη ανακύκλωση του υλικού το οποίο συλλέγεται από τους κυκλώνες-->μικρή επίδραση στο κόστος.



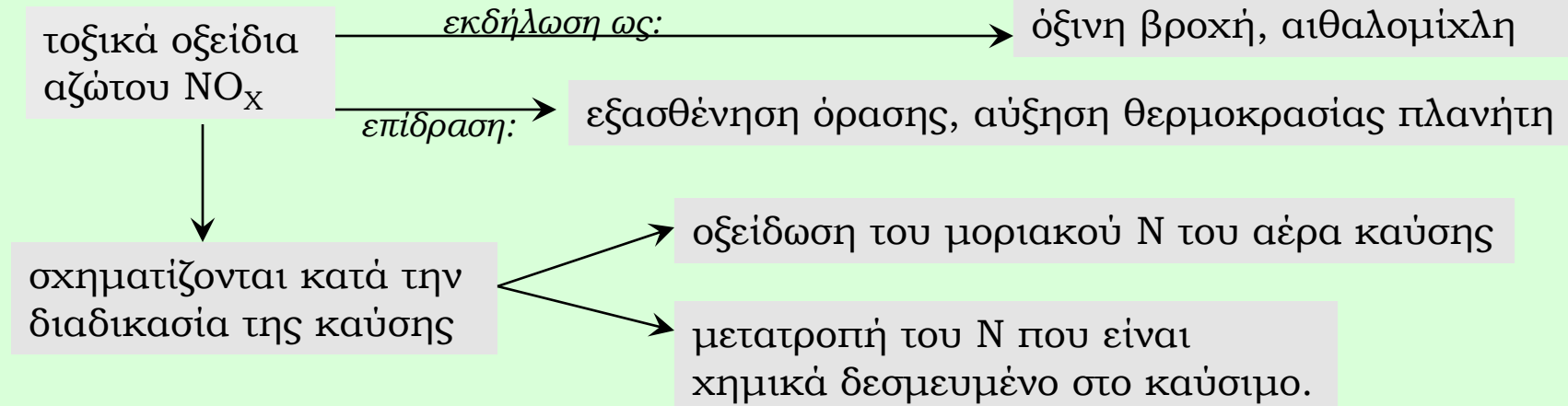


**Σχήμα 3.30**

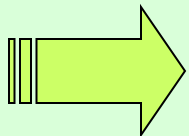
Απόδοση απομάκρυνσης S για τυπικούς προσροφητές

## II. Τεχνολογίες Ελέγχου Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου

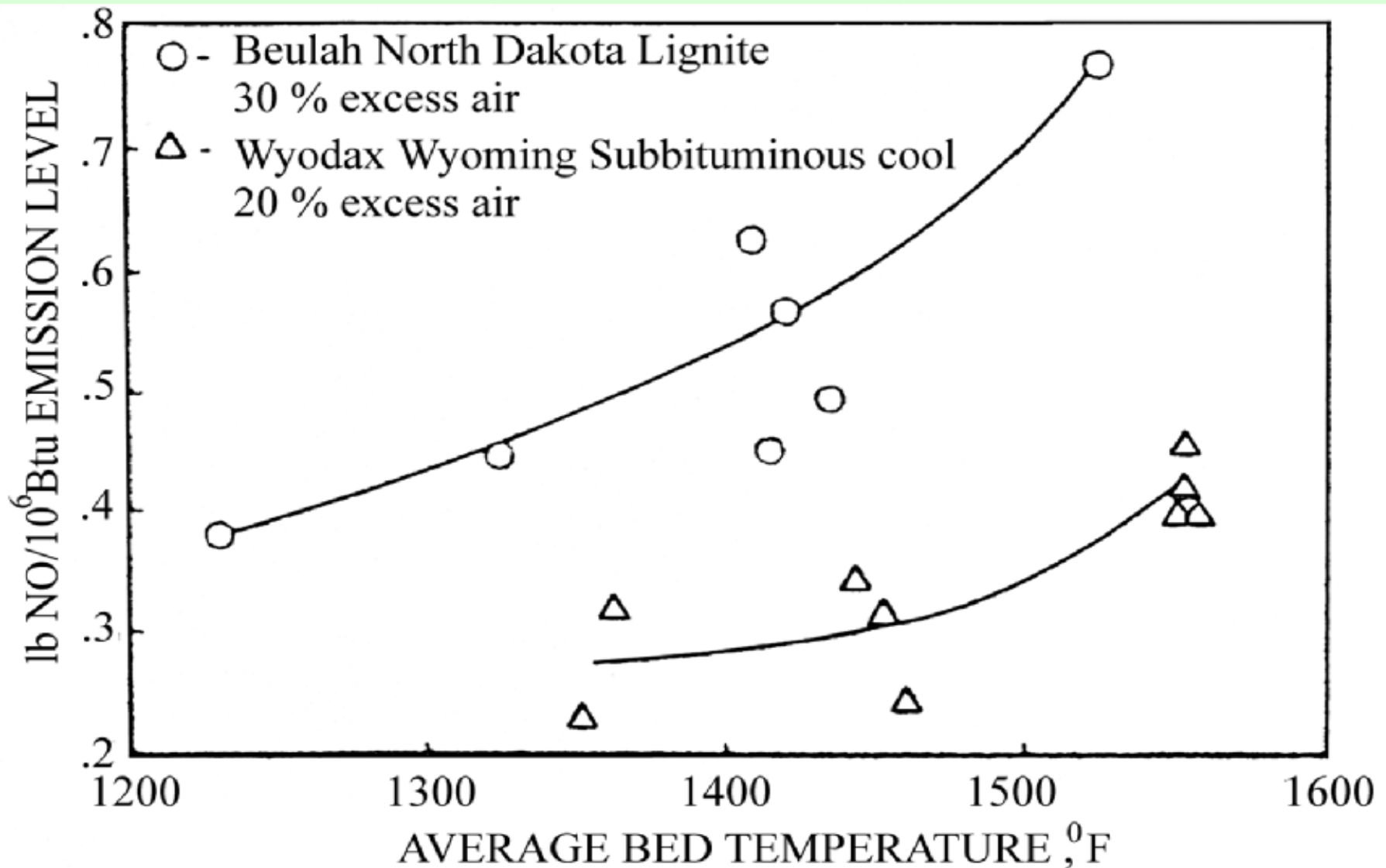
Ανάγκη περιορισμού των εκπομπών  $\text{NO}_x$  από κλιβάνους καύσης γαιάνθρακα



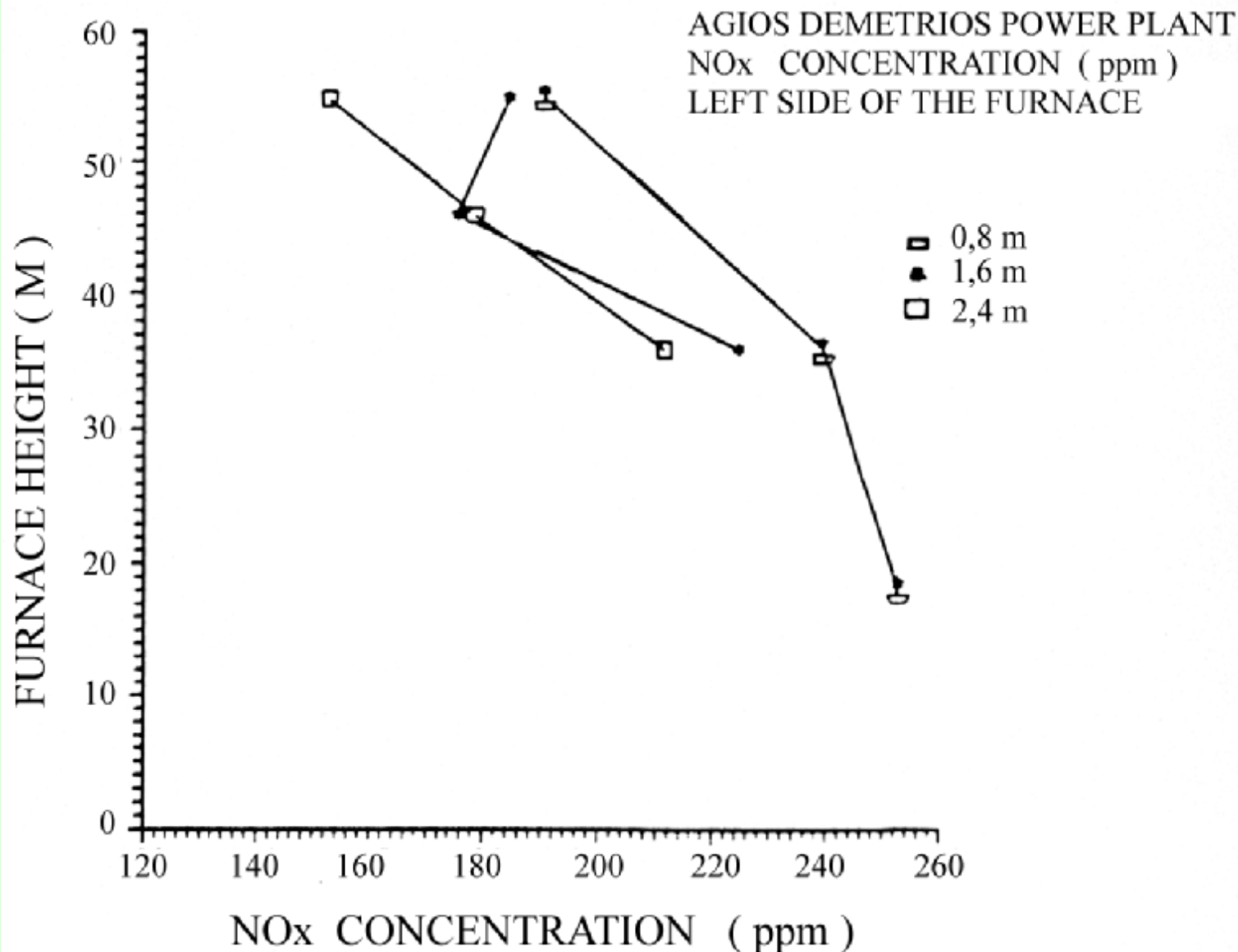
- Συνθήκες καλής ανάμειξης, υψηλής θερμοκρασίας, υψηλής περισσειας αέρα → ευνοούν την αποτελεσματική οξείδωση του καυσίμου, αλλά και την παραγωγή  $\text{NO}_x$
- Η σχετική αδράνεια και δυσ-διαλυτότητα των  $\text{NO}_x$  δυσχεραίνει περισσότερο την επεξεργασία του καυσαερίου, από ότι στην περίπτωση της απομάκρυνσης του  $\text{SO}_2$



Είναι, συνήθως, πιο εύκολο να επέμβει κανείς στο σημείο της καύσης, ώστε να αποφύγει τον σχηματισμό των  $\text{NO}_x$  και των προδρόμων τους.



**Σχήμα 3.31** Επίπεδο εκπομπής NO<sub>x</sub> συναρτήσει της μέσης θερμοκρασίας και της περίσσειας αέρα



**Σχήμα 3.32** Εκπομπές NO<sub>x</sub> (6% O<sub>2</sub>) για διαφορετικά ύψη της κλίνης, στην μονάδα Αγ.Δημητρίου ΙΙΙ

# Μέθοδοι ελέγχου των εκπομπών NO<sub>x</sub>

Οι πλέον απλές και οικονομικές τεχνολογίες ελέγχου που μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές οξειδίου του αζώτου κατά 50% έως 80% είναι:

- α) μείωση της περίσσειας του αέρα
- β) ανακύκλωση του καυσαερίου
- γ) καύση με σταδιακή παροχή αέρα
- δ) καύση με σταδιακή παροχή του καυσίμου
- ε) ανασχεδιασμό του καυστήρα.

α Μείωση περίσσειας αέρα από 25% (μέγιστη απόδοση καύσης) σε 15%-->μείωση NO<sub>x</sub> κατά ~20%.  
Ομως, ↓ περίσσειας του αέρα προκαλεί ↑ συγκεντρώσεων CO, H/C και σωματιδιακής ύλης.

β Η ανακύκλωση μειώνει την συγκέντρωση του τροφοδοτούμενου οξυγόνου και την θερμοκρασία καύσης-->επιηρεάζει την θερμική διεργασία παραγωγής NO<sub>x</sub>.  
Δυνατή μείωση NO<sub>x</sub> μέχρι και 30%.  
Μειονέκτημα: υψηλό κόστος εξοπλισμού και λειτουργίας φυσητήρων ανακύκλωσης

γ Εισαγωγή ποσότητας αέρα < στοιχειομετρική. Ο υπόλοιπος αέρας προστίθεται στον κλίβανο μέσω ξεχωριστών θυρών. Μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> κατά ~ 30%.  
Πλεονεκτήματα: φθηνή, δεν επηρεάζει απόδοση του κλιβάνου (όμως πιθανή πρόκληση επισκωρώσεων)

δ Έγχυση του καυσίμου σε περισσότερες από μία ζώνες καύσης στον κλίβανο.  
Μείωση κατά 40-60% των NO<sub>x</sub>. Μειονέκτημα: επηρεάζεται η απόδοση του κλιβάνου

ε Στόχος: η μεταβολή μοντέλου ανάμειξης καυσίμου-αέρα, για την επίτευξη κατά το δυνατόν αεροδυναμικής σταδιακής μείξης χωρίς επιπλέον έγχυση αέρα σε χαμηλότερες ζώνες

### 3.5.3 Έργα Επίδειξης "Καθαρής" Καύσης Γαιάνθρακα

- Η έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της "καθαρής" και αποτελεσματικής λειτουργίας των λεβήτων εστίας καύσης είναι σχετικά μικρή
- Η τελευταία σημαντική προσπάθεια έγινε από την American Boiler Manufactures Association (ABMA), το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE) και την Επιτροπή Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (EPA), (1981, 1997)
- Τα περισσότερα έργα "καθαρής" τεχνολογίας αφορούν σε κλιβάνους κονιοποιημένου γαιάνθρακα, ή σε συστήματα καύσης ρευστοστερεάς κλίνης.
- Πρόγραμμα Clean Coal Technology διευθύνεται από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE). Στόχος: επίδειξη προηγμένων, αποτελεσματικών και περιβαλλοντικά βιώσιμων τεχνολογιών χρήσης του γαιάνθρακα
- Βασικοί τομείς της αγοράς που έχουν καλυφθεί:
  - (1) συσκευές περιβαλλοντικού ελέγχου για υφιστάμενες ή νέες μονάδες παραγωγής ισχύος, αξίας > 704εκ. δολάρια,
  - (2) αναβάθμιση υφιστάμενων εγκαταστάσεων παραγωγής με προηγμένα συστήματα παραγωγής ισχύος αξίας > 3.2δισ δολάρια,
  - (3) συστήματα επεξεργασίας γαιάνθρακα για παραγωγή καθαρών καυσίμων, αξίας > 519εκ. δολάρια, και
  - (4) βιομηχανικές εφαρμογές που εξαρτώνται από την χρήση γαιάνθρακα, αξίας 1.3δισ δολαρίων.

# Επέκταση Έργου Επίδειξης LIMB και Επίδειξη Coolside (The Babcock & Wilcox Company)

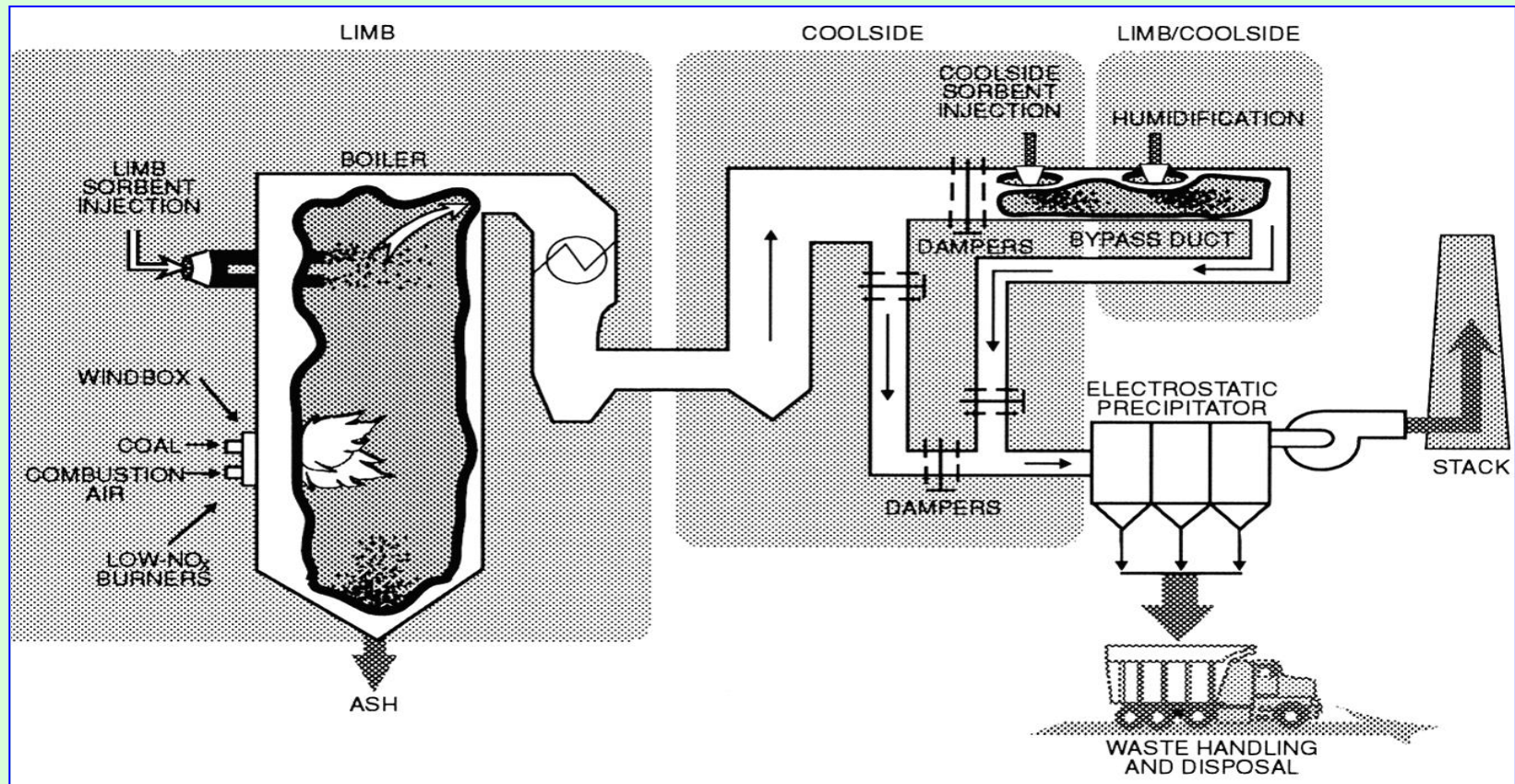
**Τεχνολογία:** Καυστήρας πολλών σταδίων με έγχυση ασβεστόλιθου / Εισαγωγή απορροφητικού υλικού απευθείας στον αγωγό **Μέγεθος:** 105MWe

**Γαϊάνθρακες:** ΟΗ ασφατούχος, 1.6%, 3.0%, και 3.8% S

**Απορροφητικά Υλικά :** Ασβεστικός ασβεστόλιθος, δολομιτικό CaO τύπου-N, ένυδρο ασβεστικό CaO, ένυδρο ασβεστικό CaO με προσθήκη λιγνινοσουλφονικού ασβεστίου

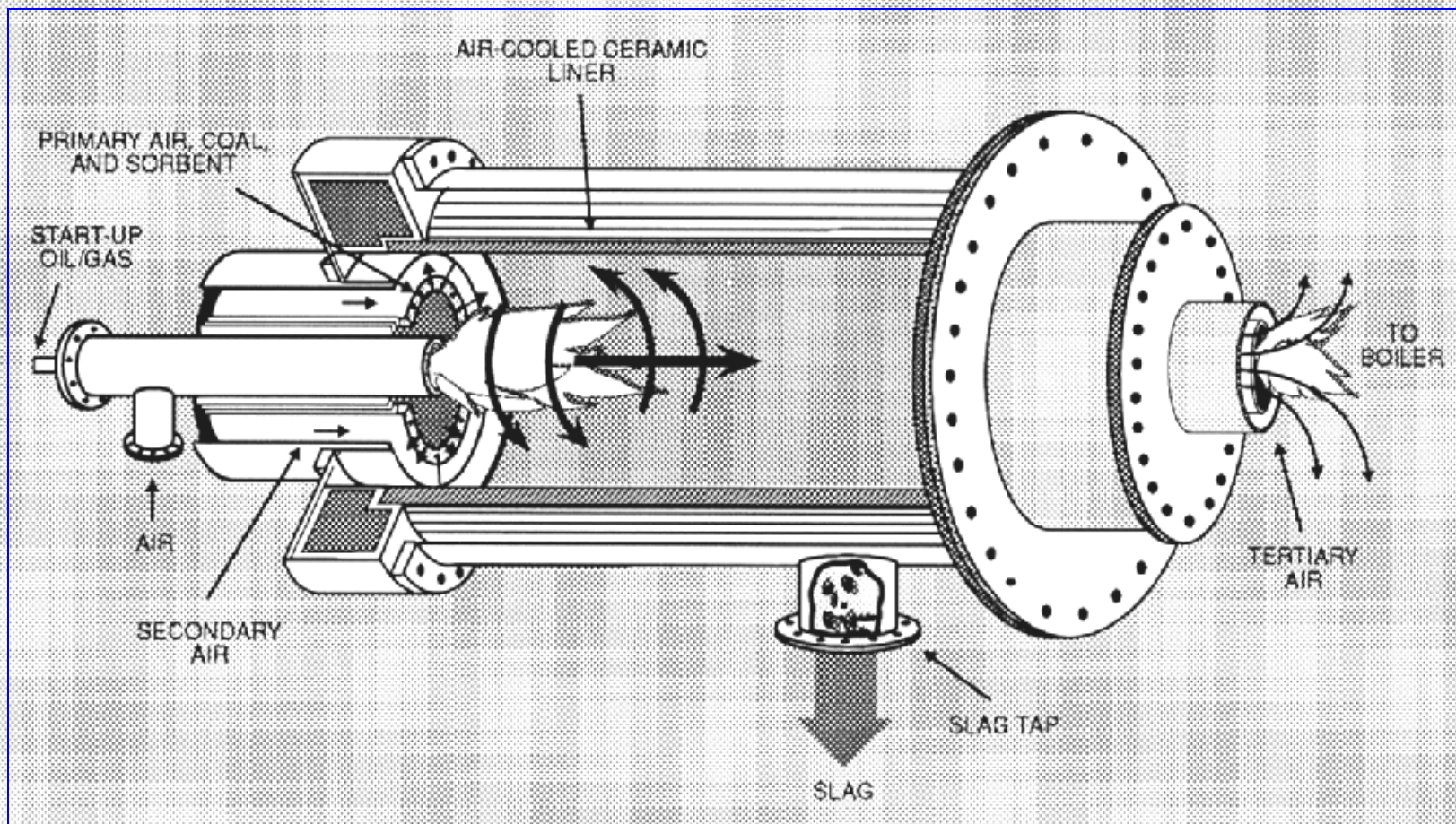
**Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα,**

**Οικονομοτεχνικά Αποτελέσματα**



# Προηγμένος Κλίβανος Κυκλώνα με Εσωτερικό Έλεγχο Εκπομπών S, N και Τέφρας (Coal Tech Corporation)

**Τεχνολογία :** Αερόφυκτος κλίβανος κυκλώνα με υγρή απομάκρυνση τέφρας **Μέγεθος :** 23 εκ. Btu/h  
**Γαιάνθρακες :** 8 διαφορετικοί ασφατούχοι γαιάνθρακες PA, 1-3.3% S  
**Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα,** **Οικονομοτεχνικά Αποτελέσματα**  
Αποδοτικότητα - πάνω από 99%





# Επίδειξη Τεχνικών Εφαρμομενικά Αναφλεγόμενης Καύσης για Μείωση Εκπομπών NO<sub>x</sub> (Southern Company Services, Inc.)

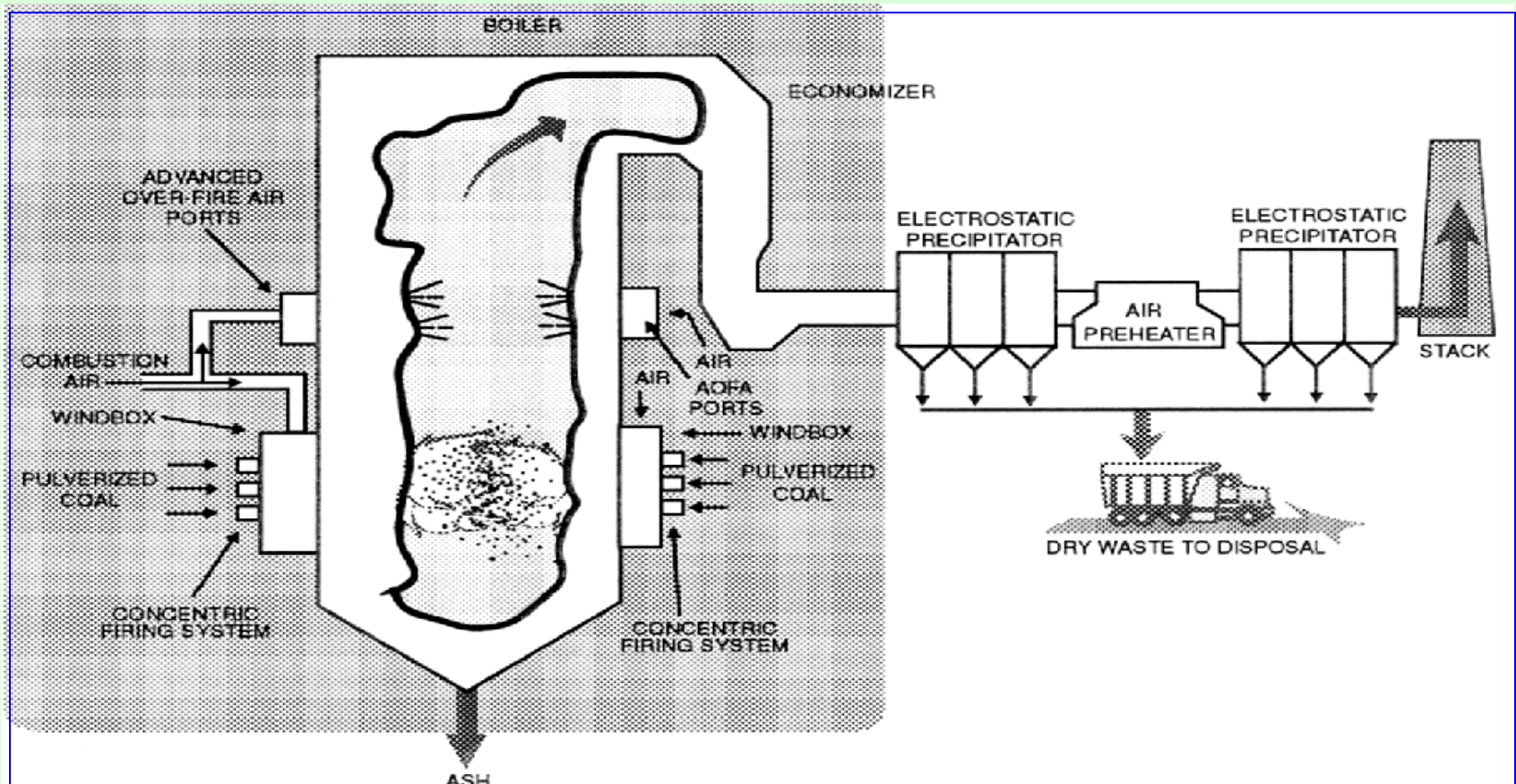
**Τεχνολογία:** Επίπεδα I, II και III του συστήματος της ABB Combustion Engineering (LNCFS) με προηγμένο σύστημα τροφοδοσίας αέρα από πάνω, δέσμες ακροφυσίων γαιάνθρακα και επιπρόσθετο αέρα

**Μέγεθος:** 180MWe

**Γαιάνθρακες:** KY, IL, WV ανατολικοί ασφαλτούχοι, περιεκτικότητα σε θείο 2.5-3.0%

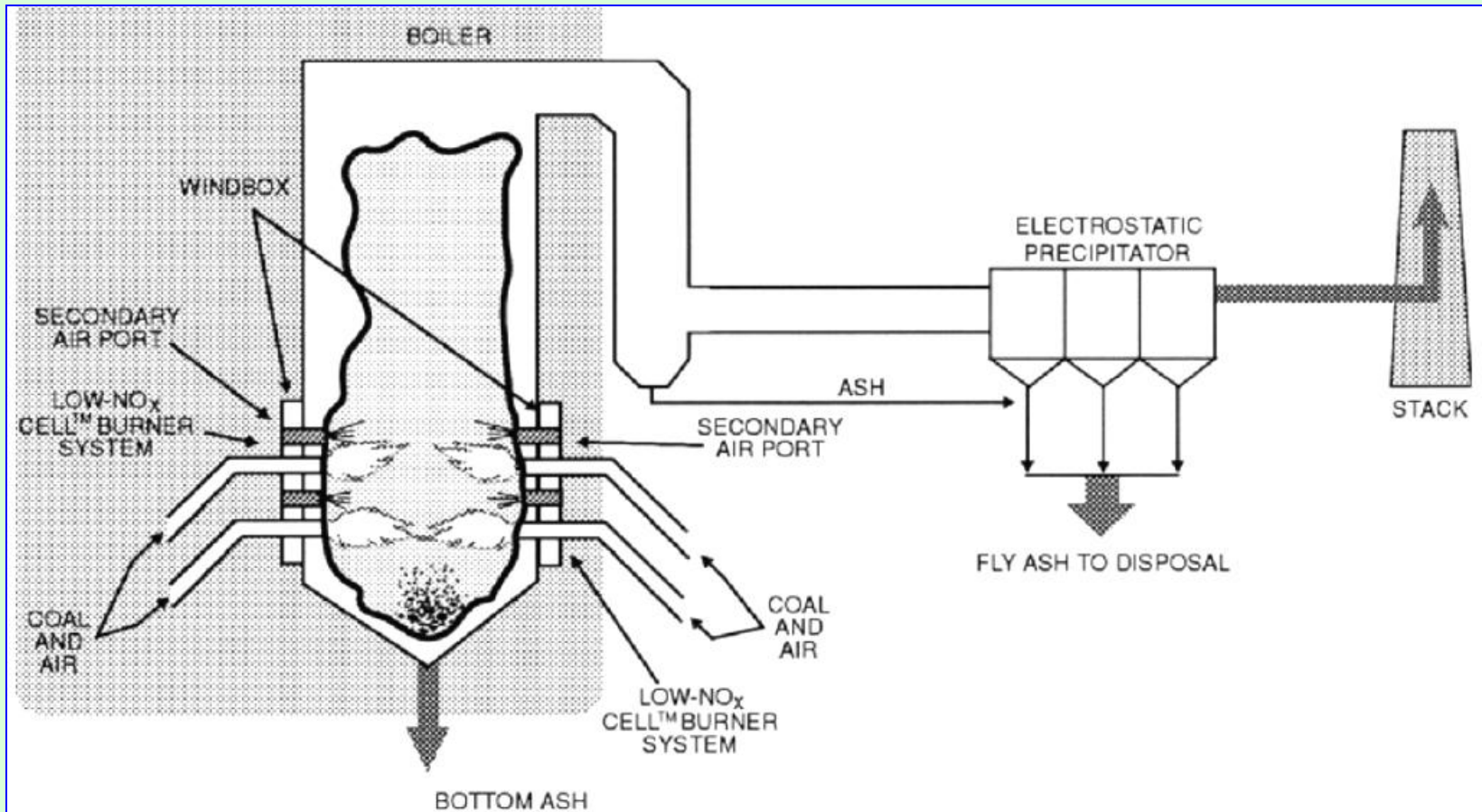
**Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα,**

**Οικονομοτεχνικά Αποτελέσματα**



# Επίδειξη Πλήρους Κλίμακας Αναβάθμισης Κλιβάνου CellTM, Χαμηλής Εκπομπής NOx (The Babcock & Wilcox Co.)

**Τεχνολογία:** The Babcock & Wilcox Company Low-NO<sub>x</sub> κλιβανός CellTM (LNCBTM) σταδιακή καύση  
**Μέγεθος:** 605MWe **Γαιάνθρακες:** KY, OH, και WV ασφαλτούχοι, περιεκτικότητα σε S~1.1%  
**Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα,** **Οικονομοτεχνικά Αποτελέσματα**  
Απόδοση μονάδας ουσιαστικά ίδια με αυτήν της μονάδας εκκίνησης

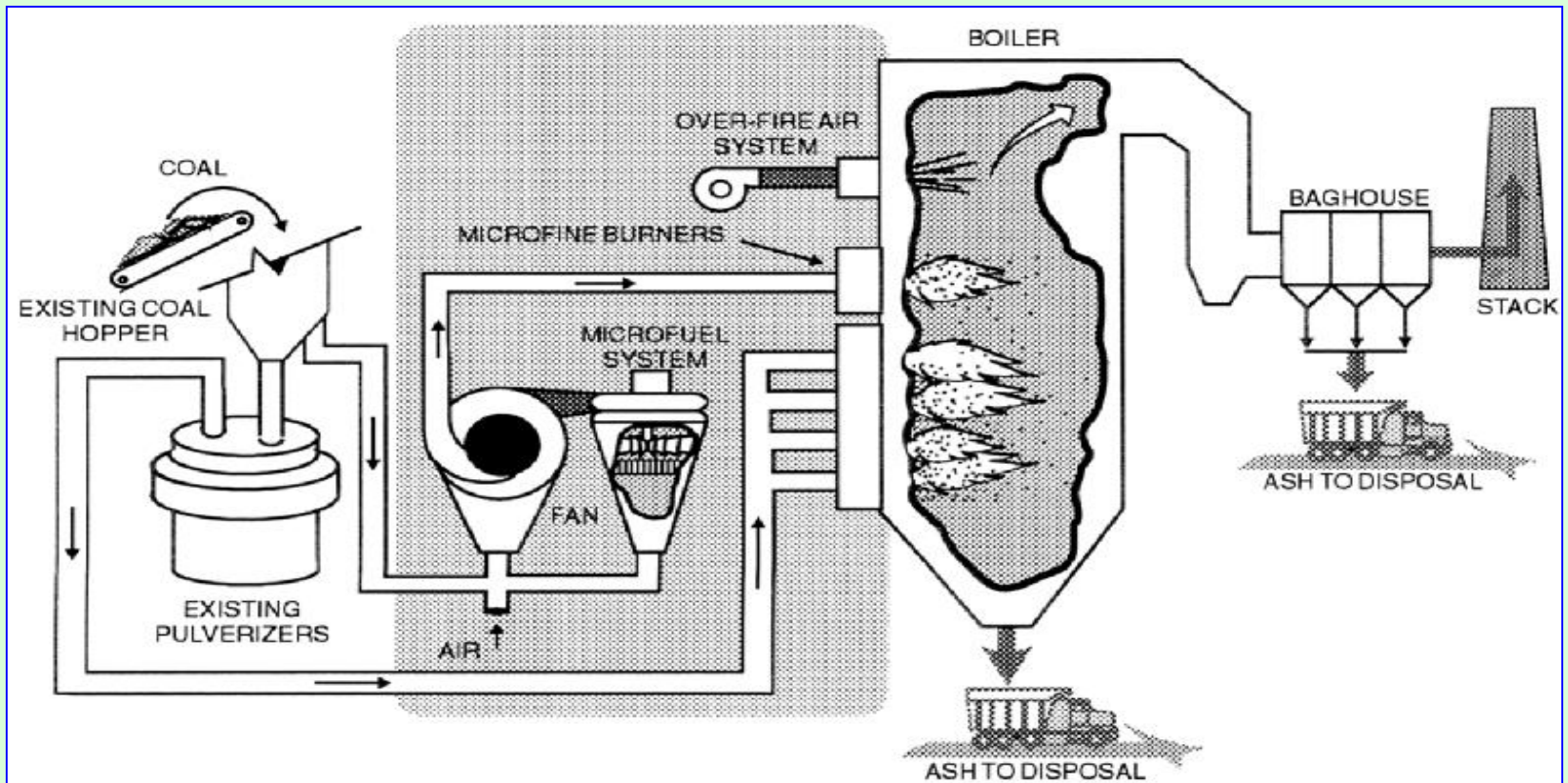


# Επίδειξη Επανάκαυσης Γαιάνθρακα σε Μέγεθος Μικρών για τον Έλεγχο των NOx με Ανάφλεξη στα Τοιχώματα

**Τεχνολογία:** Προηγμένος Έλεγχος NOx χρησιμοποιώντας την Τεχνολογία Fuller για επανάκαυση του γαιάνθρακα σε μέγεθος μικρών **Μέγεθος:** 175MWe

**Γαιάνθρακες:** Ασφαλούχος γαιάνθρακας χαμηλής περιεκτικότητας σε S από το Kentucky ή την West Virginia (80% κάτω από 325mesh)

**Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα,** **Οικονομοτεχνικά Αποτελέσματα**  
Απόδοση απομάκρυνσης NOx, 50-60%



# Επίδειξη Επανάκαυσης Γαιάνθρακα για τον Ελεγχο των ΝΟx σε Κλίβανο Κυκλώνα (The Babcock & Wilcox Co.)

**Τεχνολογία:** Έγχυση κονιοποιημένου γαιάνθρακα (20-30% της συνολικής εισαγωγής θερμότητας στον κλίβανο) στην ζώνη επανάκαυσης, για την δημιουργία συνθηκών έλλειψης οξυγόνου

**Μέγεθος:** 100MWe

**Γαιάνθρακες :** Illinois Basin ασφαλτούχος (Lamar), περιεκτικότητα σε S 1.8%, Powder River Basin υποασφαλτούχος, περιεκτικότητα σε S 0.6%

**Περιβαλλοντικά Αποτελέσματα,**

**Οικονομοτεχνικά Αποτελέσματα**

